

Sabancı
Universitesi



6

ULUSAL
TALAŞLI İMALAT
SEMPOZYUMU

The Green Park Pendik Hotel & Kongre Merkezi - İstanbul

5 - 7 Kasım 2015

www.talasliimalat.org

BİLDİRİ KİTABI



ÖNSÖZ

Talaşlı imalat, kesici takım ile iş parçasının tezgah üzerindeki uyumlu hareketleri sonucunda en sert malzemelerin bile parlak yüzeyli, hassas toleranslı, karmaşık profilli ürünlere dönüştüğü bir imalat şeklidir. Talaşlı imalatın amacı, tasarımı yapılmış bir iş parçasının, teknik resminde belirtilen gereksinimleri (boyut hassasiyeti, yüzey kalitesi ve geometrik toleranslar) karşılayacak şekilde en ekonomik koşullarda üretimidir. Bu özelliklerinden dolayı talaşlı imalat hemen her sektörde yoğun olarak kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyetli - düşük maliyetli üretim için endüstride yoğun çaba harcanmakta, gerek takım ve tezgah üreticisi firmalarda gerekse üniversitelerde yüksek maliyetli Ar-Ge çalışmaları sürdürülmektedir. Bu çalışmalar sonucunda her geçen gün üretime yeni takım malzemeleri, takım geometrileri ve kaplama tipleri katılmakta; hassasiyetleri, hızları ve süreç kabiliyetleri giderek artan tezgahlar geliştirilmektedir. Bunlara ek olarak CAM, CNC, ölçüm cihazları vb. talaşlı imalatın iç içe olduğu sektörlerdeki ilerlemeler sayesinde işleme zamanları, kayıp zamanlar ve dolayısıyla imalat süreleri en aza indirilmekte, önceden istenen kalitede, maliyette ve hızda üretilmeyen parçaların imalatı ekonomik olarak mümkün olabilmektedir.

İlk beşi farklı illerde yapılan, altıncısını İstanbul'da gerçekleştirdiğimiz *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*'nun (UTİS) misyonu; yukarıda bahsedilen, aynı amacı taşıyan sanayi ve üniversiteleri aynı platformda bir araya getirmek ve problemlere ortak çözüm arayışlarının yapılacağı bir ortam oluşturmaktır. Konu odaklı en önemli sempozyumlardan biri olan UTİS bu zamana kadar bu misyonu yerine getirmek için yoğun çaba göstermiştir ve göstermeye devam edecektir. Bunun bilinciyle 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu'nda öncelikle sanayiden olan katkının artırılması için çaba gösterilmiştir. Bu çabaların sonuçlarının sempozyum sürecinde gözleneceği inancını taşımaktayız. Sempozyumun hazırlık aşamasında, ülkemizin belli başlı sanayi kuruluşlarının desteklerini sağlayabilmiş olmak bu inancımızı güçlendirmektedir. Tüm sponsor firmalarımıza Sempozyumumuza sağladıkları desteklerden dolayı müteşekkir olduğumu bildirir, hazırlık aşamasındaki büyük katkılarından ötürü Dr. Emre Özlü, Esmâ Baytok, Dilara Albayrak ve Batuhan Yastıkçı ile başta Cansın Poroy olmak üzere Lovi Turizm Kongre&Organizasyon'a teşekkürlerimi sunar, tüm katılımcılara verimli bir sempozyum dilerim.

Prof. Dr. Erhan Budak

6. UTİS Düzenleme Kurulu Başkanı

DÜZENLEME KURULU

Ali ORAL, <i>Doç. Dr.</i>	Balıkesir Üniversitesi
Ali ÜNÜVAR, <i>Prof. Dr.</i>	Selçuk Üniversitesi
Sadık Engin KILIÇ, <i>Prof. Dr.</i>	Atılım Üniversitesi
Erhan ALTAN, <i>Prof. Dr.</i>	Yıldız Teknik Üniversitesi
Erhan BUDAK, <i>Prof. Dr.</i>	Sabancı Üniversitesi
İbrahim Etem SAKLAKOĞLU, <i>Doç. Dr.</i>	Ege Üniversitesi
İsmail LAZOĞLU, <i>Prof. Dr.</i>	Koç Üniversitesi
Mustafa Cemal ÇAKIR, <i>Prof. Dr.</i>	Uludağ Üniversitesi
Mustafa BAKKAL, <i>Doç. Dr.</i>	İstanbul Teknik Üniversitesi
Ulvi ŞEKER, <i>Prof. Dr.</i>	Gazi Üniversitesi
Yiğit KARPAT, <i>Yrd. Doç. Dr.</i>	Bilkent Üniversitesi

ORGANİZASYON KOMİTESİ

Prof. Dr. Erhan BUDAK

Dr. Emre ÖZLÜ

BİLİMSEL SEKRETERYA

Esmâ BAYTOK

Batuhan YASTIKÇI

SEMPOZYUM BİLİM KURULU

Ahmet HASÇALIK	Fırat Üniversitesi
Ahmet Murat PİNAR	Celal Bayar Üniversitesi
Ahmet ÖZDEMİR	Gazi Üniversitesi
Babür ÖZÇELİK	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Bilgin KAFTANOĞLU	Atılım Üniversitesi
Birhan IŞIK	Karabük Üniversitesi
Can ÇOĞUN	Çankaya Üniversitesi
Gökhan KÜÇÜKTÜRK	Gazi Üniversitesi
Hacı SAĞLAM	Selçuk Üniversitesi
Halil DEMİR	Karabük Üniversitesi
İ. Hüseyin FİLİZ	Gaziantep Üniversitesi
İbrahim ÇİFTÇİ	Karabük Üniversitesi
İhsan KORKUT	Gazi Üniversitesi
Kubilay ASLANTAŞ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
Murat KIYAK	Yıldız Teknik Üniversitesi
Muzaffer ERTEN	Beykent Üniversitesi
Necip CAMUŞÇU	TOBB Üniversitesi
Nihat TOSUN	Fırat Üniversitesi
Oğuzhan YILMAZ	Gaziantep Üniversitesi
Orhan ÇAKIR	Dicle Üniversitesi
Özden İŞBİLİR	Karabük Üniversitesi
Sabri ÖZTÜRK	Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Şefika KASMAN	Dokuz Eylül Üniversitesi
Ulaş ÇAYDAŞ	Fırat Üniversitesi
Yusuf KAYNAK	Marmara Üniversitesi

ENDÜSTRİYEL DESTEKÇİLERİMİZ

SPINNER	Ali Avcı
OERLIKON BALZERS	Olca Akbulut
KARCAN KESİCİ TAKIM	Çağlar Yavaş
ISCAR	Serkan Ekinci
SIEMENS	Taner Okayı
ONS MAKİNA	Şenay Subaşı
CHIRON	Serkan Özcan
TANDEM	Özlem Şengül
AKIM METAL	Alper Nizamoğulları
DMG	Fatih Girit
FORM MAKİNA	Murat Baran
TEİ	Doruk Koçer
BOHLER MADEN	Ediz Tuğrul
MAXIMA	Emre Özlü
VALEO	İlker Arıkonmaz
TİAD	Samet Burçin Aydoğmuş
ÇELEBİ MAKİNA	Süleyman Çelebi
SABANCI ÜNİVERSİTESİ	Prof. Dr. Yusuf Menceloğlu

ANA SPONSORUMUZ



ALTIN SPONSORUMUZ



GÜMÜŞ SPONSORLARIMIZ



BRONZ SPONSORLARIMIZ



HİZMET SPONSORUMUZ



İÇİNDEKİLER

SÖZEL BİLDİRİLER

TALAŞLI İMALAT OPERASYONLARININ MODELLENMESİ

FREZEYLE TORNALAMA İŞLEMİNDE KESME SICAKLIĞI MODELİ VE DENEYSEL OLARAK DOĞRULANMASI	11
DİK KESME MODELİNDE ÜÇÜNCÜ DEFORMASYON BÖLGESİ KUVVETLERİNİN TERMOMEKANİK MODELLENMESİ	21
YÜKSEK HIZLI İŞ MİLLERİNİN TERMAL MODELLEMESİ	33
MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA İLE DERİN DELİK DELME İŞLEMİNDE İŞ PARÇASININ SICAKLIK MODELLEMESİ	45

KESİCİ TAKIM TEKNOLOJİSİ – 1

AL 7050 MALZEMEDE İÇ ÇAP EZME TAKIMI KULLANIMININ YÜZEY KALİTESİNE VE DELİK GEOMETRİSİNE ETKİSİ	60
ALUMİNYUM ALAŞIMLARINDA ÇAPAKSIZ İMALATIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	68
KILAVUZ KESİCİ TAKIMLARI İLE Ti-6Al-4V ALAŞIMINA VİDA AÇILMASINDA KESME FORMUNUN KESME TORKUNA ETKİSİ	60
HELİSEL MATKAP UÇ VE KANAL GEOMETRİSİNİN AISI 4140 ÇELİĞİNİN DELME PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA	90

TAKIM TEZGAHLARI

KATMANLI İMALAT VE TALAŞLI İMALATIN BİRLİKTE UYGULANDIĞI MELEZ ÜRETİM SİSTEMLERİ ÜZERİNE	103
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DELİNMESİNDE TAKIM TEZGAHI FAKTÖRÜNÜN YÜZEY KALİTESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	116
FREZELEME ESNASINDAKİ TEZGÂH DİNAMİĞİNİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ	126
CETP KOMPOZİTLERİN DELİNMELEİNDEKİ İTME KUVVETİNİN ANFİS İLE MODELLENMESİ ..	145

ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ

304 VE 430 PASLANMAZ ÇELİKLERİN KİMYASAL İŞLENMESİ	158
ELEKTROEROZYON YÖNTEMİNDE ENERJİ YOĞUNLUĞU KAVRAMI VE İŞ PARÇASI İŞLEME HIZINA ETKİSİ	168
VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN FREZELENMESİNDE ÖSTEMPERLEME SICAKLIĞI VE SÜRESİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ	178
LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN Ti6Al4V ALAŞIMININ MİKRO YAPI VE İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI	189

KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞLI İMALATI

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞLI İŞLENEBİLME PERFORMANSI	198
---	-----

HELİSEL ÇOK KRİSTALLİ ELMAS MATKAPLAR İLE KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER LEVHALARIN DELİNME İŞLEMİNİN İNCELENMESİ	207
KARBONELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN DELİNMESİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜ AZALTACAK OPTİMUM KESME PARAMETRELERİN SEÇİLMESİ	221
ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN DELİNMESİNDE ÇİFT AÇILI MATKAP UÇLARIN İTME KUVVETİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ	236
TALAŞLI İMALATTA ÖZEL UYGULAMALAR	
MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA TEKNİĞİNİN DELME VE TAŞLAMA OPERASYONLARINDAKİ UYGULAMALARI ÜZERİNE BİR DERLEME	247
JANT ÜRETİM PROSESİ TORNALAMA AŞAMASINDA OLUŞAN AYAR FİRELERİNİN DÜŞÜRÜLMESİ	264
SERTLEŞTİRİLMİŞ RULMAN BİLEZİĞİNİN İŞLENMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME KUVVETİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ	273
A7075-T651 ALAŞIMININ SÜRTÜNME Lİ DELİNMESİNDE ÖN DELİK DERİNLİĞİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI	282
MİKRO ÖLÇEKTE TALAŞLI İMALAT	
İNCE PARÇALARIN MİKRO FREZELEMESİNDE SICAKLIKLAR VE ÇARPILMALAR	292
MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ	299
MİKRO FREZELEME İŞLEMİNİN 3 BOYUTLU SONLU ELEMANLAR ANALİZİ	311
Ti-6Al-4V ALAŞIMININ MİKRO FREZELENMESİNDE ELMAS BENZERİ KAPLAMALARIN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ	321
KESİCİ TAKIM TEKNOLOJİSİ – 2	
SERTLEŞTİRİLMİŞ SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN İŞLENMESİNDE KESİCİ TAKIMDA OLUŞAN GERİLMELERİN İNCELENMESİ	335
316L ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN FREZELENMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN KESME KUVVETLERİ VE TAKIM AŞINMASI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	346
AISI 304 PASLANMAZ ÇELİĞİN NANO GRAFEN KATKILI BİTKİSEL ESASLI KESME SIVISI VE MQL YÖNTEMİ KULLANILARAK FREZELENMESİNDE TAKIM AŞINMASI	356
DIŞ BÜKEY YÜZEYLERİN FREZELENMESİNDE FORM HATALARININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ	364
POSTER BİLDİRİLER	
VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN DELİNEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ	374
AŞIRI TEMPERLENMİŞ AISI 1050 ÇELİĞİN TORNALANMASINDA ESAS KESME KUVVETLERİNİN ÇOKLU REGRESYON İLE MODELLENMESİ	382
TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN GERİ DÖNÜŞÜM SÜREÇLERİ	393

SÖZEL BİLDİRİLER

TALAŞLI İMALAT OPERASYONLARININ MODELLENMESİ

FREZEYLE TORNALAMA İŞLEMİNDE KESME SICAKLIĞI MODELİ VE DENEYSEL OLARAK DOĞRULANMASI

Umut Karagüzel^a, Mustafa Bakkal^a ve Erhan Budak^b

a, İTÜ Makine Fakültesi İstanbul/TÜRKİYE, karaguzelu@itu.edu.tr, bakkalmu@itu.edu.tr,

b, Sabancı Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul TÜRKİYE, ebudak@sabanciuniv.edu

Özet

Frezeyle tornalama esasen bir tornalama işlemi olup işlem sırasında sabit bir takım yerine freze takımı kullanılmaktadır. Bu nedenle işlem kesintili bir işlem halini almaktadır. Sonuç olarak bir takımın bir dönüşü ısınma ve soğuma döngülerini içermektedir. Bu da kesme sıcaklığının sürekli kesmenin olduğu tornalama işlemine göre daha düşük olmasına yol açmaktadır. Bu çalışmada frezeyle tornalama sıcaklığı analitik olarak modellenmiş ve çeşitli parametrelerin kesme sıcaklığı üzerine etkisi gösterilmiştir. Buna ek olarak kesme sıcaklığının ölçülmesi için yeni yöntem geliştirilerek frezeleme sırasında kesme sıcaklıkları ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler: Frezeyle tornalama, kesme sıcaklığı, sıcaklık ölçümü

CUTTING TEMPERATURE MODEL IN TURN-MILLING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION

Abstract

Turn-milling which is a basically turning operation, uses a milling tool instead of stationary tool. That's why the operation becomes an interrupted cutting operation. As a result, a cutting cycle includes heating and cooling periods which leads to lower cutting tool temperatures compared to continuous cutting operation. In study an analytical cutting temperature model is proposed and effects of some parameters in turn-milling on cutting temperature are shown. Additionally a new method is developed to measure cutting temperatures during milling operation and cutting temperatures were measured and compared to those obtained by the proposed model.

Keywords: Turn-milling, cutting temperature, temperature measurement

1. GİRİŞ

Talaşlı imalatta karşılaşılan en önemli problemlerden bir tanesi, kesme parametrelerinin seçimini etkileyen ısı oluşumudur. Kesme işleminde üç tane ısı oluşum bölgesi vardır. Takım ve iş parçasının ısı iletim katsayısına bağlı olarak, ısının bir kısmı takıma geçer böylelikle difüzyon ve ısı gerilmelere neden olarak takım aşınmasını tetikler. Kesme sıcaklıkları, özellikle takım-talaş arayüzündeki maksimum sıcaklık, takım ömrü açısından önemlidir. Takım ömrü, talaşlı imalatın verimliliğini doğrudan etkileyen bir parametre olduğundan kesme sırasında ortaya çıkan sıcaklıkların belirlenmesi sürecin optimizasyonu açısından oldukça önemlidir.

Kesme sıcaklığının modellenmesi sırasında temel olarak çalışmalar şu başlıklar halinde sıralanabilir; kayma bandı ve talaş yüzeyindeki ortalama ve maksimum sıcaklıklar, talaş yüzeyindeki sıcaklık dağılımı, ısı paylaşımı ve takım, iş parçası ve talaş üzerindeki sıcaklık dağılımları. Bu çalışmalar ısı iletimi, hareketli veya sabit ısı kaynağı ile birlikte kinematik, geometri ve enerji konularını kapsamaktadır.

Trigger ve Chao kararlı hal için iki boyutlu bir model geliştirerek kesme sırasındaki ortalama sıcaklıkları hesaplanmıştır [1]. Bu hesaplarında araştırmacılar kayma düzlemi ve talaş yüzeyi olmak üzere iki ısı kaynağının olduğunu ileri sürmüşlerdir. Diğer bir önemli nokta ise ısı paylaşımıdır, çalışmada üretilen ısının % 90'nının talaşa geçtiği % 10'unun ise iş parçasına geçtiği kabul edilmiştir. Loewen ve Shaw benzer bir yaklaşım kullanılarak takım-talaş ara yüzündeki sıcaklıkları bazı kabuller yaparak bulmuşlardır [2]. Yazarlar talaş ve iş parçasının kayma düzleminde birbirine göre hareket eden iki ayrı unsur olarak düşünmüşlerdir. Modelde kayma düzlemine göre talaş sabit olarak düşünülürken, parça kayma hızı ile hareket eden bir unsur olarak hesaba katılmıştır. Böylelikle parça ve talaş için ayrı ayrı sıcaklık çözümü elde edilmiştir. Weiner tarafından ise başka bir analitik model geliştirilerek takım-talaş arayüzündeki ortalama sıcaklıkları hesaplanmıştır [3]. Bu modelde kayma düzlemi kesme hızında hareket eden eğik bir düzlem olarak kabul edilip problem basitleştirilmiştir. Weiner ayrıca talaşın akış yönünü kayma düzlemine dik olarak kabul etmiş ve takımın hareket yönündeki ısı iletimini ihmal etmiştir.

Yukarıda anlatılan modeller iki boyutlu ve kararlı hal için sağlanan çözümleri kapsamaktadır. Buna ek olarak özellikle frezeleme gibi işlemlerde sürekli bir kesim yoktur, sonuç olarak süreç ısınma ve soğuma döngülerinden oluşur ve çözümün bu döngüyü yansıtabilecek şekilde olması gerekir. Bu konu ile ilgili olarak, Radulescu 3 boyutlu analitik bir model geliştirilerek hem sürekli hem de kesintili talaşlı imalat prosesleri için sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır [4]. Bu modelde kesme kuvvetleri algoritmaya girdi olarak verilerek geçici hal için kesme sıcaklıkları hesaplanabilmektedir. Takıma, talaşa ve parçaya olan ısı akışı, talaş oluşum bölgesindeki enerji dengesi göz önüne alınarak bulunmaktadır. Daha sonra bu ısı akı değerleri kullanılarak, bir ısı iletimi problemine dönüştürülen denklemler çözülerek sıcaklık dağılımları bulunmaktadır. Çalışmada analitik olarak hesaplanan sıcaklık değerleri deneysel olarak da doğrulanmış ve sonuçların oldukça tatminkâr olduğu görülmüştür. Benzer bir şekilde, Stephenson 3 boyutlu olarak kesme sıcaklıkları modellenmiştir [5]. Stephenson çalışmasında Radulescu ve Kapoor'dan farklı olarak yalıtılmış sınır koşullarını kullanmış ve böylelikle problemi basitleştirerek işlem zamanını azaltmıştır. İşlem sınırları takım ucunu içerecek şekilde belirlenmiş böylelikle tutucu gibi diğer ekipmanlara olan ısı transferi ihmal edilmiştir. Isı akışı ise yine kesme kuvvetleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak kesme bölgesindeki ortalama sıcaklıklar deneysel olarak elde edilenler oldukça örtüşecek şekilde modellenebilmiştir. Bu analitik çalışmalara ek olarak Lazoglu ve Altıntaş ise sonlu farklar metodunu kullanarak hem sürekli hem de kesintili talaşlı imalat operasyonları için bir model geliştirmiş ve sonuçlarını literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırmışlardır [6].

Talaşlı imalat sırasında kesme sıcaklıklarının ölçülmesi yoğun bir çaba gerektirir. İşlemin çok hızlı olması ve sıcaklık üretiminin küçük bir alanda gerçekleşmesi sıcaklık ölçümünü çok zorlaştırmaktadır. Kesintili talaşlı imalat söz konusu olduğunda ise bu zorluk daha da artmaktadır; çünkü sıcaklık zamanla değişmektedir. Bu konuda literatürde oldukça az yayın bulunmaktadır. Bunlar arasında Sato fiber optik kablolar ve pirometre kullanarak frezeleme sırasında sıcaklık ölçmüşlerdir [7]. Bu çalışmada kablolar tezgah anamiliinden geçirilmiş ve dışarıdaki pirometreye ulaştırılmıştır. Bir başka çalışmada ise Armendia ve arkadaşları freze tezgahında takım yerine özel hazırlanmış bir iş parçası bağlayarak termal kamera yardımıyla sıcaklık ölçmüşlerdir [8].

Bu çalışmada, frezeyle tormalama operasyonu için Stephenson 'ın [5] geliştirdiği model temel alınarak, 3 boyutlu zamana bağlı bir takım sıcaklığı modeli gerçekleştirilmiştir. Bu modelin doğrulanması için öncelikle freze üzerinde deney yapılmış ve bu amaçla bir sıcaklık ölçüm düzeneği geliştirilmiş ve bununla frezeleme esnasında kesme sıcaklıkları ölçülmüştür. İlerleyen çalışmalarda kesme sıcaklıkları frezeyle tormalama sırasında da ölçülecek ve model doğrulanacaktır.

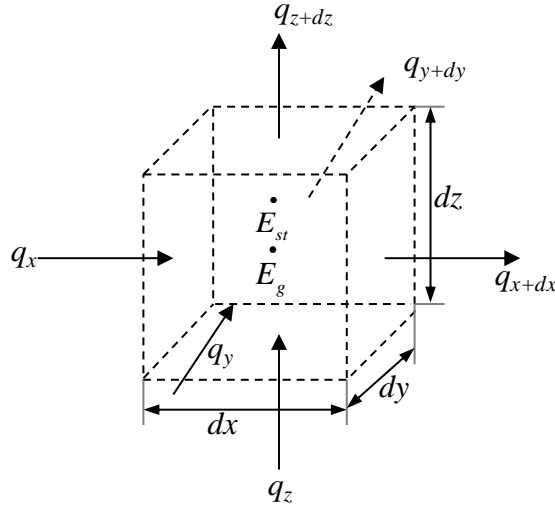
2. KESME SICAKLIĞI MODELİ

Kesici takım sıcaklığının modellenmesi talaşlı imalatta süreç modelleme başlığında önemli bir yer tutmaktadır. Bunun nedeni kesme sıcaklıklarının üretkenliği oldukça etkilemesidir. Kesme sırasında oluşan sıcaklıklar hem difüzyonu artırarak takım aşınmasını hızlandırır hem de kesilen parça bütünlüğünü etkileyerek parça kalitesini belirler. Bu nedenle kesme sırasında oluşan sıcaklıkların önceden bilinmesi ve parametrelerin buna göre seçilmesi süreç tasarımında önemli bir yer tutar.

Kesme sırasında oluşan ısı kesme kuvvetleri ve kesme hızı kullanılarak hesaplanabilir. Daha önceki raporlarda belirtildiği gibi frezeyle tormalama sırasında oluşan kesme kuvvetleri geliştirilen model ile hesaplanabilmektedir. Bu durumda kesme işleminde ortaya çıkan ısı Q , talaşlı imalat sırasında yapılan mekanik işin tamamının ısıya dönüştüğü kabulü ile şu şekilde hesaplanabilir:

$$Q = F_R \cdot V_c \quad (1)$$

Burada F bileşke kuvvet, V ise kesme hızıdır.



Şekil 1. Kartezyen koordinatlarda diferansiyel kontrol hacmi

Takım sıcaklık alanını hesaplamak için kontrol hacminde enerji dengesini açıklayan termodinamiğin ilk yasası başlangıç noktası olarak kullanılabilir:

$$E_i + E_g - E_o = \Delta E_{st} \quad (2)$$

Burada E_i ve E_o sırasıyla kontrol hacmine giren ve çıkan mekanik ve ısı enerjileridir. E_g kontrol hacminde üretilen ısı olup, E_{st} ise kontrol hacminde depo edilen enerji terimini göstermektedir.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Şekil 1 kartezyen koordinatlarda kontrol hacmini göstermektedir. Şekil 1 e göre kontrol hacminde bir sıcaklık gradyanı olursa, ısı bütün yüzeylerden iletimle transfer edilir. Bu durumda x, y, z eksenleri boyunca ısı iletimi, q_x , q_y ve q_z ile gösterilmiş olup bunlar belirtilen yüzeylere diktir. Karşı yüzeylerdeki ısı iletimi terimleri ise Taylor serilerini kullanarak bulunabilir:

$$\begin{aligned}q_{x+dx} &= q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \\q_{y+dy} &= q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \\q_{z+dz} &= q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz\end{aligned}\quad (3)$$

Frezeyle tornalama kesikli bir süreçtir dolayısı ile kontrol hacminde depolanan enerji zamanla değişir. Bu durumda enerji depolama terimi:

$$\dot{E}_{st} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (4)$$

Burada ρ ve c_p sırasıyla kesici takımın yoğunluğu ve ısı kapasitesidir. Denklemler (3) ve (4) , enerji korunum denkleminin içine yerleştirilirse şu elde edilir:

$$(q_x + q_y + q_z) - (q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy + q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (5)$$

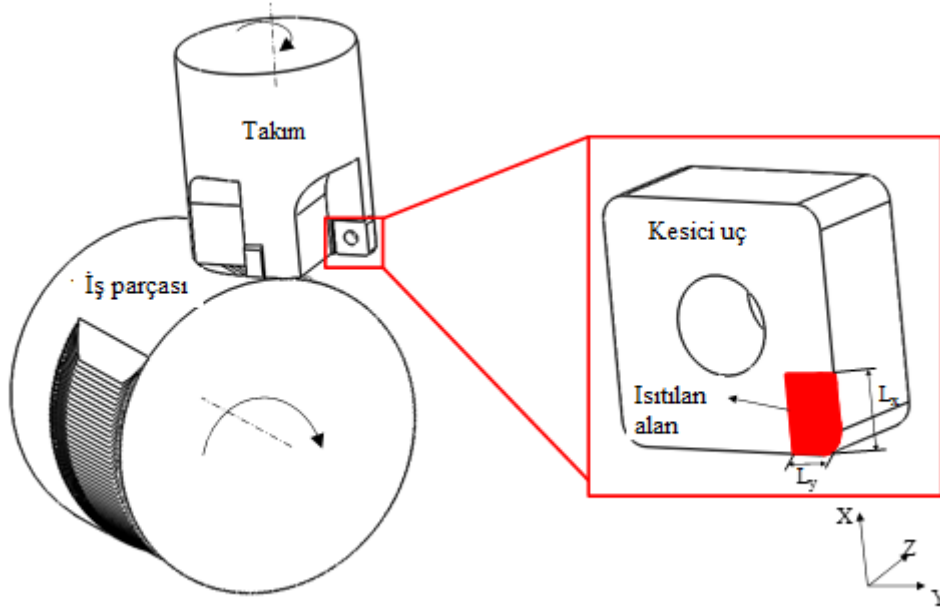
Burada q_x , q_y ve q_z Fourier Isı İletim Yasası ile ifade edilebilirler:

$$\begin{aligned}q_x &= -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \\q_y &= -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \\q_z &= -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z}\end{aligned}\quad (6)$$

Bu arada k kesici takımın ısı iletim katsayısıdır. Son olarak Denklem (6), (5) in içine yerleştirilir ve takımın termal özelliklerinin homojen ve zamandan bağımsız olduğu kabulünü yaparsak, kartezyen koordinatlarda 3 boyutlu ısı yayılım denklemini şu şekilde elde edebiliriz:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Frezeyle tornalama operasyonunda kesici takım dögüsel ısınma ve soğuma süreçlerine maruz kalır, takım üzerinde bu döngüye maruz kalan alan Şekil 2 de gösterilmektedir. Bu durumda Denklem (7) için sınır şartları şu şekilde verilebilir:



Şekil 2 Frezeyle tornalama işleminde sıcaklık oluşumu

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q(x, y, t) \quad z = 0; 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y \quad (8)$$

Burada L_x ve L_y Şekil 2 de görülen ısıtılan alanın boyutlarıdır, $q(x,y,t)$ ise yüzeye uygulanan ısı akısını temsil etmektedir. Diğer tüm sınır şartları yalıtılmış kabul edilmektedir ve takımın ilk sıcaklığı oda sıcaklığı olarak kabul edilmiştir.

Denklem (7) analitik ve numerik olarak çözülebilir. Numerik çözümler genellikle uzun sürelerle ihtiyaç duyarlar. Bu nedenle analitik çözümler daha pratiktir fakat her durum için analitik çözüm yoktur bu nedenle bazı basitleştirmelere ve kabullere başvurulur. Bu noktada incelenen durum için kesici takım yarı sonsuz bir dikdörtgen şeklinde kabul edilirse, yukarıdaki denklem Green fonksiyonları yardımı ile çözülebilir. Bu halde Green fonksiyonu θ_G , takım üzerinde x, y , ve z , koordinatlarındaki bir noktanın t zamanındaki sıcaklığını $x = x_p$, $y = y_p$, $z = 0$ noktasında bulunan ve enerjisini $t=\tau$ anında salan noktasal bir ısı kaynağının sonucu olarak vermektedir.

$$\theta_G = (x, y, z, x_p, y_p, 0, D) = \frac{2}{(\sqrt{\pi} \cdot D)^3} \exp\left[\frac{-z^2}{D^2}\right] \cdot \left[\exp\left(\frac{-(x+x_p)^2}{D^2}\right) + \exp\left(\frac{-(x-x_p)^2}{D^2}\right) \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{-(y+y_p)^2}{D^2}\right) + \exp\left(\frac{-(y-y_p)^2}{D^2}\right) \right] \quad (9)$$

Burada $D = 2\sqrt{[\alpha(t-\tau)]}$

Kesici takım üzerindeki sıcaklık dağılımı ısı akısı fonksiyonu kullanılarak ve Denklem (9) un zaman, L_x ve L_y üzerine integre edilmesi ile bulunabilir.

$$T(x, y, z, t) = \frac{\alpha}{k} \int_0^t \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \theta_G(x, y, z, x_p, y_p, 0, D) \cdot Q(x_p, y_p, \tau) dy_p dx_p d\tau \quad (10)$$

θ_G nin L_x ve L_y boyunca integre edilmesi sonucu θ_{GR} elde edilir.

$$\begin{aligned} \theta_{GR}(x, y, z, L_x, L_y, D) &= \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \theta_G(x, y, z, x_p, y_p, 0, D) dy_p dx_p \\ &= \frac{1}{2\sqrt{\pi}D} \exp\left[\frac{-z^2}{D^2}\right] \theta_{GU}(x, L_x, D) \cdot \theta_{GU}(y, L_y, D) \end{aligned} \quad (11)$$

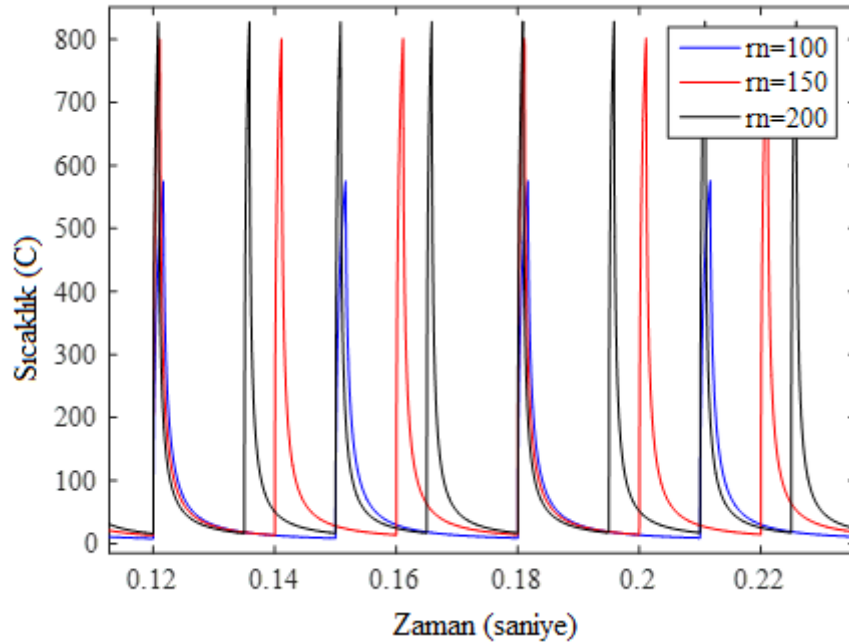
$$\text{Burada } \theta_{GU}(u, L, D) = \text{erf}\left(\frac{L+u}{D}\right) + \text{erf}\left(\frac{L-u}{D}\right)$$

Denklem (11), Denklem 10 un içine yazılırsa kesici takım için sıcaklık dağılımı elde edilir:

$$T(x, y, z, t) = \frac{\alpha}{k} \int_0^t \theta_{GR}(x, y, z, L_x, L_y, D) \cdot q(\tau) d\tau \quad (12)$$

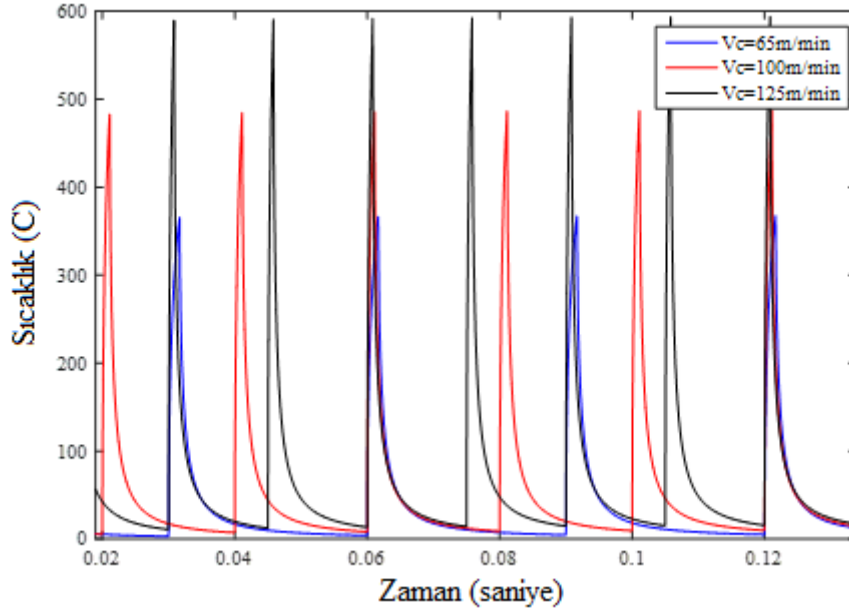
Denklem (12) zamanının bir fonksiyonu olan iki adet ifade içermektedir; θ_{GR} ve $q(\tau)$. Bu durumda bu denklem zaman sarmalanması metodu ile çözülebilir.

Denklem yukarıda anlatıldığı şekilde çözülmüş ve frezeyle tornalama işleminde kullanılan kimi parametrelerin kesme sıcaklığı üzerine etkisi araştırılmıştır.



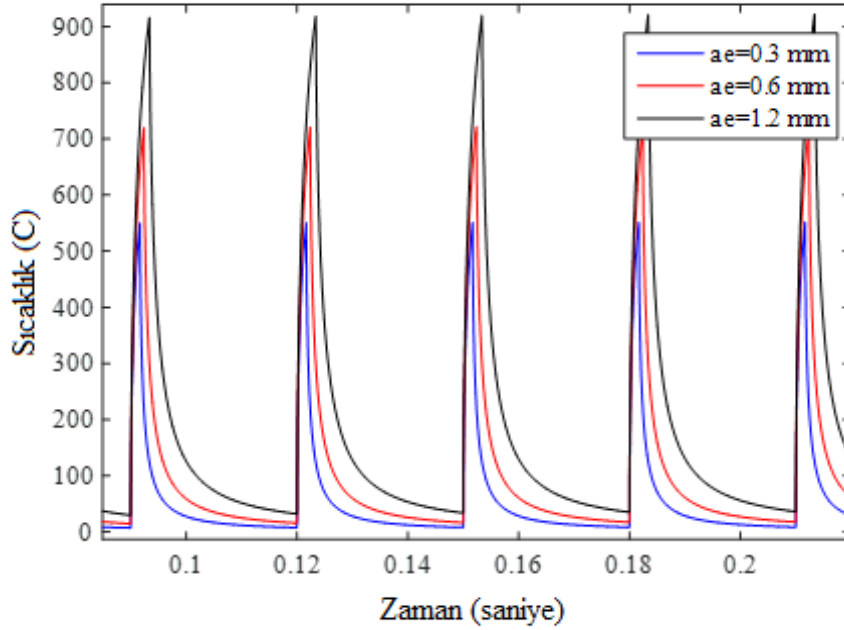
Şekil 3 Hız oranlarının kesme sıcaklığı üzerine etkisi

Şekil 3 hız oranlarının kesme sıcaklığı üzerine etkisini göstermektedir. Hız oranı; takım dönme hızının, parça dönme hızına oranıdır. Hız oranı değiştikçe hem üretilen ısı miktarı hem de ısıtılan alanın büyüklüğü değişir. Bu durumda şekilden de görüldüğü üzere bu oran arttıkça maksimum sıcaklıklar artmaktadır.



Şekil 4 Kesme hızının kesme sıcaklığı üzerine etkisi

Şekil 4 kesme hızının etkisini göstermektedir. Hatırlanacağı üzere kesme sırasında oluşan ısı, kesme hızının bir fonksiyonudur. Bu nedenle kesme hızı arttıkça bariz bir şekilde kesme sıcaklığı da artmaktadır.



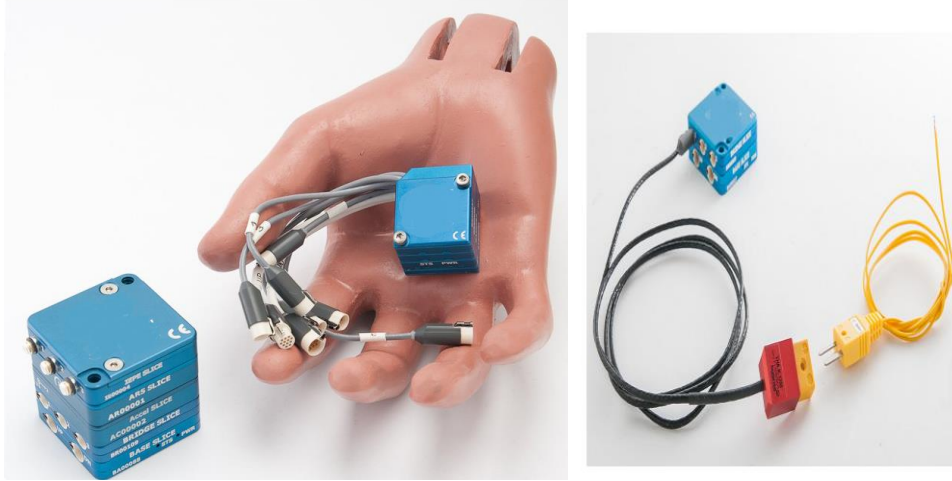
Şekil 5 İlerlemenin kesme sıcaklığı üzerine etkisi

Ae, frezeyle tornalamada iş parçası devri başına takımın aksel yönde ilerlemesini ifade etmektedir. Bu değer arttıkça, kesme zamanı artmakta dolayısı ile aynı süre zarfında soğumak için takıma daha az süre kalmaktadır. Bu nedenle Şekil 5 ten de görüldüğü üzere ae nin artması ile birlikte kesme sıcaklığı artmaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

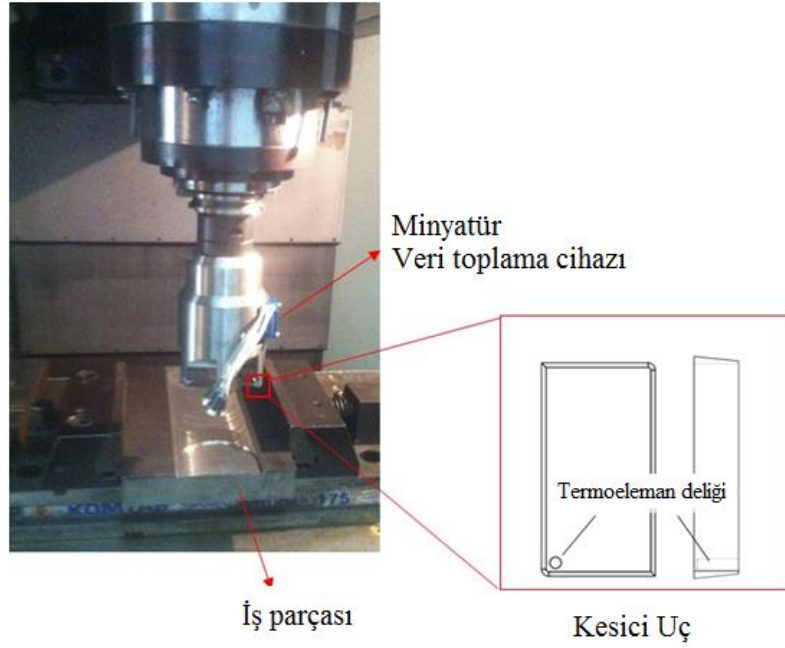
Bu dönemde geliştirilen modelin doğrulanması için deneysel çalışmalara da başlanmıştır ve bu amaçla bir takım ilerlemeler kaydedilmiştir. Genel olarak frezeleme işlemleri sırasında sıcaklık ölçmek oldukça zordur. Bunun nedeni takımın dönmesi ve kesilen alanın temassız ölçüm yöntemleri ile görülememesi olarak verilebilir. Ayrıca işlemin zamana bağlı doğası da ölçümü zorlaştıran diğer bir etkidir.

Bu noktada yeni bir ölçüm metodu geliştirmiş olup, bu ölçüm metodu oldukça küçük bir veri toplama cihazını içermektedir. Şekil 6 da görülen bu veri toplama cihazının bir termo elemanla takıma monte edilmesi planlanmıştır.



Şekil 6 Minyatür veri toplama sistemi ve termo-elemanı

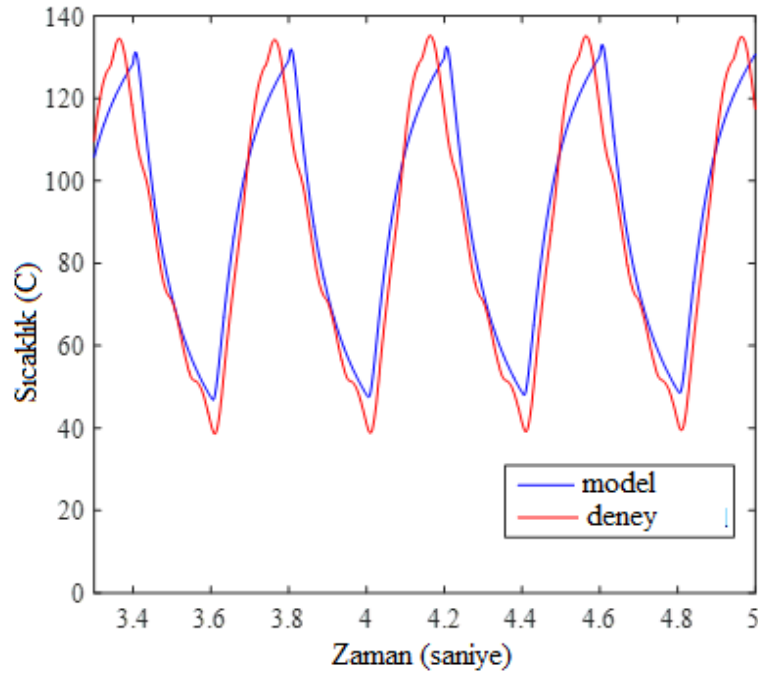
Yukarıda bahsedilen cihaz, fakülte altyapısına kazandırılarak deneylerde kullanılmaya başlanmıştır. Cihazın monte edilebilmesi için 80 mm çapında özel bir takım tasarlanmış ve ürettirilmiştir. Termoelemanın gömülebilmesi için ise kesici takımlar EDM yardımı ile delinmiş ve termoelemanlar bu deliklere yerleştirilmiştir. Şekil 7 de kesime hazır takım ve veri toplama cihazı görülebilir.



Şekil 7 Sıcaklık ölçme deney düzeneği

Deneyde kesici takım için kaplamasız karbür tercih edilmiş olup, iş parçası ise AISI 4140 takım çeliğidir. Takımın dönme hızı 150 dev/dak olarak seçilmiş bunun yanında ilerle 0.15 mm/dev kesme derinliği ise 1 mm'dir.

Şekil 8'de elde edilen sonuçlar ve bunların model ile karşılaştırılması görülebilir. Şekilden de görüleceği üzere oldukça tatminkâr sonuçlar ortaya çıkmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında daha farklı parametreler denenecek ve deneyler frezeyle tornalamaya uygulanacaktır.



Şekil 8 Deneysel kesme sıcaklık sonuçlarının model ile karşılaştırılması

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kesme sıcaklığı talaşlı imalat konusunda en çok araştırılan konulardan biridir. Bunun nedeni özellikle takım aşınması ve parça bütünlüğü üzerine oynadığı rolden ileri gelmektedir. Bu amaçla işlem verimliliği açısından gerekli tedbirler alınmalı ve kesme sıcaklığının makul değerlere indirilmesi için kesme parametreleri optimize edilmelidir. Torna gibi sürekli temasın olduğu işlemlerde kesme sıcaklığı kesme parametreleri değişmediği sürece sabittir. Fakat freze gibi kesici takımın döndüğü uygulamalarda kesme sıcaklığı zamanla değişir. Kesici takım freze uygulamalarında soğumaya zaman bulduğundan kesme sıcaklıkları torna işlemlerine göre düşüktür. Bu da işlemlerde daha yüksek hızların kullanılmasına izin vererek işlem verimliliğini artırır.

Bu çalışmada öncelikli olarak frezeyle tornalama işlemi için bir sıcaklık modeli geliştirilmiştir. Bu sıcaklık modelinde kesici takım 3 boyutlu bir dikdörtgenler prizması şeklinde kabul edilip sınır şartları adyabatik olarak tanımlanmıştır. Kesici takıma uygulanan ısı akısı ise daha önce geliştirilen kesme kuvveti modeli yardımı ile bulunmuştur. Sonuç olarak, elde edilen sıcaklık modeli ile kimi frezeyle tornalamada kullanılan kesme parametrelerinin kesme sıcaklıkları üzerine etkisi bulunmuştur. Buna ek olarak bu çalışmada geliştirilen model deneysel olarak da doğrulanmaya çalışılmıştır. Freze işlemlerinde sıcaklık ölçmek takımın sabit olduğu diğer durumlara göre daha zordur. Bu amaçla yeni bir düzenek önerilmiş ve bu uygulama ile zamanla değişen sıcaklıklar ölçülmüştür. Ölçülen bu sıcaklıklar model ile karşılaştırılmış ve oldukça tatmin edici sonuçlar alınmıştır.

KAYNAKLAR

- [1]Trigger, K.J.; Chao, B.T.; "An Analytical Evaluation of Metal Cutting Temperature"; In: Transactions of the ASME Vol.73, pp. 57-68; 1951.
- [2]Loewen, E.G.; Shaw, M.C.; "On the Analysis of Cutting Tool Temperatures"; In: Transactions of the ASME Vol.71, pp. 217-231; 1954.
- [3] Weiner, J. H. Shear-plane temperature distribution in orthogonal cutting. Trans. ASME, 77(8), 1331-1338; 1955.
- [4] Radulescu, R., & Kapoor, S. G. An analytical model for prediction of tool temperature fields during continuous and interrupted cutting. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 116(2), 135-143;1994
- [5] Stephenson, D. A., & Ali, A. Tool temperatures in interrupted metal cutting. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 114(2), 127-136 ; 1992.
- [6] Lazoglu, Ismail, ve Yusuf Altintas. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture 42 (9): 1011-1022; 2002.
- [7] Sato, Masahiko, Takashi Ueda, ve Hisataka Tanaka. An experimental technique for the measurement of temperature on CBN tool face in end milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture 47(14): 2071-2076; 2007.
- [8] Armendia, M., et al.High bandwidth temperature measurement in interrupted cutting of difficult to machine materials. CIRP Annals-Manufacturing Technology 59.1: 97-100; 2010.

DİK KESME MODELİNDE ÜÇÜNCÜ DEFORMASYON BÖLGESİ KUVVETLERİNİN TERMOMEKANİK MODELLENMESİ

Hayri Bakioğlu^a, Emre Özlü^b, Erhan Budak^a

*a, Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü,
İstanbul/Türkiye*

*b, Maksima İmalat ARGE Ltd. Şti, GOSB Teknopark, Gebze, Kocaeli, Türkiye
emre@maxima.com.tr*

Özet

Gerçekleştirilen bu çalışmada işleme operasyonunda yer alan üçüncü deformasyon bölgesinden dolayı oluşan kuvvetler, termomekanik bir yaklaşım kullanılarak modellenmiş ve yeni bir deneysel yöntemle doğrulanmıştır. Talaş oluşum sürecinde yer alan birinci deformasyon bölgesi Johnson-Cook malzeme modeli kullanılarak hassas olarak modellenmektedir. Buna ek olarak ikinci deformasyon bölgesi (talaş temas yüzeyi) ve üçüncü deformasyon bölgelerinin modellenmesi “İki Bölgeli Temas” modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üçüncü deformasyon bölgesinde ortaya çıkan kuvvetlerin deneysel olarak tespiti için yeni bir deney düzeneği oluşturulmuştur. Geliştirilen modeller deneysel olarak doğrulanmış ve model sonuçları ile arasındaki farkın düşük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dik Kesme Modeli, Termomekanik Yaklaşım, Üçüncü Deformasyon Bölgesi

THERMOMECHANICAL MODELING OF THIRD DEFORMATION ZONE FORCES IN ORTHOGONAL CUTTING APPROACH

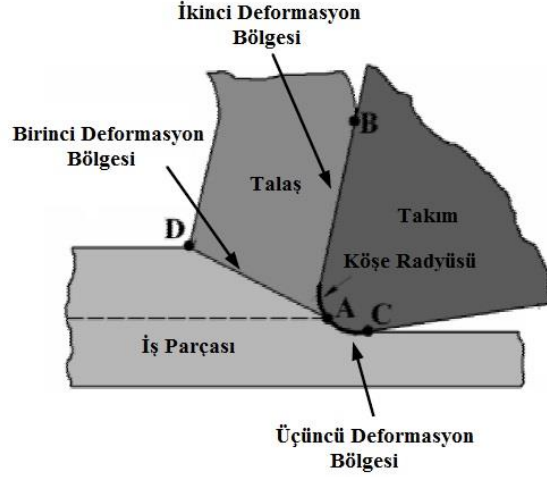
Abstract

In this study, the third deformation zone forces in orthogonal cutting is modeled with a thermomechanical approach, and verified by a novel experimental method. The primary deformation zone can be modeled with Johnson-Cook constitutive material model. For the modeling of secondary and third deformation zone forces, the “Dual Zone Contact Model” is applied. A new experimental procedure is also developed in order to identify the third deformation zone forces. The proposed models are experimentally verified and a good agreement is observed.

Keywords: Orthogonal Cutting, Thermomechanical Modeling, Third Deformation Zone

1. GİRİŞ

Takımın uç noktasında yer alan yuvarlama yarıçapı, kesme mekaniği, oluşan yüzeyin kalitesi ve pürüzlülük değerleri, takım ömrü ve kesim sırasında oluşan kuvvetler açısından son derece önem taşımaktadır. Takım ucunda yer alan bu yuvarlama yarıçapından dolayı oluşan üçüncü deformasyon bölgesi, her ne kadar talaş oluşum sürecinin içerisinde bulunmasa da, takımın boşluk yüzeyi ve yeni işlenmiş yüzey arasında oluşturduğu ezmeye bağlı mekanizmadan dolayı takım üzerinde kuvvet oluşturmaktadır. Dik kesme modeli ve deformasyon bölgeleri yuvarlama yarıçapı göz önünde bulundurularak Şekil 1 üzerinde gösterilmiştir. Üçüncü deformasyon bölgesi Şekil 1 üzerinde gösterilen A ve C noktaları arasında kalan bölümde oluşmaktadır.



Şekil 1 – Ortogonal kesme model ve deformasyon bölgeleri

Üçüncü deformasyon bölgesinin modellenmesi ile ilgili literatürde farklı yaklaşımlar kullanılarak oluşturulan modellere rastlamak mümkündür. Bu deformasyon bölgesi ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalardan ilk olanlar Albrecht [1] ve Masuko [2] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında üçüncü deformasyon bölgesinin varlığını belirtmişler ve toplam kesme kuvvetleri üzerinde göz ardı edilemeyecek bir etkisi olduğunu vurgulamışlardır. Üçüncü deformasyon bölgesinden dolayı kesim sırasında takım üzerine etkiyen kuvvetlerin modellenmesi için literatürde yer alan çalışmalarda farklı modelleme yöntemleri kullanılmıştır. Mekanistik yaklaşım en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Ranaganath vd.[3] gerçekleştirdikleri çalışmada yuvarlama yarıçapının toplam kuvvetler üzerindeki etkisi incelemek ve kesme sırasında oluşan kuvvetleri yuvarlama yarıçapını da göz önünde bulundurarak modellemek için mekanistik bir yaklaşım kullanmışlardır. Üçüncü deformasyon bölgesinden dolayı oluşan kuvvetler, deneysel olarak kalibre edilmiş kesme katsayıları yardımı ile tespit edilmiştir. Bassett ve diğerlerinin [4] yapmış oldukları çalışmada ise yuvarlama yarıçapının titanyum malzeme işlerken oluşan kuvvetler üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Farklı yuvarlama yarıçapına sahip takımlar kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve yuvarlama yarıçapının üçüncü deformasyon bölgesindeki kuvvetler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunlara ek olarak Endres vd.[5] aynı şekilde mekanistik bir yaklaşım kullanarak kesme sırasında oluşan ikinci ve üçüncü deformasyon bölgesine etkiyen kuvvetleri kalibre ettikleri kesme katsayıları yardımı ile modellemişlerdir. Bunların yanında sonlu eleman yöntemi ile geliştirilen modellere de bulunmaktadır. Iwata vd.[6] yapmış oldukları çalışmada, ikinci ve üçüncü deformasyon bölgelerinin ayrımını tespit etmek adına sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Kesim operasyonu sırasında yuvarlama yarıçapının altında kalan malzemenin davranışı ve ayrınım noktasının bulunması için literatürde iki farklı varsayım üzerine kurulan modellere rastlanmaktadır. Bu varsayımlardan ilki ayrınım noktasının yuvarlama yarıçapı üzerinde olduğunu, ikincisi ise ayrınım noktasının yuvarlama yarıçapının uzağında takım ucuna biriken talaş üzerinde olduğunu belirtmektedir. Waldorf vd.[7] çalışmalarında bu iki modelleme yöntemlerinin analitik karşılaştırmasını yapmışlardır. Üçüncü deformasyon bölgesinde ezilen malzemenin takım ile toplam temas uzunluğunun modellenmesi ve tespiti içinde farklı çalışmalar yer almaktadır. Literatürdeki [8 – 9] çalışmalarında ezilen malzemenin plastik deformasyona uğradığı ve ezilen malzemenin geri yükselmesinin takımın en alt seviyesinden fazla olamayacağı varsayılmaktadır. Bir diğer çalışmada ise [10] malzemede plastik bir geri uzama olduğu varsayılmaktadır. Literatürde ezilen malzemenin geri uzaması ile ilgili olarak en sık rastlanılan yöntem

ise ayrınım noktasının altında ezilen malzemenin tamamen bir elastik geri uzama gösterdiğini varsayan çalışmalardır [11 – 13].

Bu çalışmada ise birinci ve ikinci deformasyon bölgelerinin yanında üçüncü deformasyon bölgesinde termomekanik bir yaklaşım ile modellenmiştir. Termomekanik modelin kesme sürecinin modellenmesinde kullanılması ile iş parçası ve takımın kalibrasyonu için yapılan testler ciddi bir şekilde düşürülmüştür. Oluşturulan termomekanik model torna tezgâhi üzerinde yapılan deneyler ile doğrulanmış ve model öngörülerini ve test sonuçları arasında ufak mertebelerde hatalar tespit edilmiştir. Geliştirilen ve doğrulanan termomekanik modelin yanında, frezeleme operasyonlarının değişken talaş kalınlığı özelliğinden yararlanılarak üçüncü deformasyon bölgesinden dolayı oluşan kuvvetlerin deneysel olarak tespit edilmesi için yeni bir deney tasarımı oluşturulmuştur.

2. DİK KESME MODELİNİN TERMOMEKANİK OLARAK MODELLENMESİ

Çalışmanın bu kısmında dik kesme modeli üzerinde yer alan ve Şekil 1 üzerinde de gösterilen birinci, ikinci ve üçüncü deformasyon bölgelerinin modellenmesi sırası ile tanımlanacak, modeller ile ilgili gerekli formüller verilecektir.

2.1. Birinci Deformasyon Bölgesi

Birinci deformasyon bölgesi; Molinari vd. [14] ve Dudzunski vd. [15] tarafından formüle edilmiş, Özlü vd. tarafından [16] dik kesme modeline uyarlanmış olan Johnson – Cook modeli ile oluşturulmuş, malzeme modeli yardımı ile modellenmiştir. Birinci deformasyon bölgesinin modellenmesi sırasında yapılan varsayımlar, birinci deformasyon bölgesinin belirli bir kalınlığa sahip olduğu, bu kesme bandının öncesinde veya sonrasında herhangi bir plastik deformasyon olmadığı ve kesme yüzeyi üzerinde tek tip bir normal basınç dağılımı olduğudur. Johnson – Cook malzeme modeli (1) numaralı denklemdeki gibidir.

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[A + B \left(\frac{\gamma}{\sqrt{3}} \right)^n \right] \left[1 + \ln \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^m \right] \left[1 - (\bar{T})^v \right] \quad (1)$$

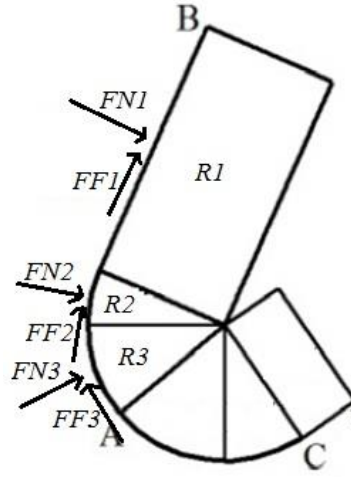
Denklemden yer alan τ kesme gerilmesi, γ kayma gerinimi, $\dot{\gamma}$ kayma gerinim hızı, $\dot{\gamma}_0$ referans kayma gerinim hızı, A , B , n , m ve v malzeme katsayıları, \bar{T} ise düşürülmüş sıcaklıktır. \bar{T} (2) numaralı denklemdeki gibi hesaplanmaktadır,

$$\bar{T} = \frac{(T - T_R)}{(T_M - T_R)} \quad (2)$$

Johnson – Cook malzeme modelinin iteratif bir şekilde çözülmesi ile birinci deformasyon bölgesinin başlangıcındaki ve bitişindeki kesme gerilmesi değerleri elde edilebilmektedir.

2.2. İkinci Deformasyon Bölgesi

İkinci deformasyon bölgesi, Zorev [17] tarafından oluşturulmuş, Özlü vd. [16] tarafından dik kesme modeline uyarlanmış “İki Bölgeli Temas” modeli kullanılarak modellenmiştir. İkinci deformasyon bölgesi modellenirken, talaş temas yüzeyi Şekil 2 gösterildiği gibi 3 farklı bölgeye ayrılmış ve her bir bölge üzerine etkiyen normal kuvvet ve sürtünme kuvveti hesaplanmıştır.



Şekil 2 – İkinci deformasyon bölgesi, etkiyen kuvvetler

Şekil 2 üzerinde gösterilen normal yöndeki (FN) kuvvetleri (3) numaralı denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

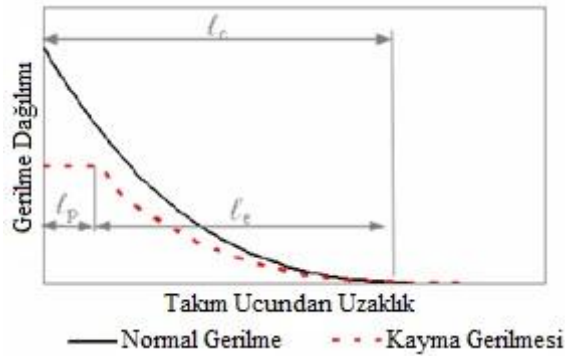
$$F_{Ni} = \int_{l_i}^{l_i+1} P_0 \left(1 - \frac{x}{l_c}\right)^\zeta dx \quad (3)$$

(3) numaralı denklemde yer alan l_i , bölgedeki temas uzunluğunu, P_0 ikinci deformasyon bölgesinin başlangıcındaki maksimum değerdeki normal basıncı, l_c ikinci deformasyon bölgesindeki toplam temas uzunluğunu ve ζ ise üstel dağılım katsayısını ifade etmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde [3, 6] ζ sabitinin 3 olarak alındığı görülmüştür. Gerçekleştirmiş olduğumuz bu çalışmada ζ değerini 3 olarak kabul etmekteyiz. Bunun yanında denklemde yer alan P_0 ve l_c değerleri sırası ile (4) ve (5) numaralı denklemler yardımı ile elde edilmektedir [16].

$$P_0 = \tau_1 \frac{h_1 (\zeta+1)}{l_c \sin \theta} \frac{\cos \lambda}{\cos(\theta + \lambda - \alpha)} \quad (4)$$

$$l_c = h_1 \frac{\zeta+2}{2} \frac{\sin(\theta + \lambda - \alpha)}{\sin \theta \cos \lambda} \quad (5)$$

Birinci deformasyon bölgesinden yüksek normal basınç ile çıkan talaş, takım ile arasında bu yüksek normal basınçtan dolayı yapışkan sürtümlü bir temasa sebebiyet vermektedir. Birinci deformasyon bölgesinden uzaklaştıkça normal basıncın düşmesiyle birlikte yapışkan sürtünme yerini kaymalı sürtünmeye bırakmaktadır. İkinci deformasyon bölgesindeki normal basıncın takımın uç kısmından uzaklaştıkça değişimi Şekil 3 üzerinde gösterilmiştir. İkinci deformasyon bölgesindeki toplam yapışkan sürtümlü temas uzunluğu (6) numaralı denklem ile ifade edilmektedir.



Şekil 3 – İkinci deformasyon bölgesi normal ve kayma gerilmesi dağılımı

$$l_p = l_c \left(1 - \left(\frac{\tau_1}{P_0 \mu} \right)^{\zeta} \right) \quad (6)$$

Temasın yapışkan sürtünmeli ve kaymalı sürtünmeli olduğu durumlarda Şekil 2 üzerinde gösterilen, ikinci deformasyon bölgesine etkiyen sürtünme kuvvetleri, her iki durum için sırası ile (7) ve (8) numaralı denklemlerdeki gibi elde edilmektedir.

$$F_{Fi \text{ (yapışkan)}} = \int_{l_i}^{l_p} \tau_1 w dx \quad (7)$$

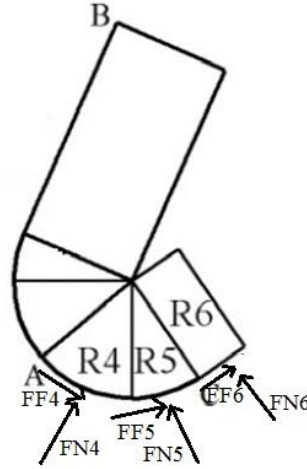
$$F_{Fi \text{ (kaymalı)}} = \int_{l_p}^{l_i+1} \mu P_0 w \left(1 - \left(\frac{x}{l_c} \right)^{\zeta} \right) dx \quad (8)$$

Denklemlerde yer alan τ_1 birinci deformasyon bölgesi çıkışındaki kayma gerilmesi, w aksel yöndeki kesme derinliği ve μ takım ile talaş arasındaki sürtünme katsayısıdır.

2.3. Üçüncü Deformasyon Bölgesi

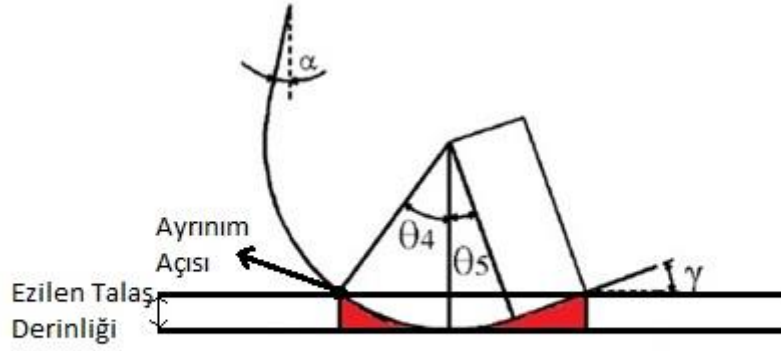
Çalışmanın önceki bölümlerinde de bahsedildiği gibi üçüncü deformasyon bölgesi takım ucu yuvarlama yarıçapından dolayı takımın boşluk yüzeyi ile iş parçasının teması sonucu oluşmaktadır. Bu temas her ne kadar ikinci deformasyon bölgesinde olduğu gibi talaş oluşumuna sebep olmuyorsa da, takımın boşluk yüzeyi tarafından ezilen malzeme olduğundan dolayı takım üzerine kuvvet etkimektedir. Üçüncü deformasyon bölgesinin termo-mekanik bir yaklaşım kullanılarak modellenmesi ile yuvarlama yarıçapından dolayı oluşan kuvvetler daha az kalibrasyon testleri kullanılarak modellenmiş olmaktadır.

Üçüncü deformasyon bölgesinde modellenirken, ikinci deformasyon bölgesinde yapıldığı gibi bölge 3 farklı bölge olarak incelenecektir. Bu bölgeler Şekil 4 üzerinde R_4 , R_5 ve R_6 olarak ifade edilmiştir.



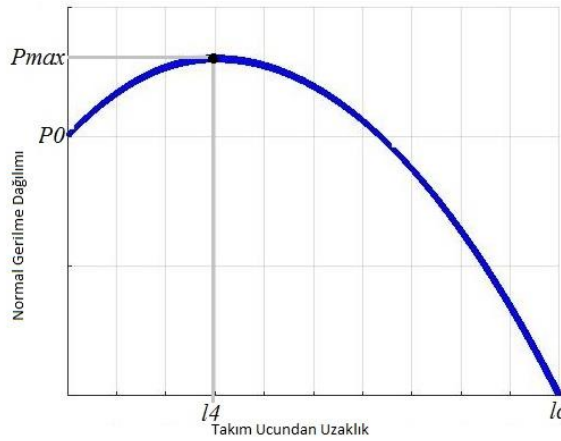
Şekil 4 – Üçüncü deformasyon bölgesi ve etkiyen kuvvetler

Üçüncü deformasyon bölgesi modellenirken bölgedeki normal basıncın değişimi, ezilme derinliği ile bağlantılı olarak değiştiği varsayılmaktadır. İkinci deformasyon bölgesinde olduğu gibi bir talaş oluşumu gözlemlenmediğinden dolayı bu bölge üzerindeki normal basınç ezilen malzeme kalınlığı ile ilişkilendirilmiştir. Üçüncü deformasyon bölgesindeki ezilen malzemenin derinliği Şekil 5 üzerinde boyalı alan ile gösterilmiştir.



Şekil 5 – Üçüncü deformasyon bölgesi ezilen malzeme derinliği

Ezilen talaş derinliğine bağlı olarak takım ucundan olan mesafe ile üçüncü deformasyon bölgesindeki normal basıncın değişimi arasındaki ilişki Şekil 5 üzerinde gösterildiği gibidir.



Şekil 6 - Üçüncü deformasyon bölgesi takım ucundan olan mesafeye bağlı normal basınç dağılımı

İkinci deformasyon bölgesi ile üçüncü deformasyon bölgesinin başlangıcındaki normal basınç (4) numaralı denklemden elde edilen P_0 değerine, l_4 noktasında yani ezilme derinliğinin maksimum olduğu noktada maksimum değerine P_{MAX} ve üçüncü deformasyon bölgesinin en uç noktasında 0'a eşittir. Normal basıncın takım ucundan olan mesafe ile değişimi parabolik bir denklem ile (9)'daki gibi ifade edilmiştir.

$$P_3(x) = a x^2 + b x + c \quad (9)$$

Denklemden yer alan a , b ve c katsayıları yukarıda bahsedilen bilinenler yardımı ile çözülmüş ve sırası ile (10), (11) ve (12)'deki gibi elde edilmiştir.

$$a = \frac{P_0}{(2 \cdot l_c \cdot l_4) - l_c^2} \quad (10)$$

$$b = -2 \cdot a \cdot l_4 \quad (11)$$

$$c = P_0 \quad (12)$$

(10), (11) ve (12) numaralı denklemlerde yer alan l_c üçüncü deformasyon bölgesindeki toplam temas uzunluğunu (m), l_4 ise Şekil 5 üzerinde θ_4 açısı ile belirtilen ve $(\theta_4 \cdot r)$ şeklinde hesaplanan bölgenin uzunluğudur.

Üçüncü deformasyon bölgesindeki yapışkan sürtümlü bölgenin uzunluğu ikinci deformasyon bölgesinde olduğu gibi (6) numaralı denklem yardımı ile hesaplanmaktadır. Bölgeye etkiyen kuvvetler (3), (7) ve (8) numaralı denklemlerdeki gibi ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

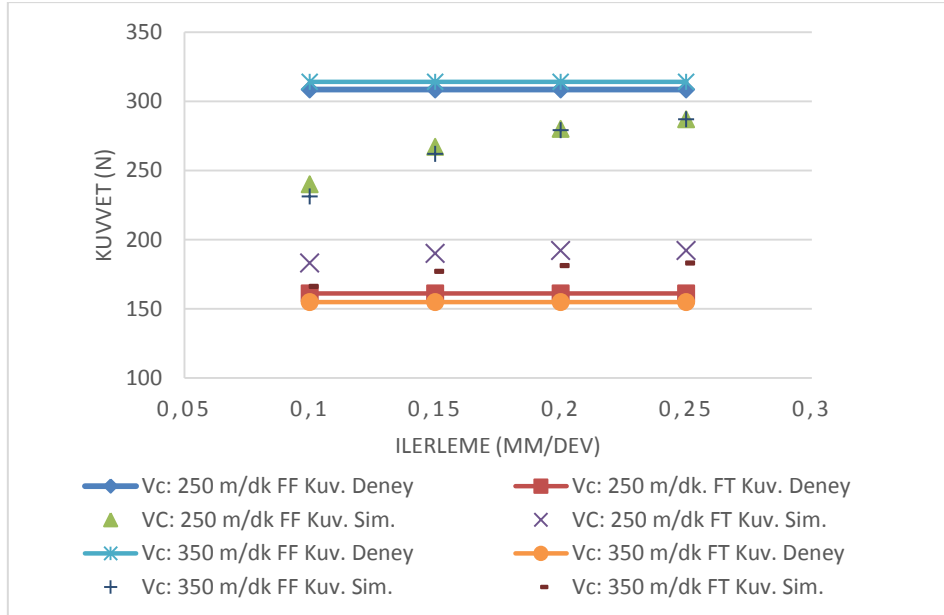
Üçüncü deformasyon bölgesindeki temas uzunluğu ezilen malzemenin tamamının geri kazanımı varsayımı kullanılarak hesaplanmıştır [11 – 13]. Bu varsayımına göre üçüncü deformasyon bölgesindeki toplam temas uzunluğu (13) numaralı denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$l_c = \emptyset * r + \gamma * r + \frac{r*(1-\cos\emptyset)}{\sin\gamma} \quad (13)$$

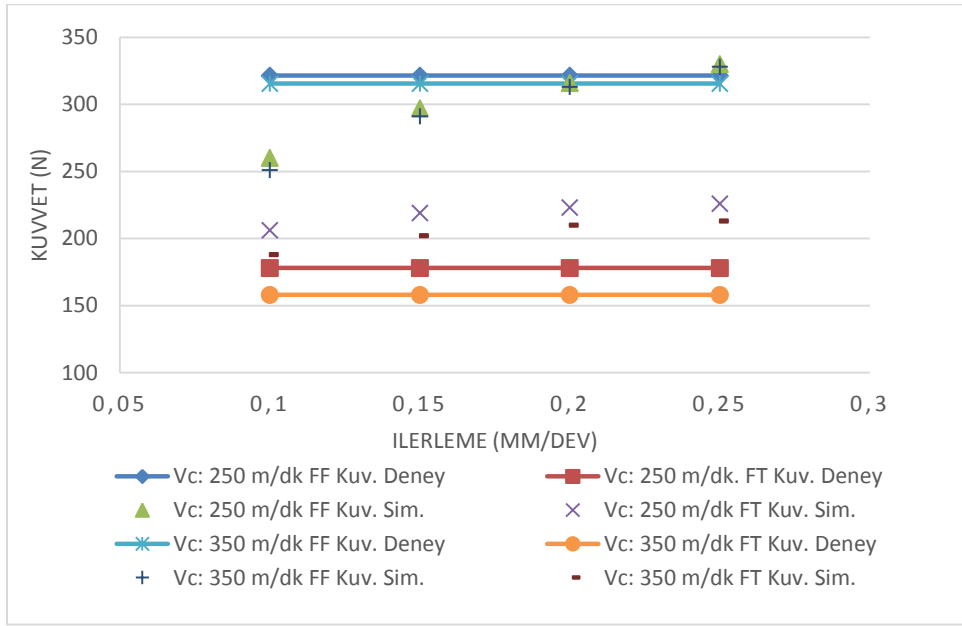
Denklemde yer alan \emptyset (rad) ikinci deformasyon bölgesini üçüncü deformasyon bölgesinden ayıran ayırınım açısı, r takım ucu yuvarlama yarıçapı (μm) ve γ (rad) boşluk açısıdır.

2.4. Üçüncü Deformasyon Bölgesi Modelinin Deneysel Olarak Doğrulanması

Çalışmanın bu bölümünde üçüncü deformasyon bölgesi için bir önceki bölümde anlatılan termomekanik bir yaklaşım ile geliştirilmiş modelin deneysel olarak doğrulanması gösterilecektir. Modelin doğrulanması için AISI 1050 çeliği üzerinde farklı kesme koşullarında testler gerçekleştirilmiş ve yapılan testlerden elde edilen üçüncü deformasyon bölgesi kuvvetleri ile model sonuçları karşılaştırılmıştır. Kesme testleri 5 derece talaş temas açısına ve 11 derece boşluk açısına sahip kaplamalı 0 derece eğim açılı takımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler 12 tanesi 57, 12 tanesi 67 μm yuvarlama yarıçaplarına sahip toplam 24 farklı takım ile gerçekleştirilmiştir. Testlerde 2 farklı kesme hızı değeri (250 ve 350 m/dk) ve 4 farklı ilerleme değerleri (0,1, 0,15, 0,2 ve 0,25 mm/dev.) kullanılmıştır. Testler dik tüp kesme testleri olarak düzenlenmiştir. Üçüncü deformasyon bölgesine gelen kesme kuvvetleri, toplam kuvvetlerden ekstrapolasyon ile 1. ve 2. bölge kuvvetleri çıkartılarak elde edilmiştir. Deneyden elde edilen ve model tarafından tahmin edilen üçüncü deformasyon bölgesi kuvvetleri 57 ve 67 μm yuvarlama yarıçapındaki takımlar için sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 7 - 57 μm yuvarlama yarıçapına sahip takım için ilerleme (FF) ve esas (FT) yönlerinde etkiyen üçüncü deformasyon bölgesi kuvvetleri (Vc: Kesme hızı)



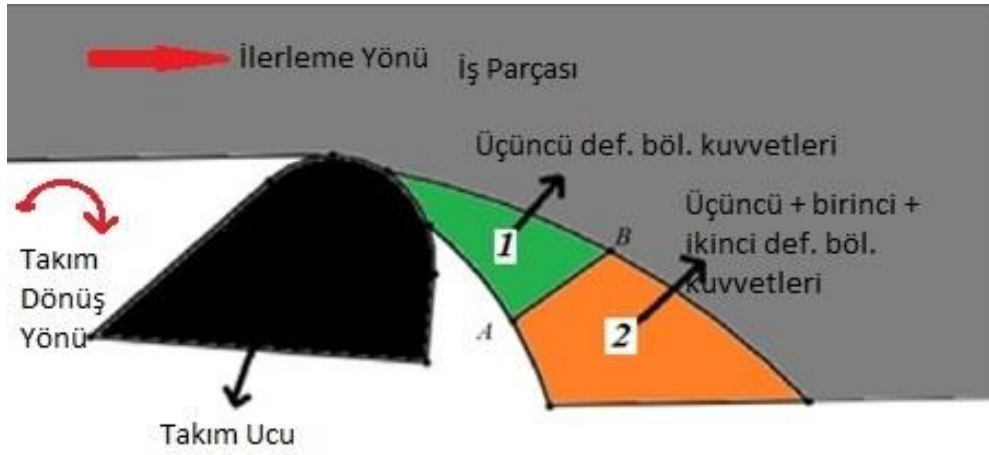
Şekil 8 - 67 µm yuvarlama yarıçapına sahip takım için ilerleme (FF) ve esas (FT) yönlerinde etkiyen üçüncü deformasyon bölgesi kuvvetleri (Vc: Kesme hızı)

3. ÜÇÜNCÜ DEFORMASYON BÖLGESİNİN DENEYSSEL OLARAK İNCELENMESİ

Üçüncü deformasyon bölgesinin deneysel olarak incelenmesinde frezeleme operasyonlarının değişken talaş kalınlığı özelliğinden yararlanılmıştır. Üçüncü deformasyon bölgesinin önemli özelliklerinden bir tanesi, daha öncede belirtildiği gibi bölgedeki ezmeden dolayı her ne kadar takım üzerinde kuvvet oluşmuş olsa da, talaş oluşumu gözlemlenmemektedir, talaş oluşumu sadece ikinci deformasyon bölgesinde gerçekleşmektedir. İkinci deformasyon bölgesini üçüncü deformasyon bölgesinden ayıran bir ayırım açısı ve buna bağlı olarak kritik bir talaş kalınlığı bulunmaktadır. Kesilmemiş talaş kalınlığının bu kritik değerden küçük olduğu durumlarda talaş oluşumu gerçekleşmez ve takım üzerine etkiyen kuvvetler talaş oluşumu gözlemlenmediğinden dolayı sadece üçüncü deformasyon bölgesinden dolayı oluşmaktadır. Frezeleme operasyonlarındaki takım ucunun anlık pozisyonuna göre değişken talaş kalınlığı formüle edilecek olursa;

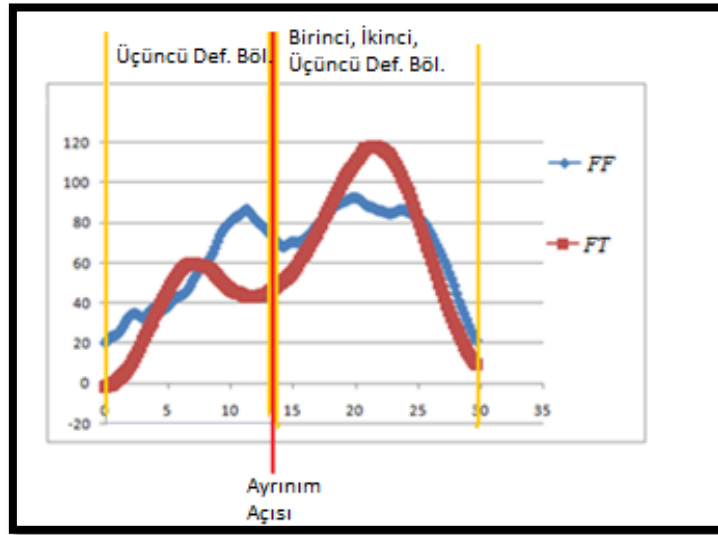
$$h(\varnothing) = c \sin \varnothing \quad (14)$$

Denklemden yer alan h anlık talaş kalınlığı, c ilerleme (mm/dev.) ve \varnothing (rad) ise takımın anlık pozisyonudur. Artan bir frezeleme operasyonu (19) numaralı denklem ışığında düşünülecek olursa, kesilmemiş talaş kalınlığı takım pozisyonu 0 derecede olduğunda 0 olacak ve takım dönüşe geçtiğinde takım açısı ve (19) numaralı denklem ile orantılı olarak artacaktır. Takımın anlık açısı 90 dereceye ulaştığında maksimum seviyeye gelecek ve daha sonra azalmaya geçecektir. Frezeleme operasyonlarının bu özelliği göz önünde bulundurulacak olursa, takım ucu belirli bir açığa (kritik talaş kalınlığına karşılık gelen) gelene kadar herhangi bir talaş oluşumu gözlemlenmesi beklenmez ve takım bu kritik açığı geçtikten sonra talaş oluşumu gerçekleşir. Bu durumda operasyon sırasında takım kritik açığa gelene kadar üzerine etkiyen kuvvetler sadece üçüncü deformasyon bölgesine, takım kritik açığı geçtikten sonra ise talaş oluşumundan dolayı üçüncü, birinci ve ikinci deformasyon bölgelerine aittir. Bu durum Şekil 9 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 9 – Talaş oluşumu için ayırım açısı

Yukarıda belirtilen kesme kuvvetindeki değişim deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen bir örnek kesme verisi Şekil 10 üzerinde olduğu gibi elde edilmiştir.



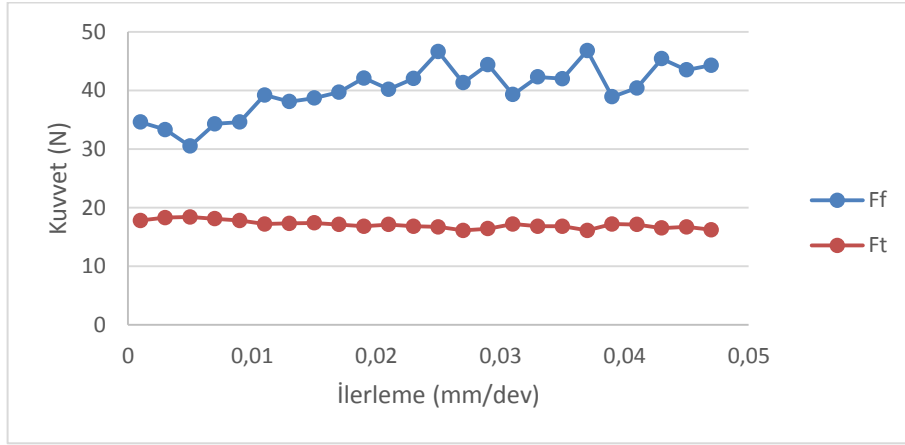
Şekil 10 – Anlık Açılı vs F_F ve F_T (N), (0.021mm/dev, 2 mm aksel kesme derinliği, 0.2 mm yanal derinlik, 5000 devir/dk.

Frezeleme operasyonlarının bu özelliği göz önünde bulundurularak saniyede 100,000 data toplanacak şekilde toplam 24 adet test gerçekleştirilmiştir. Testler Kern Evo Ultra hassasiyetli CNC tezgâhında yapılmıştır. Kuvvet sonuçları Kistler 9256C tipi dinamometre ile elde edilmiştir. Testler 6mm çapında, 5 derece helis açısına, 12 μ m yuvarlama yarıçapına sahip takımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerdeki kesme parametreleri Tablo 1 üzerinde gösterilmiştir.

Eksenel Kesme Derinliği (mm)	Yanal Kesme Derinliği (μ m)	Kesme Hızı (m/dk)	Dış Başına İlerleme(mm/devir)
1	200	95	0.001-0.003-0.005-0.007-0.009-0.011-0.013-0.015-0.017-0.019-0.021-0.023-0.025-0.027-0.029-0.031-0.033-0.035-0.037-0.039-0.041-0.043-0.045-0.047

Tablo 1 - Üçüncü deformasyon bölgesi deney matrisi

Gerçekleştirilen deney sonuçları incelendiğinde ayrınım açısı üzerindeki F_f ve F_t kuvvetleri Şekil 11 üzerindeki gibi elde edilmiştir.



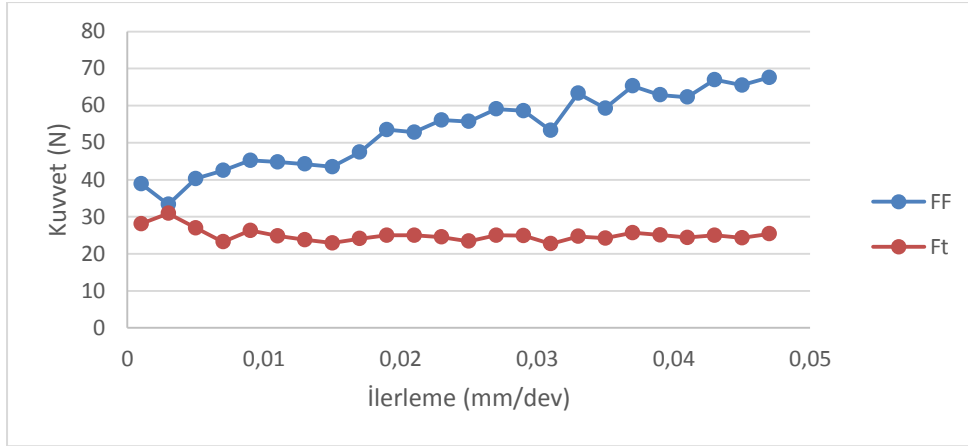
Şekil 11 – İlerleme vs ayrınım açısındaki F_f ve F_t

Kesme katsayıları farklı ilerleme değerleri ile yapılan testlerin sonucunda elde edilen ayrınım açısındaki F_F ve F_T kuvvetlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Yeni geliştirilen bu çalışma yardımı ile elde edilen kesme katsayıları Tablo 2’de gösterilmiştir.

K_f 3. bölge (N/mm)	K_t 3. bölge (N/mm)
40,1	17,1

Tablo 2 – Geliştirilen yeni yöntem ile elde edilen üçüncü deformasyon bölgesi kuvvet katsayıları

Bunun yanında Tablo 1 üzerinde gösterilen deney matrisindeki testler için elde edilen maksimum kuvvetler Şekil 12 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 12 – İlerlemeye göre maksimum kuvvet değişimi

Üçüncü deformasyon bölgesine etkiyen kuvvetler normal toplam kuvvetlerin sıfır ilerlemeye ekstrapole edilmesi sonucu ikinci bir yöntemle elde edilmiştir. Elde edilen kuvvetler yardımı ile kalibre edilen kuvvet katsayıları Tablo 3 üzerinde gösterilmiştir.

K_f 3. bölge (N/mm)	K_t 3. bölge (N/mm)
37,04	26,14

Tablo 3 – Ekstrapolasyon sonucu elde edilen üçüncü deformasyon bölgesi kuvvet katsayıları

4. SONUÇLAR

Takım ucunda yer alan yuvarlama yarıçapından dolayı oluşan üçüncü deformasyon bölgesi her ne kadar talaş oluşum sürecine katılmıyor olsa da, bölgede ezilmeden dolayı takım üzerine göz ardı edilmeyecek seviyede kuvvetler oluşmaktadır. Gerçekleştirmiş olduğumuz bu çalışmada üçüncü deformasyon bölgesinde oluşan kuvvetler öncelikli olarak termomekanik bir yaklaşım kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan termomekanik yaklaşım takım ve malzeme özelliklerini göz önünde bulundurduğundan dolayı kalibrasyon için yapılan test sayısı minimize edilmiştir. Gerçekleştirilen kalibrasyon testlerinin zaman alıcı ve maliyetli olduğu düşünülecek olursa, termomekanik yaklaşımla oluşturulan bir modelin kullanılması son derece efektif bir modelleme yöntemidir. Bunun yanında frezeleme operasyonlarındaki anlık değişken talaş kalınlığı özellik kullanılarak herhangi bir deney verisi yardımı ile üçüncü deformasyon bölgesi kuvvetleri elde edilmektedir. Bu deneysel yöntem yardımı ile aynı zamanda, kritik talaş kalınlığı ve ikinci deformasyon bölgesini üçüncü deformasyon bölgesinden ayıran ayrınım açısı deneysel olarak tespit edilebilmektedir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Albrecht, P., 1960. "New developments in the metal cutting process, Part 1. The ploughing process in metal cutting". ASME Journal of Engineering for Industry, (1960), 348 – 357.
- [2] Masuko, M., 1953. "Fundamental research on metal cutting, A new analysis of cutting forces", Transactions of JSME, 19, (1953), 32 – 39.
- [3] Ranaganath, S., Campbell, A. B., Gorkiewicz, D.W. 2006. "A model to calibrate and predict forces in machining with honed cutting tools or inserts", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, (2007), 820-840
- [4] Bassett, E., Köhler, J., Denkena, B. 2012. "On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI 1045 with coated WC-Co inserts", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5, (2012), 108-126.
- [5] Endres, W. J., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., "A dual-mechanism approach to the prediction of machining forces", ASME Journal of Engineering for Industry, 117, (1995), 526 – 541.
- [6] Iwata, K., Osakada, K., Terasaka, Y., 1984, "Process modeling of orthogonal cutting by the rigid plastic finite element method", ASME Journal of Engineering Materials and Technoloh, 106, 132 – 138.
- [7] Waldorf, D. J., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., "An evaluation of ploughing models for orthogonal machining", Journal of Manufacturing Sciences and Engineering, 121, 550 – 558.
- [8] Roth, R. N., Oxley, P. L. B., 1972 "Slip – line field analysis for orthogonal machining based upon experimental flow fields", Journal of Mechanical Engineering Sciences, 14, 85 – 97.
- [9] Heginbotham, W. B., Gogia, S. L., 1961, "Metal cutting and built up nose", Proc. Inst. Mechanical Engineers, 175, 223 – 233.
- [10] Moneim, A. M., Scrutton, R. F., 1973, "Post Machining plastic recovery and the law of abresive wear", Wear, 24, 1 – 13.
- [11] Elanayar, V. T., Shin, Y. C., 1996, "Modeling of tool forces for worn tools: Flank wear effects", Journal of Manufacuting and Sciences, 118, 359 – 366.
- [12] Wu. D. W., 1989, "Anew approach of formulation the transfer function for dynamic cutting processes", ASME Journal of Engineering for Industry, 111, 37 – 47.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [13] Sisson, T. R., Kegg, R. L., 1969, "An explanation of low-speed chatter effects", ASME Journal of Engineering for Industry, 951 – 958.
- [14] Molinari, A., Dudzinski, D., 1992,"Stationary shear bands in high speed machining", Comptes Rendus Acad. Sciences, 315, Serie2, 399-405
- [15] Dudzinski, D., Molinari, A., 1997, "A modeling of cutting cutting for viskoplastic materials", International Journal of Mech. Sci. 39/4: 369-389
- [16] Ozlu, E., Budak, E., Molinari, A., 2007, "Thermomechanical modeling of orthogonal cutting including the effect of stick-slide regions on the rake face", 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Calabria, Italy, August

YÜKSEK HIZLI İŞ MİLLERİNİN TERMAL MODELLEMESİ

Turgut Köksal Yalcın^a, M.Sedat Erberdi^b, Emre Özlü^c, Erhan Budak^a

a. Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye tkyalcin@sabanciuniv.edu, ebudak@sabanciuniv.edu

b. Spinner CNC Takım Tezgahları, İstanbul Endüstri ve Ticaret Serbest Bölgesi Aydınlı Serbest Bölge Mahallesi, Mod-1 Caddesi, Tuzla, İstanbul, Turkey sedaterberdi@spinner.com.tr

c. Maksima İmalat ARGE Dan. Ltd.Şti., GOSB Teknopark, Gebze, Kocaeli emre@maxima.com.tr

Özet

5 eksenli CNC takım tezgahlarının pozisyonlama hassasiyetini etkileyen faktörlerin başında iş mili şaftı ve kolonunda sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen uzamalar bulunmaktadır. Bu uzamaların kesme operasyonu öncesinde doğru olarak tahmin edilebilmesi ve önlenmesi için hem ısı kaynaklarının hem de ısı transferlerinin doğru bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, iş milinde bulunan rulmanlardan kaynaklanan ısı miktarı analitik olarak hesaplanarak sonlu elemanlar analizi yardımıyla iş mili şaft ve kolon uzamaları hesaplanmıştır. Analizler sıcaklık ve termal deformasyon ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak iş mili termal modeli doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Termal Deformasyon, Rulman Isı Oluşumu, Sonlu Elemanlar Analizi

THERMAL MODELLING OF HIGH SPEED SPINDLES

Abstract

Positioning accuracy of 5-axis CNC machine tools is directly effected from the thermal elongations take place in both spindle shaft and spindle column. Accurate prediction of these thermal deformations require proper heat models for the main heat sources together with a robust heat transfer model. In this study, heat generated by the machine tool spindle is analytically calculated and used as an input to finite element model of the spindle in order to calculate thermal deformations of the spindle shaft and column. Results are compared with temperature and displacement measurements for the validation of the spindle thermal model.

Keywords: Thermal Deformation, Bearing Heat Generation, Finite Element Analysis

1. GİRİŞ

Pozisyonlama hassasiyeti, günümüz parça toleransları göz önüne alındığında CNC takım tezgahlarının en önemli özelliklerinin başında gelmektedir. Takım tezgahlarının parça işleme ve pozisyonlama hassasiyetine etki eden başlıca önemli faktörler kesme işlemi sırasında meydana gelen kesme kuvvetleri, kesme işlemi ve/ya tezgah çalışma süresince açığa çıkan ve doğrusal olmayan sıcaklıklar ile takım tezgahının üretimi/montajı aşamalarında meydana gelen fiziksel hatalardır. Termal hatalar, takım tezgahlarının toplam hatalarının %70'inden sorumlu olmaları sebebiyle bu faktörler arasında öne çıkmaktadır.

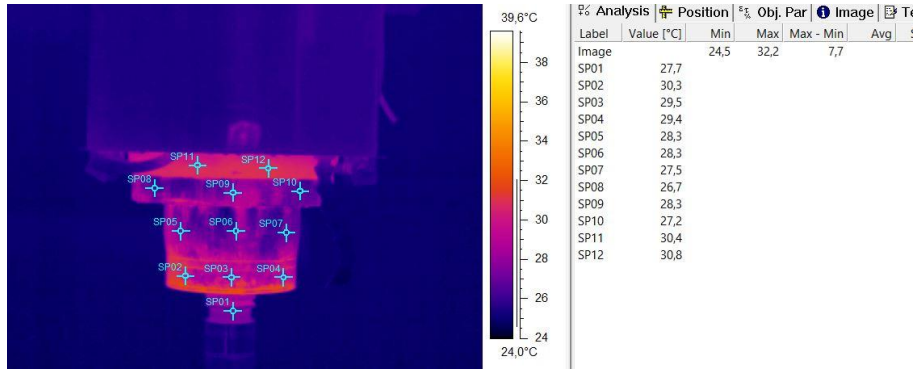
Termal hataların tahmin edilip önlenmesi amacıyla birçok farklı modelleme ve kompensasyon teknikleri denenmiş ve denenmektedir. İş mili termal hataların analitik yöntemler ile tahmin edilmesi yönündeki çalışmaların ilki Palmgren [1] tarafından geliştirilen ve günümüzde hala yaygın olarak kullanılan yuvarlanma direncine bağlı rulman ısı hesabı yöntemidir. Bu yöntem kullanılarak hesaplanan ısılar için geliştirilen kompleks ısı transferi modeli ise Stein ve Tu'ya [2] aittir. Rulmanlar haricindeki ısı kaynaklarının da hesaplandığı ve güç akışı (power flow) yöntemi kullanılarak iş mili ısı transferinin gerçekleştirildiği ilk kapsamlı iş mili termal analizi de Bossmanns ve Tu [3,4] tarafından gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmaları ise iş mili termomekanik modelleri ve daha kompleks ısı transferi sistemleri izlemiştir. Analitik yöntemler haricinde iş mili termal analizinde kullanılan diğer metodlar ise genel olarak lineer regresyon [5-7], yapay sinir ağları [8] ve grisisistem teorisine [9] dayanmaktadır. Bu çalışmaların ortak özellikleri ise çok miktarda deneysel veri gerektirmeleri ve tahmin performanslarının tamamen deneysel veri kümelerine bağlı olmasıdır. Öte yandan termal deformasyonların modellenmesi yönündeki çalışmaların neredeyse tamamı sonlu elemanlar analizini kullanmaktadır[10-14]. Bu modellerin performansı ise iş mili ünitesinde bulunan her türlü ısı kaynağının ve soğutucu bileşenlerinin ürettikleri/tükettikleri ısı miktarlarının hassas olarak hesaplanmasına bağlıdır. Ayrıca karmaşık geometriler ve zamana bağlı analizler uzun simülasyon zamanlarına ihtiyaç duymaktadırlar. İş mili üzerinde bulunan farklı ısı kaynakları temel olarak iş mili motoru, iş mili şaftına ait bilyalı yataklar ve kesme sonucu açığa çıkan ısılardır. Malzeme özellikleri sonlu elemanlar analizi sonuçlarına doğrudan etki etmektedir.

Yapılan bu çalışmada iş mili ünitesindeki en önemli ısı kaynağı olan ve iş mili şaftını ile iş mili kovani arasındaki bağlantı elemanı olarak kullanılan açılmalı kontaklı bilyalı yatakların (rulman) ürettikleri ısı miktarı analitik olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı miktarları, iş mili ünitesine ait katı modeller yardımı ile sonlu elemanlar analizinde kullanılarak iş mili termal modeli oluşturulmuştur. İş mili soğutma sistemi de sonlu elemanlar analizi yardımı ile hesaplamalara dahil edilerek iş milinde oluşan termal deformasyonlar hesaplanmıştır. Termal modelin doğrulanması amacıyla modele ait simülasyon sonuçları yapılan deneysel test verileri ile karşılaştırılmıştır.

2. SICAKLIK VE TERMAL DEFORMASYON ÖLÇÜMLERİ

2.1 Sıcaklık Ölçümleri

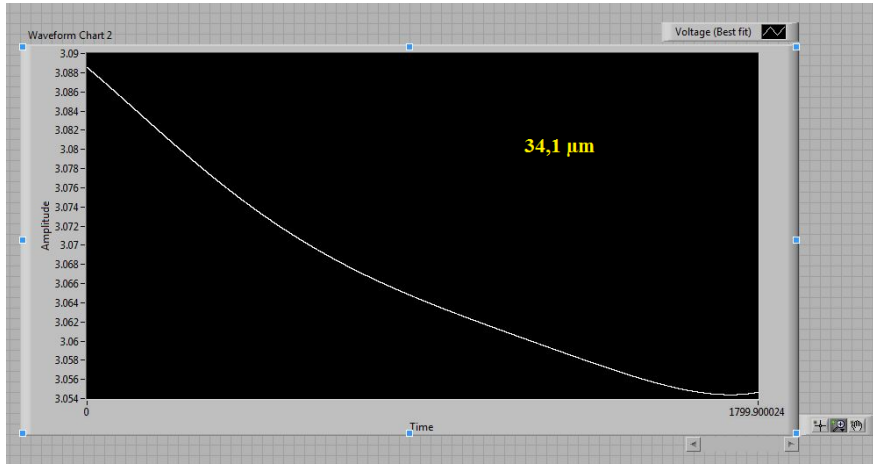
Takım tezgahlarının termal deformasyonlar sonucu oluşan pozisyonlama hatalarının ölçümü, bu hataların önlenmesi yönündeki ilk adımdır. İş mili ve takım tezgahı üzerindeki belirli noktaların ve de çevresel sıcaklıkların ölçümü, ısı modellerinin doğrulanabilmesi açısından zorunludur. Sıcaklık ölçümleri için bu çalışmada kurulum kolaylığı, geniş ölçüm alanı ve hassas ölçümleri sebebiyle FLIR A325model infrared kamera kullanılmıştır. İnfrared kameralarda yapılması gereken kalibrasyon işlemi ise J-tip termokupl kullanılarak bir kereye mahsus olmak üzere yapılmış ve hesaplanan emisivite değeri diğer tüm ölçümlerde kullanılmıştır. İş mili üzerinde bulunan birçok noktadan alınan sıcaklık verileri ve deney süresince toplanan ölçüm fotoğrafları sayesinde iş mili üzerindeki en çok sıcaklık değişimine maruz kalan bölgeler belirlenmiştir. Şekil 13'de gösterilen 15K dev/dak testi sıcaklık ölçümüne ait örnekte de görüleceği üzere sıcaklık artışının en fazla yaşandığı bölge iş mili kovani üzerinde rulman paketlerinin bulunduğu bölgede en düşük 24,5°C en yüksek 32,2°C olarak ölçülmüştür. Sıcaklık testlerinde farklı iş mili devirleri kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan iş mili devirleri ISO 230-3'te [15] belirtilen maksimum iş mili devrinin %25, %50, %75 ve %100'ü olarak seçilmiştir. Test süresi 30 dakika olarak belirlenmiş ve bu sürecin sonunda iş milinin bir sonraki teste kadar soğuyarak ortam sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Çalışmada kullanılan 5 eksenli CNC takım tezgahında maks. 28kW ve 20,000 devir/dak'lık bir iş mili mevcuttur.



Şekil 13: Sıcaklık Ölçümü

2.2 Termal Deformasyon Ölçümleri

Sıcaklık artışına bağlı olarak meydana gelen termal deformasyonların 3 boyutlu ölçümünde 5 adet Micro-Epsilon markalı Eddy Current deplasman sensörlerinin monte edildiği ölçüm aparatları kullanılmıştır. Bu aparatlar sayesinde takım ve ölçüm malafası üzerinde oluşan pozisyon değişimleri veri toplama kartları ile bilgisayara aktarıldıktan sonra LabVIEW yazılımında oluşturulan arayüz sayesinde gerçek zamanlı olarak görülebilmekte ve kaydedilmektedir. Yukarıda sıcaklık ölçümü verilen 15K dev/dak testine ait 34,1 µm'lik iş mili şaftı termal deformasyon ölçüm sonucu Şekil 2'de gösterilmiştir. Ölçüm ekipmanları ve deney düzeneği Şekil 3'te görülebilir.



Şekil 2: Termal Deformasyon Ölçümü

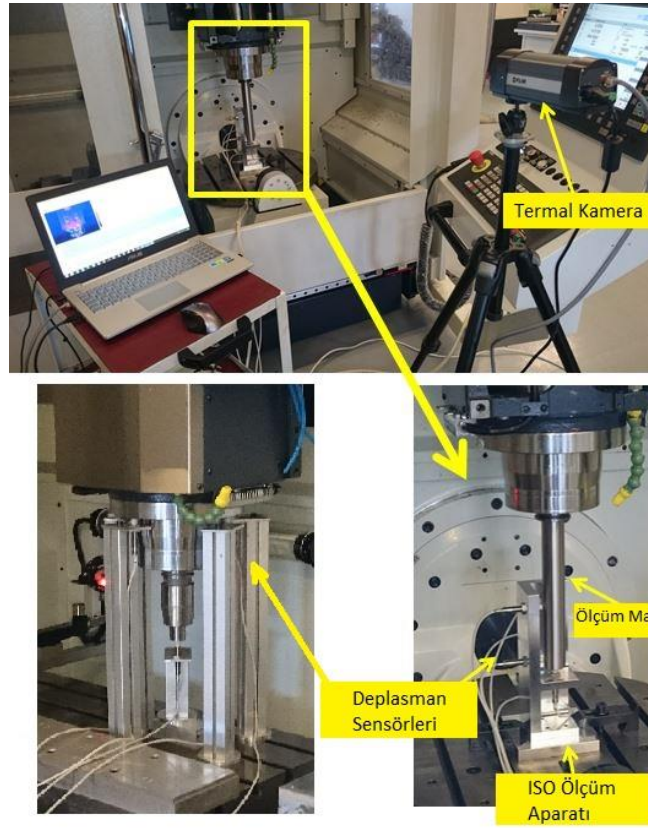
3. İŞ MİLİ RULMANLARINDA OLUŞAN ISININ HESAPLANMASI

Yüksek hızlı iş millerinde operasyon esnasında meydana gelen sıcaklık artışının başlıca nedenleri temel olarak

- Ortam sıcaklığındaki değişimler,
- İş mili rulmanlarında sürtünmeye bağlı olarak oluşan ısıdır.

Kesme operasyonları sırasında açığa çıkan ısının yukarıdaki nedenler arasında sayılmamasının sebebi açığa çıkan ısının neredeyse tamamının soğutma sıvısı kullanımı sonucu yok edilmesidir. Bu durum göz önüne alındığında iş mili rulmanlarında oluşan ısının iş mili termal deformasyonun temel sebebi olduğu görülmektedir. Harris [16] rulmanlarda oluşan ısıyı H_f (W), rulman bilyaları ve rulman yatakları arasındaki kaymayı ihmal edip sadece iş mili devri n (dev/dak) ve sürtünme torkundan M (Nmm) kaynaklı güç kaybını hesaplayarak şu formülle ifade etmiştir:

$$H_f = (1.047 \times 10^{-4})nM \quad (1)$$



Şekil 3: Test Düzenegi

Toplam sürtünme torkunu, M , oluşturan bileşenler ise rulmandaki yağlama sistemi sonucu oluşan akışkan sürtünme torku, M_1 ve rulman üzerindeki yükler sonucu oluşan kontak kuvvetlerinin oluşturduğu sürtünme torku, M_2 'dir [16].

$$M = M_1 + M_2 \quad (2)$$

3.1 Akışkan Sürtünme Torku

Rulmanlarda bulunan yağlama sistemleri f_o , kullanılan yağın kinematik viskozitesi v_o (mm²/s), iş mili devri n (dev/dak) ve rulman ortalama çapı d_m (mm) kullanılarak akışkan sürtünme torkunu hesaplamak için Palmgren'in [1] deneysel olarak geliştirdiği ancak hala yaygın olarak kullanılan şu formüle başvurulmuştur:

$$M_1 = f_o(v_o n)^{\frac{2}{3}} d_m^3 10^{-7} \quad \text{if } v_o n \geq 2000 \quad (3)$$

$$M_1 = 160 \times 10^{-7} f_o d_m^3 \quad \text{if } v_o n \leq 2000$$

Açısal kontaklı bilyalı yataklar için gres yağlama sistemi kullanıldığı takdirde f_o değeri 2 olarak kabul edilmektedir. Rulman soğutmasında kullanılan yağların teknik özellikleri üretici firmalar tarafından ilgili rulman kataloglarında belirtilmektedir. Ortalama rulman çapı ise rulman iç ve dış bileziklerinin çaplarının ortalaması alınarak hesaplanmaktadır.

3.2 Kuvvetler Sonucu Oluşan Sürtünme Torku

Rulmanlar üzerine etki eden kuvvetler sonucu oluşan sürtünme torku formülü şu şekildedir [16]:

$$M_2 = f_1 F_\beta d_m \quad (4)$$

Formülde f_1 ile gösterilen katsayı rulman tipi ve dizaynına bağlı olarak değişebilmekte ve rulman kataloglarında verilen aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilmektedir [17]:

$$f_1 = z(P_o/C_o)^y \quad (5)$$

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Formüldeki z ve y değerleri farklı rulman çeşitleri için ISO tarafından tanımlanmış değerlerdir. Statik eşdeğer yük P_0 ile gösterilirken C_0 ise temel statik yük sınıfını göstermektedir. C_0 değeri ilgili rulman kataloglarından bulunabilir, P_0 değerini hesaplamak için ise yine ilgili rulman kataloglarınca verilen şu formül kullanılmaktadır [17]:

$$P_0 = (0.5)F_r + (0.46)F_e \quad (6)$$

Formülde dinamik eşdeğer kuvvet F_β (N) eksenel (F_e) ve radyal kuvvetlerin (F_r) bileşkesi olarak şu şekilde hesaplanır [16]:

$$F_\beta = F_e - (0.1)F_r \quad (7)$$

Dikey konumlandırılmış iş mili shaftlarında kullanılan açısız kontaklı rulmanlarda radyal yük kesme operasyonu yapılmadığı sürece sıfır olarak kabul edilebilir. Rulmanlar üzerinde asıl etkili olan yük eksenel yükür. Rulmanlar üzerindeki eksenel yük ön yüklemeye ve shaft ağırlığından kaynaklanan yer çekimi kuvvetinin bileşkesi olarak hesaplanır. Farklı önyüklemelerin ısı oluşumuna etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir.

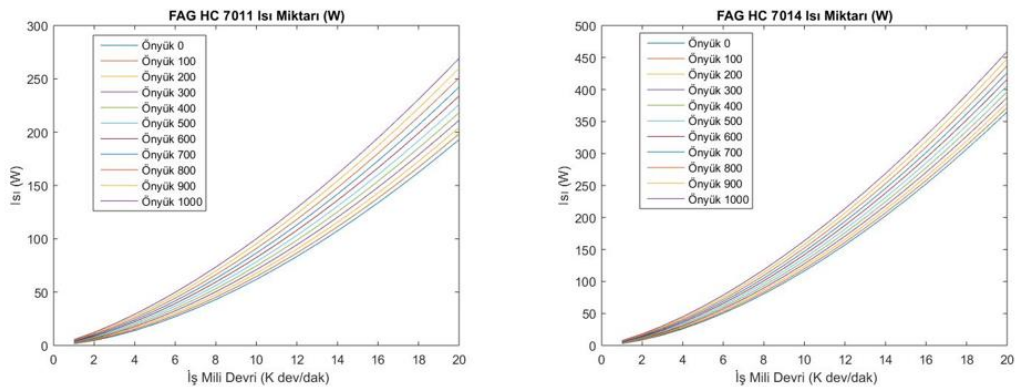
Sonuç olarak rulmanlarda oluşan ısının genel formülü şu şekildedir [16]:

$$H_f = (1.047 \times 10^{-4})n(f_o(v_o n))^{\frac{2}{3}}d_m^3 10^{-7} + z \left(\frac{P_0}{C_0}\right)^y (F_e - (0.1)F_r)d_m \quad (8)$$

	HC7011	HC7014
İç Çap	55 mm	70 mm
Dış Çap	90 mm	110 mm
Yükseklik	18 mm	20 mm
Kontak Açısı	15 °	15 °
Temel Statik Yük (Co)	12.2 kN	18.3 kN
Önyüklemeye	73 N	101 N
Yağlama	Gres	Gres
Kinematik Viskosite	2 mm ² /s	2 mm ² /s

Tablo 1: Rulman Bilgileri

Bu çalışmada incelenen 5 eksenli CNC takım tezgahı iş milinde iki farklı paket halinde toplamda 4 adet açısız kontaklı rulman kullanılmıştır. Kullanılan rulmanlar FAG HC7014 ve FAG HC7011 serisi 15 derecelik kontak açısına sahip, seramik bilyalı rulmanlardır. Rulmanların detaylı bilgileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Yukarıda verilen formüller kullanılarak tüm iş mili rulmanlarında oluşan ısı miktarları MATLAB yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Rulmanlara ait ısı miktarları farklı iş mili devirleri ve farklı önyüklemeye değerleri için hesaplanarak Şekil 4'te gösterilmiştir



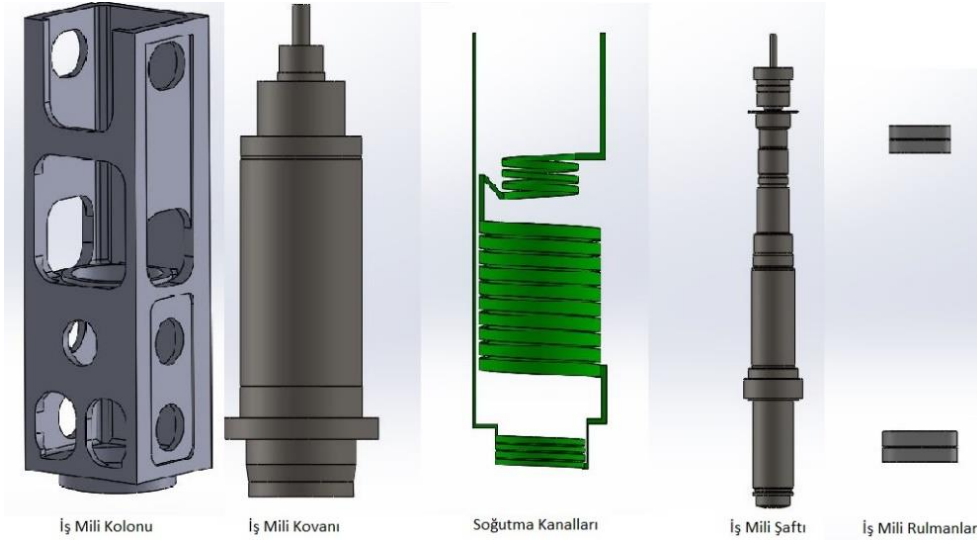
Şekil 4: Rulman Isı Oluşumu

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ MODELİ

İş mili rulmanlarında sürtünmeye bağlı olarak açığa çıkan ısı enerjisi, rulmanların doğrudan temas halinde olduğu iş mili kolonu ve şaftı üzerinde önemli sıcaklık artışlarına sebep olmaktadır. Bu sıcaklık artışına bağlı olarak hem iş mili kolonu hem de iş mili şaftında termal genleşme kaynaklı uzamalar meydana gelmektedir. Bu uzamaların hesaplanabilmesi için ilk olarak iş mili ünitesinde bulunan farklı çaplardaki rulman paketlerinin açığa çıkardığı ısı miktarı analitik olarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan ısı miktarları sonucunda meydana gelen ısı transferi ve termal uzamalar ise sonlu elemanlar analizi yardımı ile elde edilmektedir. Isı transferi ve boyutsal değişimler için iş mili ünitesine ait katı modeller ANSYS Workbench 15.0 yazılımı kullanılarak modellenmiştir. İş mili içerisinde bulunan soğutma sistemi akışkanlar dinamiği hesaplamalarında kullanılan ANSYS CFX modülü ile modellenmiştir. Termal sınır koşulları da yine CFX modülünde tanımlanmıştır. Isı transferleri tamamlandıktan sonra sistemin toplam şekil değişimi hesaplamaları için ise statik yapısal analiz modülü sisteme eklenmiştir. Kullanılan modüllerde malzeme özellikleri, sistem geometrisi ve ağ yapıları ortaktır. Sonlu elemanlar analizinde kullanılan iş mili bileşenleri Şekil 5'te gösterilmiştir.

4.1 Soğutma Sistemi Modeli

İş mili içerisinde bulunan soğutma sistemine ait boyutsal özellikler üretici firma tarafından sağlanmış ve bu özelliklere bağlı olarak soğutma sistemi kanalları Solidworks yazılımı ile akışkan bölgeleri belirlenmiştir. Soğutma sisteminin giriş ve çıkış noktaları Şekil 4'teki gibi işaretlenerek, soğutma sıvısına 23°C'lik giriş sıcaklığı ve 4 m/s⁻¹ 'lik giriş hızı değerleri verilmiştir. Ortam sıcaklığı ve başlangıçtaki katı yüzey sıcaklıkları doğrulama testleri sırasında ölçülen ortam sıcaklığı değeri olan 25°C olarak belirlenmiştir. Katı-katı ve katı-



Şekil 5: İş Mili Bileşenleri

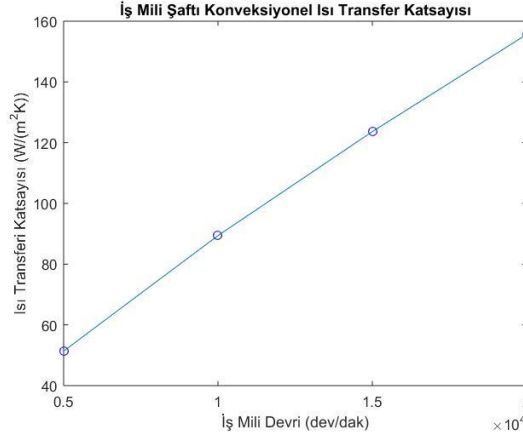
sıvı arayüzler arasında ısı transferine izin verilmiştir. Katı modelde bulunan bütün elemanların hava ile teması konveksiyonel soğuma olarak tanımlanmış, iş mili şaftı haricindeki bütün yüzeyler için literatürden alınan konveksiyonel ısı transferi katsayısı 10 W/m²K olarak belirlenmiştir [4]. İş mili şaftı yüzeyi için gereken konveksiyonel ısı transferi katsayısı ise iş mili devirine bağlı olarak değişmektedir. Değişken ısı transferi katsayıları Bossmanns ve Tu [4] tarafından kullanılan yöntem ile iş mili şaftı geometrisi ve tam türbülanslı akış göz önünde bulundurularak hesaplanmış Şekil 'de gösterilmiştir.

Akışkanlar analizi yapılan soğutma sistemi kanalları boyunca soğutma sıvısı sıcaklığındaki değişime ait örnekler Şekil'de gösterilmiştir. İş mili ünitesine giren soğutma sıvısı ilk olarak üst rulman paketleri etrafından geçip, iş mili motoruna ulaşmakta daha sonra ise alt rulman paketlerinin etrafında dolaşmaktadır. Soğutma sistemi

geometrisine bağlı olarak soğutma sıvısı kanallar boyunca ilerlerken sıcaklığı artmaktadır ve bu sebeple giriş noktasına yakın olan üst rulman paketleri ile uzak olan alt rulman paketleri etrafındaki soğutma karakteristikleri farklılık göstermektedir.

4.2 Statik Analiz Modeli

İş mili soğutma sisteminin akışkanlar analizi sonucunda oluşan sıcaklıklar direkt olarak statik analiz modülüne bağlanmıştır. Statik analiz modülüne aktarılan sıcaklıklara ait örnek Şekil 8(a)'da gösterilmiştir. İş mili bileşenleri arasındaki en fazla sıcaklık değişimi iş mili

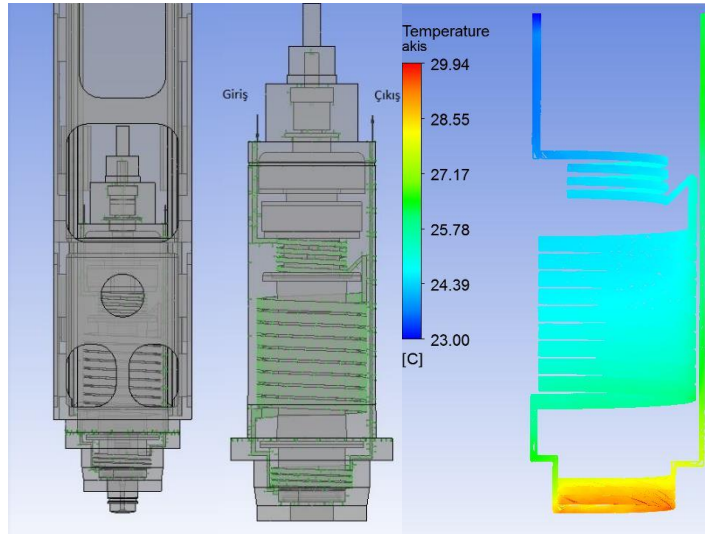


Şekil 6: İş Mili Şaftı Konveksiyonel Isı Transferi Katsayıları

şaftında gözlenmektedir. Bu durumun temel sebebi ise iş mili şaftının ana ısı kaynağı olan rulman paketlerine doğrudan bağlı olması ve şaft yüzey alanı ile birlikte şaftın toplam hacminin diğer elemanlara göre çok daha küçük olmasıdır. İş mili şaftı üzerindeki en sıcak bölge alt rulman paketlerinin şafta bağlandığı noktadır. Alt rulman paketleri üst rulman paketlerine göre daha büyük boyutlara sahip olmaları ve dolayısı ile üst rulmanlara göre daha fazla miktarda ısı açığa çıkarmaları sonucu iş mili şaftı üzerinde daha büyük sıcaklık farkına sebep olmaktadır. Bu duruma soğutma sıvısı girişine çok yakın konumlandırılmış üst rulman paketlerinin daha iyi soğumaları da etki etmektedir. Geometrik konum olarak alt rulman paketleri soğutma kanallarının sonunda bulunmaktadır ve bu sebeple bütün iş milini dolaşarak ısınan soğutma sıvısı ile temas halinde olduğundan iş milinin diğer bölgeleri kadar iyi soğutulamamaktadır. Yapısal analiz modülünde iş mili modeline eklenen yeni sınır koşulları, bütün bileşenlere etkiyen yer çekimi kuvveti ve iş mili kolonunu takım tezgahının geri kalan kısmına bağlayan kızaklar üzerindeki sabit desteklerdir. Yapısal analiz modülünün sonucu olarak hesaplanan iş mili elemanlarının termal genişleme miktarlarını gösteren örnek Şekil 8(b)'de verilmiştir. Akışkanlar analizi modülü sonucunda görülen sıcaklık değişimleri doğrultusunda en fazla uzama beklenildiği üzere iş mili şaftında, en az uzama ise iş mili kolonu tepesinde görülmüştür.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

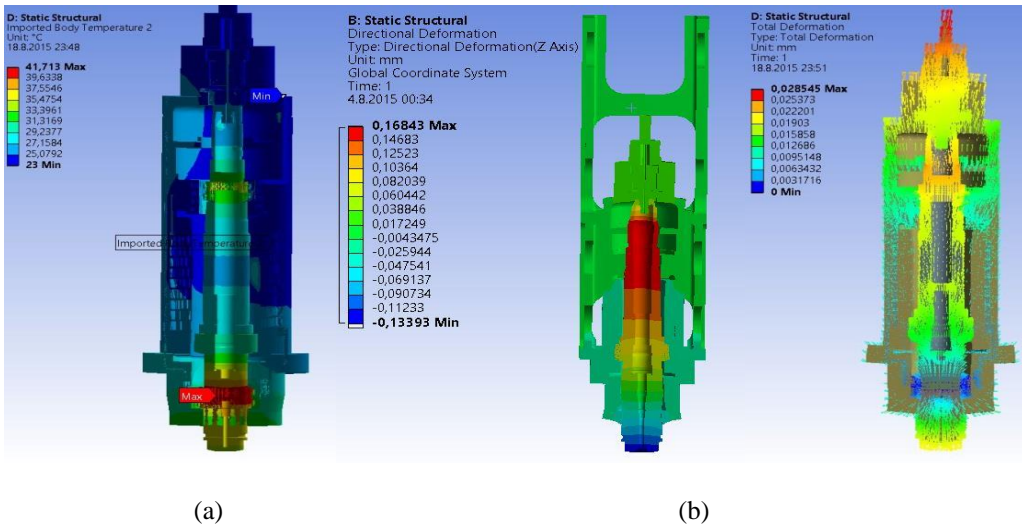
Bu çalışmada incelenen iş mili ünitesine ait testlerin ilk aşaması ISO 230-6' da belirtilen değişken iş mili devri testleridir. Bu test kapsamında kullanılan iş mili devirleri Şekil 9'da verilmiştir. On beşer dakikadan oluşan on sekiz periyot boyunca iş miline bağlı ölçüm malafasında meydana gelen boyutsal değişimler Şekil 10 Şekil 'da, test boyunca iş mili sıcaklığındaki değişimler ise Şekil 11'de gösterilmiştir. Test sonuçlarından da görüleceği



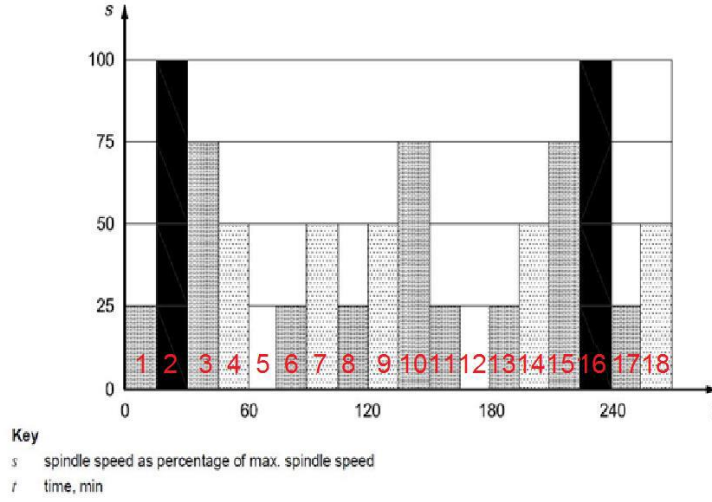
Şekil 7: Soğutma Sistemi

üzere iş mili shaftında 10°C'lik sıcaklık değişimine karşılık 73 µm'yi bulan termal kaynaklı uzamalar ölçülmüştür. Yüksek hızlı 5 eksen CNC takım tezgahlarında işlenen parçaların boyutsal toleransları göz alındığında Z eksenindeki 73µm'lik uzamanın bu tolerans değerleri içinde parça üretimini zorlaştırması kaçınılmazdır.

Önceki bölümlerde anlatılan yöntemler kullanılarak oluşturulan iş mili termal modeline ait simülasyon sonuçları ISO testlerine oranla daha sade olan ve ikinci bölümde açıklanan sabit iş mili devirlerinde yapılan testlere ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sıcaklık ve termal deformasyon miktarlarının karşılaştırılması olmak üzere ikiye ayrılan sonuçlara ait grafikler 12 ve Şekil 13'te verilmiştir. Termal uzama karşılaştırmalarında simülasyon ve test sonuçları birbirine çok daha yakın iken sıcaklık karşılaştırmalarında özellikle yüksek iş mili devirleri kullanıldığında sonlu elemanlar modelinin test sonuçlarına göre daha yüksek sıcaklık değerleri hesapladığı görülmüştür. Bu durumun oluşmasındaki temel sebep ise simülasyon süresinin minimize edilmesi için katı modelde yapılan sadeleştirmelerdir. İş mili katı modeli ve diğer birçok elektriksel bileşenler sadeleştirilerek, iş mili yekpare çelik olarak modellenmiş ve bu durum simülasyon ve test sıcaklıkları arasında farklılıklara yol açmıştır. Simülasyon süresindeki iyileştirmeler ve sıcaklık sonuçları arasındaki farklar karşılaştırıldığında, sadeleştirmelerin etkisinin kabul edilebilir derecede olduğu gözlenmiştir. Bu grafiklere bakılarak sonlu elemanlar modelinin her iki anlamda da tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür.



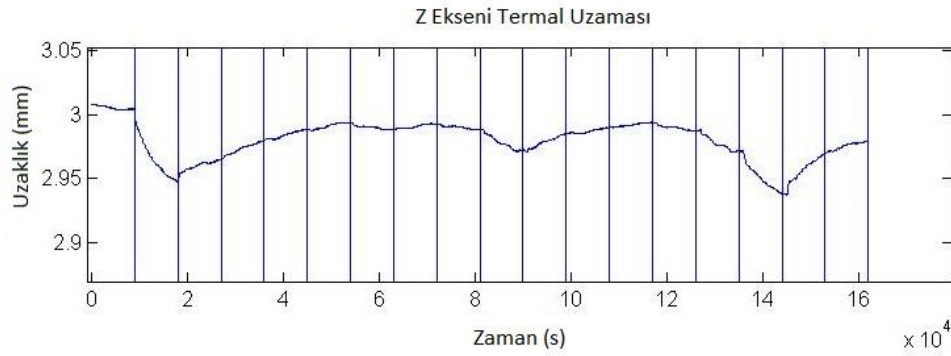
Şekil 8: (a) CFX Modülünden aktarılan sıcaklık sonuçları; (b) Hesaplanan termal deformasyon sonuçları



Şekil 9: ISO 230-6 Değişken İş Mili Devirleri

6. SONUÇLAR

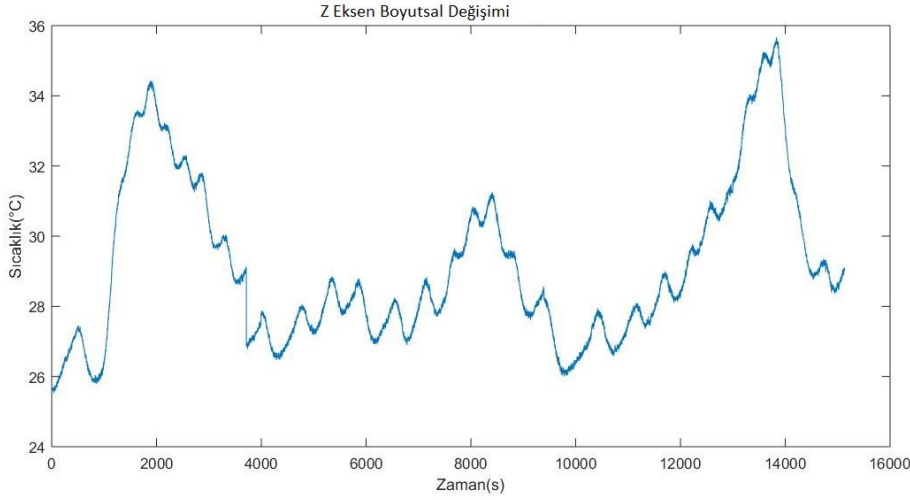
Gerçekleştirilen bu çalışmada iş mili katı modeli, soğutma sistemi geometrisi ve



Şekil 10: Değişken İş Mili Devri Boyutsal Değişimleri

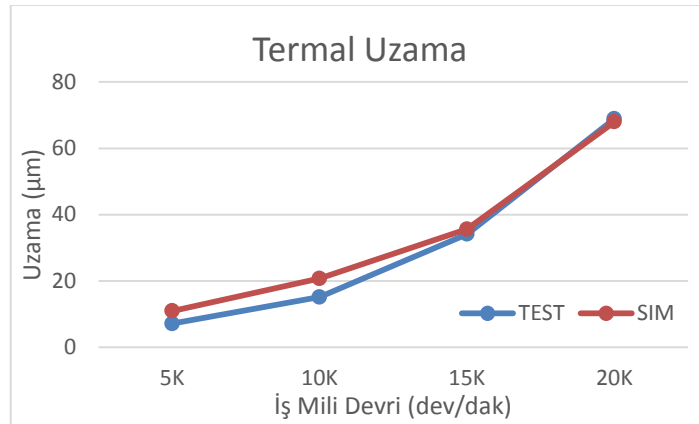
parametreleri ile birlikte iş mili ünitesinde kullanılan rulman özellikleri kullanılarak oluşturulan sonlu elemanlar modelinde iş mili termal karakteristiği modellenmiş ve termal deformasyon miktarları tahmin edilebilmiştir. Analitik modellenmesi son derece güç olan termal deformasyonların sonlu elemanlar analizi yardımı ile doğru sonuçlar verecek şekilde modellenmesi, iş mili tasarım iyileştirmeleri ve yeni iş mili tasarımları konusunda kolaylık sağlaması öngörülmektedir. Yüksek hızlı iş millerinin en önemli hata kaynağının da termal hatalar

olduğu düşünüldüğünde, bu hataların modellenemesinin önemi artmaktadır. Bu

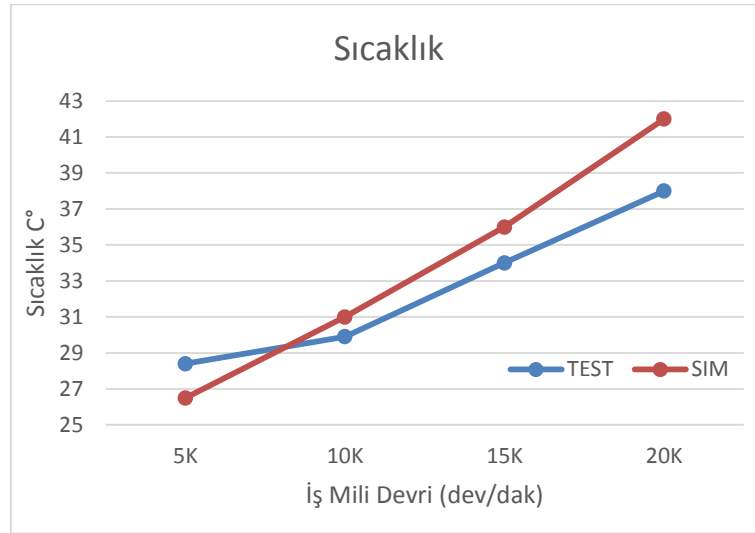


Şekil 11: Değişken İş Mili Devri Sıcaklık Değişimleri

çalışmada oluşturulan iş mili termal modelinin daha fazla ve daha farklı deneyler ile doğrulamasının yapılması planlanmaktadır. Soğutma sistemi parametrelerinin termal model vasıtasıyla hesaplanacak optimum parametrelerinin gerçek deney verileri ile karşılaştırılması da yapılacak çalışmalar arasındadır. Burada oluşturulan model altyapısının farklı boyut ve geometrilerdeki iş milleri ve soğutma sistemleri üzerinde de deneyerek deneysel doğrulamalarının yapılması ileriki proje aşamaları olarak planlanmaktadır.



Şekil 12: Termal Uzama Karşılaştırması



Şekil 13: Sıcaklık Karşılaştırması

7. KAYNAKÇA

- [1] Palmgren, A., 1959, Ball and Roller Bearing Engineering, S. H. Burbank, Philadelphia, PA.
- [2] Stein, J. L., and Tu, J. F., 1994, "A State-Space Model for Monitoring Thermally-Induced Preload in Anti-Friction Spindle Bearings of High-Speed Machine Tools," ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control, Sept., pp. 372–386.
- [3] B. Bossmanns, J.F. Tu, A power flow model for high speed motorized spindles-heat generation characterization, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering 123 (2001) 494–505.
- [4] B. Bossmanns, J.F. Tu, A thermal model for high speed motorized spindles, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) 1345–1366.
- [5] Chen, Shao-Hsien, Chin-Mou Hsu, and Yi-Lang Tsai. "Measurement Technique of Thermal Temperature Rise of Double Column Machining Center." *International Journal of Engineering and Industries* 5.1 (2014): 48.
- [6] Wang, Yung-Cheng, Ming-che Kao, and Chung-Ping Chang. "Investigation on the spindle thermal displacement and its compensation of precision cutter grinders." *Measurement* 44.6 (2011): 1183-1187.
- [7] Li, Shuhe, Yiqun Zhang, and Guoxiong Zhang. "A study of pre-compensation for thermal errors of NC machine tools." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37.12 (1997): 1715-1719.
- [8] Vanherck, Paul, J. Dehaes, and Marnix Nuttin. "Compensation of thermal deformations in machine tools with neural nets." *Computers in industry* 33.1 (1997): 119-125.
- [9] Wang, Yiding, et al. "Compensation for the thermal error of a multi-axis machining center." *Journal of materials processing technology* 75.1 (1998): 45-53.
- [10] Zhang, Jianfu, et al. "A method for thermal performance modeling and simulation of machine tools." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 68.5-8 (2013): 1517-1527.
- [11] Lee, Jian, Dong-Hyeon Kim, and Choon-Man Lee. "A study on the thermal characteristics and experiments of High-Speed spindle for machine tools." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 16.2 (2015): 293-299.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [12] Sun, Ming-Lu, et al. "An improved thermal simulation model for the spindle of CNC machine tool." *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 2010 International Conference on. IEEE, 2010.
- [13] Rantatalo, Matti, et al. "Milling machine spindle analysis using FEM and non-contact spindle excitation and response measurement." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47.7 (2007): 1034-1045.
- [14] Creighton, E., et al. "Analysis of thermal errors in a high-speed micro-milling spindle." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50.4 (2010): 386-393.
- [15] ISO 230-3:2007, Test code for machine tools -Part 3: Determination of thermal effects
- [16] T.A. Harris, *Rolling Bearing Analysis*, Wiley, New York, 1991 (pp.540–560).
- [17] SCHAEFFLER GROUP, "FAG Super Precision Bearings," Issue AC4/130/7EA, Apr.2008.

MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA İLE DERİN DELİK DELME İŞLEMİNDE İŞ PARÇASININ SICAKLIK MODELLEMESİ

Kuzu A.T.^a, Rahimzadeh Berenji K.^a ve Bakkal M.^a

a, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi Malzeme ve İmalat Bölümü, İstanbul/TÜRKİYE, kuzua@itu.edu.tr, rahimzadehberen@itu.edu.tr, bakkalmu@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada kompakt grafitli dökme demirin (KGDD) minimum miktarda yağlama sistemi kullanılarak derin delinmesi sırasındaki iş parçasındaki sıcaklıkların dağılımı incelenmiştir. Çalışmada kesme kuvveti ve tork matkabın radyal çapı ve kesici kenarı küçük elemanlara ayrılarak hesaplanmıştır. İş parçasına geçen ısı miktarını tahmin etmek için adveksiyon ısı transfer metodu kullanılmış ve ısı kaynağı hareketli olarak tanımlanmıştır. Minimum miktarda yağlamadan kaynaklı ısı taşınım katsayısı ve matkabın zırhındaki ısı akıları tersine ısı transferi yöntemi ile hesaplanmıştır. Geliştirilen ısıl model termal elemanlar yardımı ile doğrulanmış ve model sonuçları ile deneysel sonuçların iyi bir korelasyona sahip olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Derin delik delme, MMY, Sıcaklık

THERMAL MODELING OF WORKPIECE TEMPRATURE IN MQL DEEP HOLE DRILLING

Abstract

This paper investigates the compacted graphite iron (CGI) workpiece temperature distribution in deep hole drilling process with MQL. In this study, cutting forces and torque values have been estimated for both chisel and cutting lip using segregated cutting edge method. In order to obtain the amount of heat transfer to workpiece the advection heat partition model was used. Transient heat transfer problem with a moving heat source model was used to obtain temperature distribution of workpiece. The inverse heat transfer method were applied to solve the convection coefficient of MQL and heat flux at the margin by minimizing an objective function determined by the experimentally measured and finite element modeled temperature at specific thermocouple locations. The developed thermal model was verified by using embedded thermocouples and good agreements obtained between experimental and predicted temperature distribution results.

Keywords: Deep hole drilling, MQL, Temperature

1. GİRİŞ

Talaşlı imalat işlemi sırasında sıcaklıklarının bilinmesi/modellenmesi, artık gerilme, boyutsal hata ve mikro sertliği değerleri gibi ürün kalitesinin etkileyen parametreleri etkilediği için çok önemlidir. Talaş kaldırma sırasında kesme ortamındaki sıcaklıkların modellenmesi için analitik ve sayısal metotlar kullanılır. Kesme işlemi sırasında oluşan sıcaklıkların bulunması ile ilgili ilk ciddi çalışmalar 20. yüzyılın ortalarında başlamıştır. Trigger ve Chao 1951 yılında yayınladıkları çalışma ile talaş ve takım arasındaki sıcaklığı analitik olarak bulmaya çalışmışlardır [1]. Bunun ardından 1955 yılında yine Trigger ve Chao bir başka çalışma daha yayınladılar [2]. İlk çalışmada plastik şekil değiştirmeden kaynaklanan enerjinin bir kısmının ısı enerjisine dönüştüğü kabulü yapılırken, ikinci çalışmada hepsinin ısı enerjisine dönüştüğü kabul edilmiştir. Yine aynı yıl Loewen ve Shaw tarafından yayınlanan bir çalışmada 1951 yılında Trigger ve Chao tarafından geliştirilen model değiştirilerek yeni bir model geliştirmiştir [3]. Bu model ile talaşa gidecek olan enerjinin kesme hızı, kesme derinliği ile artacağını ve kayma şekil değişimi ile düşeceği gösterilmiştir. Stephenson ise 1995 yılında bu modeli kullanarak iş parçasına giden ısı akısını ve iş parçasındaki ısıl uzamaları modellemiştir [4]. Yine 1954 yılında Weiner kayma düzlemindeki sıcaklık dağılımını iki boyutlu olarak elde etmiştir [5]. Young ve Liou 1994 yılında Weiner'in metodunu değiştirerek aynı problemi daha gerçekçi sınır şartlarıyla çözmüş ve verilerini termal kamera sonuçları ile karşılaştırmıştır [6]. Venuvinod ve Lau 1986 yılında Loewen'in yöntemini geliştirmiş ve farklı kesme yöntemleri için uyarlamıştır [7]. Shaik ve arkadaşları ve Subramini ve arkadaşları farklı analitik yöntemler geliştirmiştir [8, 9]. Bu analitik yöntemlerde genel olarak ortalama sıcaklıklar incelenmiş ve özellikle geometrilere ve sınır şartlarında ciddi basitleştirmeler, kabuller yapılmıştır.

Analitik yöntemlerin dışında takım, talaş ve iş parçası geometrilerinin tam olarak incelebildiği ve ortam sıcaklığı yerine daha kesin noktaların sıcaklıklarının ölçülebildiği sayısal çalışmalar yeni sayısal modellerin gelişmesi ve bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle ortaya çıkmıştır. Muraka ve arkadaşları bu konudaki sonlu elemanlar yöntemini kullanan ilk çalışmaları yapmıştır [10]. Usui ve Shirakashi ve Oxley yine sonlu elemanlar yönteminin kullanarak sıcaklık dağılımlarını hesaplamışlardır [11, 12]. Sonlu elemanlar yöntemi haricinde Smith ve Armarego da sonlu farklar yöntemiyle, Chan ve Chandra boundary element yöntemiyle farklı çözümler üretmiştir [13, 14]. Özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişmesinden itibaren sayısal yöntemler üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır ve özellikle sadece talaş kaldırma üzerine analizler yapan paket programlar piyasada yer almaya başlamıştır. Bu yöntemlerin hepsinde talaş kaldırma sırasında üretilen ısının bilindiği kabulüyle başlanmaktadır.

Talaş kaldırma sırasında iş parçası ve takımın oluşan sıcaklıkların bulunması için pek çok farklı deneysel metot bulunmaktadır. Bu deneysel metotlar Longbottom ve Lanham tarafından yapılan review çalışmaları ile incelenmiştir [15]. Bu incelemelerde de görülebileceği gibi kesme ortamındaki herhangi bir noktanın yerini yeterli doğrulukta ve güvenilirlikte ölçülebilen bir deneysel metot bulunmamaktadır.

Deneysel yöntemlerle sayısal yöntemlerin bir birleşimi olan tersine (inverse) yöntemler talaş kaldırma esnasında üretilen ısının bilinmesine ihtiyaç duyulmadığı ve yeterli doğrulukta ölçümün alınamadığı kesme ortamından sıcaklık verisi alınmasına ihtiyaç duyulmadığı için gittikçe önem kazanmıştır. Tersine ısı geçişi yöntemi uzun yıllardır bilinen bir metot olmasına rağmen özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle ve bu konuda yapılan çalışmalar da artmıştır. Tersine ısı transferinin 1 boyutlu ısı transferi problemleri için çözümü Beck ve arkadaşları tarafından 1985'te ve Özışık tarafından 1993'te yapılmıştır [16,17]. Yine 1985 yılında bu teknik Alifanov ve arkadaşları tarafından iki boyutlu ısı transferi problemlerine uygulanmıştır [18]. Jarny ve arkadaşları tarafından da 1991 yılında üç boyutlu ısı transferi problemleri için incelenmiştir [19].

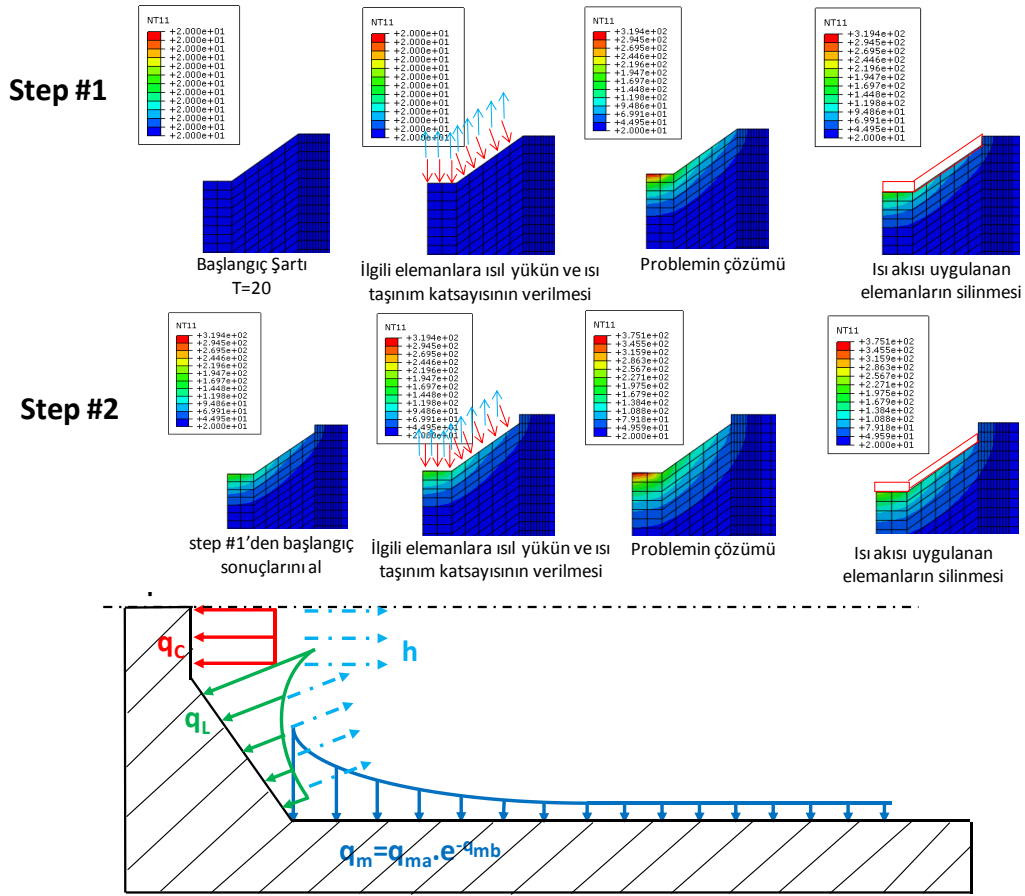
Lima ve arkadaşları tersine ısı geçişi yöntemini, takım sıcaklığını ölçmede kullanabilmek için bir çalışma yapmıştır [20]. Metal kesme işleminin gerçekleştirilmediği sadece simüle edildiği bu çalışmada yöntemin uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır. Battaglia ve Kusiak yayınladıkları çalışmada yüksek hızlı delik delme işleminde takım üzerindeki değişimleri incelemek için tersine ısı geçişi yöntemini uygulamışlardır [21]. Yöntemin de test edildiği bu çalışmada, takım üzerinden sıcaklık ölçümü yapılmış ve takım üzerine gelen ısı akıları tahmin edilmiştir. Carvalho ve arkadaşları tornalama işlemi sırasında takım ve takım tutucunun sıcaklıkları ile kesme ortamının sıcaklığını tahmin etmiştir [22]. Bu iki çalışma sırasında da termoelemanlarla elde edilmiş sıcaklık verileri kullanılmıştır. Huang ve arkadaşları titanyum iş parçasının delinmesi sırasında takımın oluşan sıcaklık değişimlerini incelemiştir [23]. Gostimiroviç ve arkadaşları taşlama sırasındaki kesme ortamının sıcaklığını ve oluşan ısı akılarını incelemiştir [24].

Hemen hemen tüm ısıl modeller tornalama işlemine dayanmaktadır ve araştırmacıların çok az kısmı delik delmede iş parçası ve matkap sıcaklık dağılımlarının modellenmesi üzerinde çalışmışlardır. . Son zamanlarda yapılan çalışmalarda iş parçası sıcaklıkların modeli Watanebe [25], Bono [26], Kalidas [27] ve Tai [28] tarafından geliştirilmiştir. Watanebe sonlu farklar methodunu kullanarak delik delme işlemi sonrasında iş parçasında meydana gelen distorsiyonları modellemiştir. Bono ise ölçülen moment ve kuvvet değerlerini kullanarak “adveksiyon ısı paylaşım modeli”ni kullanarak ısı yüklerini hesaplamıştır. Kalidas ve arkadaşları tersine ısı iletimi yöntemini kullanarak matkap radyal ağız kenarında, kesici kenarda ve matkabin zırhındaki ısı akılarını hesaplamış ve kuru ve sulu kesme şartları için sıcaklıkları modellemiştir. Tai ve arkadaşları ise ters ısı iletimi yöntemini kullanarak matkabin alt yüzeyi ve yan yüzeylerindeki ısı akılarını derin delik delme işlemi için modellemiştir. Tüm bu modellerin ortak noktası ısıl yükleri ölçülen kuvvet ve moment değerlerinden veya ölçülen sıcaklıkları yardımı ile tersine ısı iletimi yöntemi ile hesaplamasıdır. Bu çalışmada ise kuvvet ve moment model değerleri kullanılarak ısı yükleri hesaplanmış ve MMY den kaynaklanan soğuta etkisi ve delik delme prosesinden kaynaklı yan duvarlardaki ısı oluşumu tersine ısı transferi metodu ile hesaplanmıştır. Bu değerler sonlu elemanlar yöntemine başlangıç koşulu ve sınır değerleri olarak girilmiş ve ısı dağılımları hesaplanmıştır. Hesaplama adımları aşağıda detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

2. SICAKLIK MODELİ

Metal kesme sırasında oluşan ve parçaya gelen ısı akısı sabit değildir ancak çok kısa bir zaman sonra sabit hale ulaşır. Delik delme gibi bazı farklı işlemlerde ısı akısı talaşların varlığından veya torkun işlem sırasında değişmesinden dolayı değişebilir. Ayrıca bazı freze, torna işlemlerinde ısı akısı işlemin uzunluğu ile bağlantılı olarak zaman içerisinde artabilir. Bu çalışmadaki parametreler ve iş parçası özellikleriyle, ısı akısı sadece işlemin başında ve kısa bir süre için değişken olmaktadır, bu sebeple ısı akısı sabit olarak kabul edilmiştir.

Isı transferi problemi Abaqus sonlu elemanlar yazılımı ile çözülmüştür. Sayısal çözümde 12160 eleman kullanılmıştır. Eleman tipi olarak ise DCAX4 element seçilmiştir. Her bir çözüm adımı takımın ilerleme hızına bağlı olarak değişmektedir. Bu problemin en önemli özelliği talaş kaldırma işleminin sayısal modele aktarılmasıdır. Derin delik delme işlemi sırasında kesilen metaller iş parçasından takımın hareketi ve/veya soğutucu akışkan etkisi ile uzaklaştırılır. Bunun modellenebilmesi için ısı kaynağının her zaman adımından sonra ısı kaynağının geçtiği bölgedeki elemanlar analizden çıkartılmıştır. Analizdeki her zaman adımı ayrı bir analiz olarak çözülmektedir. Her bir zaman adımının çıktısı diğer zaman adımının başlangıç şartı olarak modellenmiştir ve böylece analizin devamlılığı sağlanmıştır. Bu durum şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1 Isı kaynağının hareketi

Matkabın yan duvarına geçen ısı akısı tersine ısı yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Bu yöntemde ısı akısı eksponensiyel olarak azaldığı ve 1 mm sonrasında sabit kaldığı varsayımı ile çözüm yapılmıştır. Burada oluşan ısı akısı

$$q_m = q_{ma} \cdot e^{-q_{mb}} \quad (1)$$

olarak varsayılmıştır. Formüle q_{ma} ve q_{mb} sabitlerdir ve her bir kesme parametresi için farklılık göstermektedir. Özet olarak bakıldığında zaman bu problem ısı akısının ve geometrinin, talaş kaldırma işlemi ve bu işlem sırasında oluşan ısı akısını modelleyecek şekilde değiştiği N farklı zamana bağlı ısı geçişi probleminin çözümünün birleştirilmesi ile çözülmüştür. Tersine ısı geçişi yöntemi aslında temelde bir optimizasyon probleminin çözülmesidir. Bu optimizasyon probleminde N numaralı formüle verilen amaç fonksiyonu minimuma indirilmeye çalışılmaktadır. Burada $T_{deneysel}$ deneyler sonucunda elde edilen sıcaklık verilerini, $T_{sayısal}$ sayısal çözümlerin sonucunda elde edilen sıcaklık değerlerini gösterir. Amaç fonksiyonu iki noktadan alınan deneysel sıcaklık değerleri ile o noktanın sayısal çözümdeki sıcaklık değerlerinin toplamıdır. Tersine ısı transferi yönteminde ilk olarak rastgele bir ısı akısı tahmin edilir. Bu tahmin edilen ısı akısına göre sayısal çözümün sonuçları ve deneysel veriler karşılaştırılır ve eğer amaç fonksiyonu istenilen değere düşmezse yeni bir ısı akısı tahmin edilir ve bu işlem amaç fonksiyonu istenilen değere getirilene kadar devam ettirilir.

$$f_{amaç} = \int_{t_0}^{t_f} (|T_{deneysel} - T_{sayısal}|) dt \quad (2)$$

Her bir çözüm adımı boyunca iş parçasına geçen ısı akıları elemanların üst yüzeylerine uygulanır ve bir sonraki çözüm adımında bu elemanlar silinerek ısı akıları onların altındaki elemanlara uygulanır.

Şekil 1'de görüldüğü gibi bir sonraki zaman adımında ısı kaynağı ilerlediği zaman, ısı kaynağının ilerlediği bölümde elemanlar analizden çıkarılmıştır ve kırmızı çizgilerle gösterildiği gibi iş parçasının bir önceki zaman

adımındaki sıcaklık dağılımı, bir sonraki zaman adımı için başlangıç koşulu olarak uygulanmıştır. Takımın, yani ısı kaynağının ilerlemesi düz bir ilerleme olarak değil, parçalı bir hareket olarak modellenmiştir. Isıl analizlerin yapıldığı Abaqus yazılımında ısı kaynağının hareketi lineer olarak da modellenebilirdi, bunun için farklı alt programlar bulunmaktadır. Bununla beraber talaş kaldırma işleminin modellenmesi için gerekli olan parçaların atılmasının modellenmesi, yukarıda bahsedilen alt programlar ile mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, parçalı ilerleme yolu tercih edilmiştir. Isı kaynağının hareketli olarak modellenmesi için yukarıda anlatıldığı gibi zaman adımı sayısı kadar çözüm yapılmalıdır.

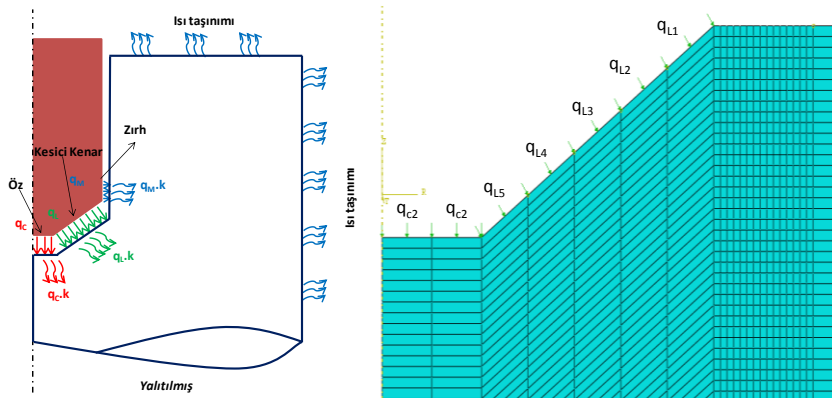
Sıcaklık modelinde zaman adımı delme parametrelerine ve adım (step) sayısına bağlı olarak değişmektedir. Zaman adımı işlem süresinin adım sayısına bölünmesi ile bulunmaktadır. Adım sayısına i dersek zaman adımı t_i (3) nolu denklemden bulunabilir.

$$t_i = \frac{t}{i} \quad (3)$$

$$t = \frac{L_z \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f_n \cdot n \cdot V_c} \quad (4)$$

Denklem (4)'teki t toplam i zamanı L_z , delik derinliğini, f_n , ilerleme miktarını, n diş sayısını ve V_c kesme hızını ifade etmektedir.

Çalışmada kullanılan iş parçası kolay modellenmesi açısından dairesel kesitli olarak seçilmiştir. Böylece iş parçası 2 boyutlu aksel simetrik geometriye sahip bir şekilde çizilmiştir. Modelin 2 boyutlu olması hem çözümün daha az yer kaplamasına hem de daha hızlı çözülmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 2'de görülen kısım ısı akısının uygulandığı, matkabın alt yüzeyinin iş parçasına temas ettiği bölgeyi ifade etmektedir. Şekilde iş parçasının üst kısmına paralel olan matkabın radyal ağız kısmı 2, matkabın kesici kenarını ifade eden çizgi ise 5 eşit parçaya ayrılmıştır. Derin delik delme sırasında ısı, 3 farklı bölgeden iş parçasına yayılmaktadır. Bunlardan birincisi matkabın radyal ağız denilen kısmında gerçekleşmektedir. Diğer ısı kaynağı esas kesmenin meydana geldiği kesme kenarlarından kaynaklanır ve son olarak matkabın yan kenarlarının delinmiş deliğin etrafına çarpması ve sıcak talaşın helis boyunca taşınmasından kaynaklanır. Talaşın etsi ile oluşan ısı kaynağı delik delme prosesinde etkisi çok azdır. Fakat derin delik delme işlemlerinde sadece takım ucundaki ısı akısını dikkate almak ısıl modellemede hata miktarını arttırmaktadır.



Şekil 2 Geometrik model

Sıcaklıkların modellenmesinde malzemenin sıcaklığa bağlı fiziksel ve mekanik özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Tablo 1'de çalışmada kullanılan KGDD malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Özellikle ısıl malzeme özellikleri iş parçasının sıcaklıklarının modellenmesinde çok önemlidir. Isı iletim katsayısı sıcaklığa bağlı olarak girilirken yoğunluk ve özgül ısı sabit olarak girilmiştir.

Tablo 1 KGDD malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler		Mekanik Özellikler				Isıl Özellikler				
Yoğunluk [kg/dm ³]		Isıl Genleşme Katsayısı [µm/K]		Elastiklik Modülü [GPa]		Poisson oranı	Isı Kapasitesi [J/kg.K]		Isı iletim katsayısı [W/m.K]	
T	P	T	A	T	E	Γ	T	Cp	T	K
20	7,15	100	11	23	140	0,26	100	475	23	39
		400	12,5	100	135				100	39
				400	130				400	38

Çalışmada delik delme sırasında oluşan iş parçalarına geçen ısı akıları Bono ve Ni'nin 2001 yılında yapmış oldukları çalışmadan yola çıkarak bulunmuştur [29]. İş paçasına ve matkaba geçen ısı akısı her bir elemanter kesici uç için

$$q''_{işparçası} = \frac{(1-r)(Tw+F_zV_f)}{\pi(r_{dış}^2-r_{iç}^2)} \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. Burada r sürtünmeden kaynaklı ısı oluşumunun toplam ısı oluşumuna oranını verir ve denklem (67)'deki gibi hesaplanır.

$$r = \frac{F_u V_{talaş}}{Tw+F_zV_f} \quad (6)$$

Talaş hızı $V_{talaş}$,

$$V_{talaş} = V \frac{\cos(i) \sin(\theta)}{\cos(\eta) \cos(\phi-\alpha)} \quad (7)$$

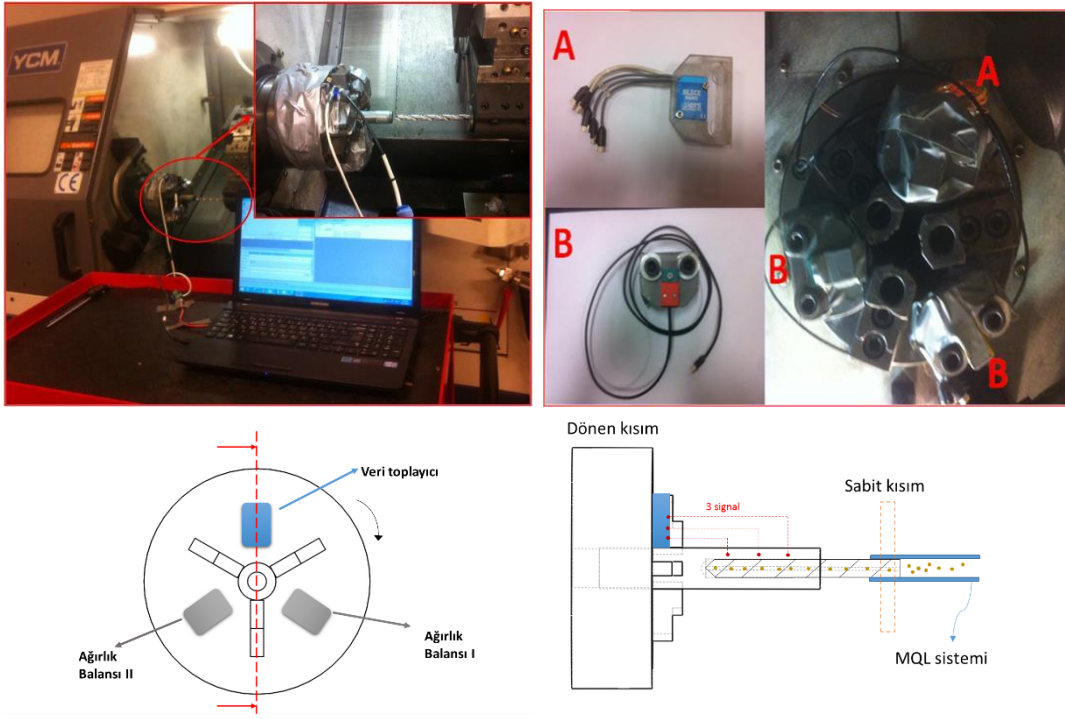
şeklinde hesaplanır. Sürtünme kuvveti F_u ise aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$F_u = \frac{(\cos(\alpha)\cos(\eta))F_t + (\sin(\alpha)F_f)}{\cos^2(\alpha) \cos(i) \cos(\eta) + \sin(\alpha)(\sin(i) \sin(\eta) + \sin(\alpha) \cos(i) \cos(\eta))} \quad (8)$$

3. MODEL DOĞRULAMA

Sıcaklık ölçüm sistemi CNC torna tezgahına adapte edilmiştir. Burada takım dönmediği için MMY sistemini direkt olarak takımın shaft kısmından takıma monte edilmiştir. Bu sistemde ara bir eleman olmadığı için sistem sağlıklı bir şekilde çalışmaktadır. Testlerde sıcaklıkları ölçmek için pil ile beslenebilen bir data logger kullanılmıştır. Bu sistem tornanın aynasına monte edilmiş fakat belli bir hızdan sonra takım tezgahındaki titreşimler çok arttığı için karşı ağırlıklar ile ayna dengelenmesi yapılmıştır. Sistem Şekil 3'de verilmiştir. A resmi ile gösterilen DTS data logger üretilen pleksiglass kutunun içinde gösterilmiştir. İlk başta alüminyumdan yapılmıştır fakat ağırlıkların azaltılması için malzeme değiştirilmiştir. B resminde karşı ağırlıklar ve termal elemanların bağlanması için gerekli ara eleman görülmektedir.

Bu çalışmada delik delme testlerinde kullanılan aynı geometriye sahip 10 mm çapında kaplamasız karbür matkap kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan matkap derin delik delmede kullanılan matkap ile aynı geometrik özelliklere sahiptir. Deneylerde 20 mm çapında ve 200 uzunluğunda numuneler 1 mm çapına sahip bir matkap ile termo elemanların bağlanması için delinmiştir. Delik delinirken yüzeyin 25 ve 75 mm altında deliğe 1.5 mm uzaklıktan K-tipi termo eleman yardımı ile sıcaklıklar 2 Hz hızında ölçülmüştür. Bu testlerde kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3 Derin delik delme sıcaklık ölçme test düzeneği

Tablo 2 Delik delme testlerinde kullanılan test parametreleri

MMY özellikleri		
Hava Basıncı		6 bar
Yağ Debisi		100 ml/saat
Yağın Viskozitesi (40°)		47 mm ² /s
Yoğunluk (20°)		0.92 g/ccm
Tutuşma Sıcaklığı		265°
Takım Özellikleri		
Helis açısı		30°
Koniklik açısı		118°
Hatve uzunluğu		50 mm
Matkap çapı		10 mm
Matkap özü kenar açısı		120°
Matkap özü kenar uzunluğu		2.55 mm
Radyal ağız çapı		3 mm
Kesme Parametreleri		
Set #	Kesme Hızı [m/dak]	İlerleme [mm/dev]
1	25	0.15
2	50	0.15
3	75	0.1

Mevcut çalışmada parça sıcaklık dağılımlarını tahmin etmek için bir model geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Diğer modellerin aksine, bu çalışmada, ısı yükleri mekanik yaklaşım kullanılarak hesaplanan kuvvetlerden elde edilmektedir. Kesme modeli matkap özü üzerinde dik kesme şartları ve matkap kesme kenarı üzerinde ise eğik kesme şartları düşünülerek modellenmiştir. Delik delmeye ait moment ve dik (thrust) kuvvet'in modellenmesi, matkap'ın kesici kenarlarını sınırlı sayıda kesme elemanlarına bölerek ilk Armarego [30] tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada, delik delme mekaniğinde kullanılan eğik kesme mekaniği için mekanistik modelleme yaklaşımı Altıntaş [31] tarafından önerilen modelden yardım alınarak oluşturulmuştur. Eğik kesme mekaniğine geçiş için gereken parametreler, kesme açısı, kayma gerilmesi ve sürtünme açısı, dik kesme deneylerinden elde edilmiştir. Dik kesme testler geniş talaş açıları ve kesme hızları aralığında yapılmıştır.

Diferansiyel kesme kuvvetleri dik kesme testlerinden elde edilen veriler kullanarak ve eğik dönüşüm yaklaşımından yararlanarak hesaplanmıştır. Mekanistik kuvvet modeli deneysel delik delme testleri ile doğrulanmıştır. Ayrıca, delik delme işleminden oluşan ısı yükleri, bu çalışmadan elde edilen mekanistik modeli kullanarak FEM metotları ile sayısal olarak modellenmiştir.

Matkabın radyal ağız bölgesi, matkabın çapının küçük bir kısmını oluşturması ve merkeze çok yakın olmasından dolayı kesme işleminin etkinliği çok azdır genel olarak literatürde etrafındaki malzemeyi sabanlama mekanizmi ile yanlara ittiğinden bahsedilmektedir. Bu yüzden matkabın radyal ağızı sanki Brinell sertlik deneyi gibi incelenmektedir. Fakat yeni tip matkapların radyal ağız bölgesine bir açı verilerek sabanlama etkisi azaltılabilir. Çalışmada kullanılan matkapta bu şekilde üretilmiş bir matkaptır. Radyal ağız bölgesindeki kuvvetler iki farklı bölgede incelenmiş. Bunlar batmanın gerçekleştiği ölü bölge ve dik kesme mekaniğine uygun eğiklik açısı sıfır olan bölgedir.

Matkabın ölü bölgesinin davranışı Brinell sertlik deneyine benzer olduğu düşünülürse bu bölgedeki malzemeyi itme kuvveti

$$F_{z_{ch1}} = F_{th_1} = A_{ch}H_B \quad (9)$$

formülünden bulabilir. Bu formülde A_{ch} matkap ölü bölgesinin taradığı alanı ve H_B iş parçasının Brinell sertliğini temsil etmektedir. Matkabın ölü bölgenin iş parçasına nüfuz ettiği alanı aşağıdaki formülden hesaplayabiliriz.

$$A_{ch1} = \frac{2r_{öl}c}{\sin(2\pi-\psi_c)\cos(\kappa_t)} \quad (10)$$

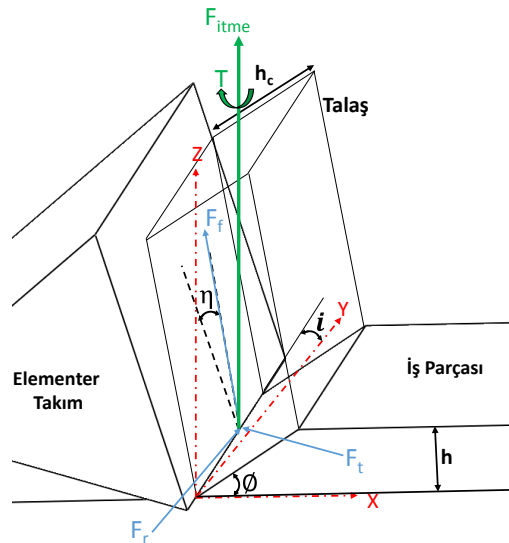
burada c matkabın devir başına ilerleme hızını [mm/devir] ifade etmektedir. Kesme mekaniğinden ise itme kuvveti dik kesme deneylerinden elde edilen verilere göre elde edilmiştir. Radyal ağız bölgesinde kesici kenarın eğiklik açısı sıfır derecedir bu sebeple dik kesme mekaniği yaklaşımı matkabın bu bölümünü uygulanabilir ve

$$F_{z_{ch2}} = F_{th_2} = K_{fc}bh + K_{fe}b \quad (11)$$

formülünden elde edilir. Radyal ağız bölgesindeki toplam itme kuvveti ise (9) ve (11) nolu formüllerin toplamından elde edilir.

$$F_{th} = F_{th_1} + F_{th_2} \quad (12)$$

Matkabın kesme kenarlarında talaş ve eğim açısı değişken olduğu için, yukarıda da belirtildiği gibi bu kenarlar elemanlara ayrılmış ve bunlara elemanter kesme takımı adı verilmiştir (EKT). Her bir EKT küçük bir kesme takımı gibi davranmaktadır. Bu EKT'lerinin eğim açısı sıfırdan farklı olduğu için kuvvet modellerken eğik kesme mekaniği yaklaşımı uygulanmıştır. Eğik kesme işlemi şematik olarak şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4 : Her ECT nin eğik kesme sırasındaki şematik görünümü

Matkaptaki moment ve kuvvetleri modellemek için eğik kesmeye geçiş modeli kullanılmıştır [32]. Bu modelde kullanılan dik kesme katsayılarından eğik kesme katsayılarına dönüşümü sağlayan formüller denklem 7-9'da verilmiştir.

$$K_{t_c} = \frac{\tau_s}{\sin(\theta_n)} \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) + \tan(i) \tan(\eta) \sin(\beta_n)}{\sqrt{(\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2(\eta) \sin^2(\beta_n))}} \quad (13)$$

$$K_{f_c} = \frac{\tau_s}{\sin(\theta_n) \cos(i)} \frac{\sin(\beta_n - \alpha_n)}{\sqrt{(\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2(\eta) \sin^2(\beta_n))}} \quad (14)$$

$$K_{r_c} = \frac{\tau_s}{\sin(\theta_n)} \frac{\cos(\beta_n - \alpha_n) \tan(i) - \tan(\eta) \sin(\beta_n)}{\sqrt{(\cos^2(\phi_n + \beta_n - \alpha_n) + \tan^2(\eta) \sin^2(\beta_n))}} \quad (15)$$

Formüllerde η talaş akış açısını ifade etmektedir. $\tau_s, \beta_n, \theta_n$ sırası ile kayma gerilmesi, sürtünme katsayısı ve kayma açısıdır. Bu katsayılar dik kesme deneylerinden elde edilmiştir. Stabler kanundan faydalanarak talaş akış açısı eğim açısına eşit olarak alınmıştır [32]. Eğik kesme mekaniğindeki normal talaş açısı ve normal kesme açısı dik kesme mekaniğindeki talaş açısı ve kesme açısı ile eşit alınmıştır. Bu varsayımlardan yola çıkarak her EKT için oluşan kesme kuvvetleri formül 10-12'den hesaplanmıştır.

$$dF_t = K_{t_c} \Delta b h + K_{t_e} \Delta b \quad (16)$$

$$dF_f = K_{f_c} \Delta b h + K_{f_e} \Delta b \quad (17)$$

$$dF_r = K_{r_c} \Delta b h + K_{r_e} \Delta b \quad (18)$$

burada Δb kesme genişliğini ifade etmektedir ve bu parametre kesme kenarındaki EKT sayısına bağlıdır. h ise kesilmemiş talaş kalınlığını ifade etmektedir. Toplam kesme kuvvetleri aşağıdaki formüllerden hesaplanmıştır.

$$F_{th_{clip}} = 2 \sum_{m=1}^M [dF_f \cos \gamma_d \cdot \sin \kappa_t - dF_r (\cos i \cdot \cos \kappa_t + \sin i \cdot \sin \gamma_d \cdot \sin \kappa_t)] \quad (19)$$

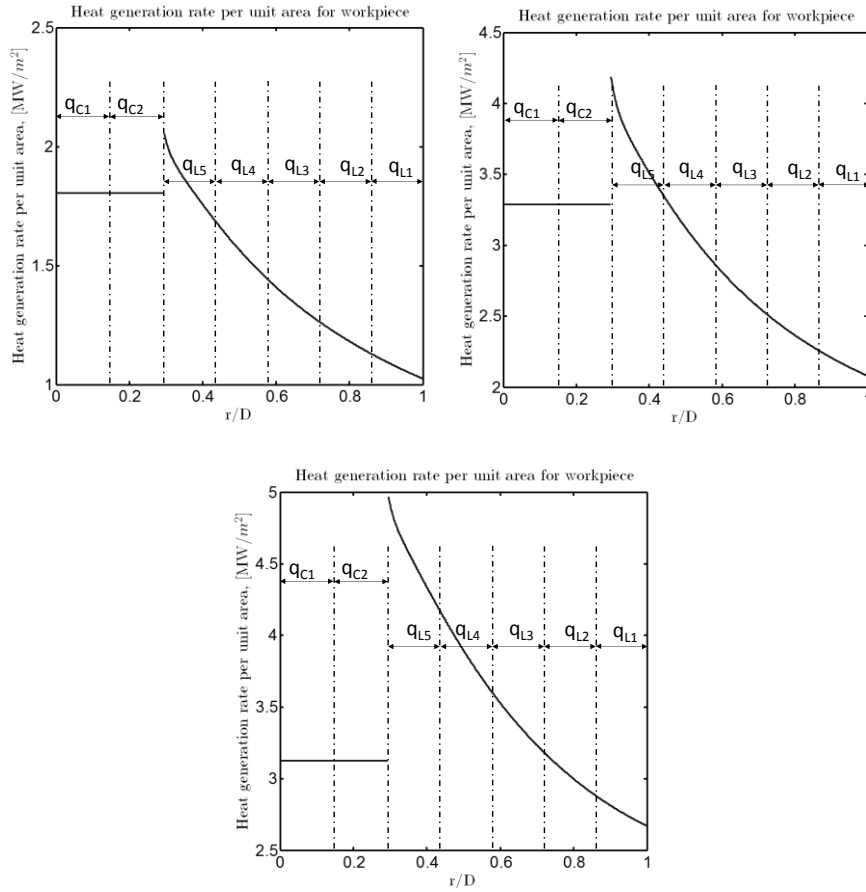
$$T = 2 \sum_{m=1}^M dF_t \cdot r \quad (20)$$

Tablo 3'de hesaplanan ve ölçülen test sonuçları verilmiştir. Görüldüğü gibi özellikle kesme hızı 25 ve 50 m/dak olduğu zaman kesme kuvvetleri ortalama %5 hata ile bulunmuştur, 75 m/dak kesme hızlarında hataların fazla olmasının sebebi ölçüm sırasında sıcaklıklar ölçülürken kullanılan karşı ağırlıklar yüksek dönme hızlarında oluşan yüksek titreşim değerleridir. Tork değerleri ise ortalama %15 hata ile modellenmiştir.

Tablo 3 Derin delik delme kuvvet modeli sonuçları

Kesme Parametreleri		İtme Kuvveti [N]		Tork [Nm]		Hata %	
Kesme Hızı [m/dak]	İlerleme [mm/dev]	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen
25	0.15	897	900	4.87	4.2	0.3%	16.0%
50	0.15	885	862	4.89	4.13	2.7%	18.4%
75	0.1	686	904	3.95	3.7	24.1%	6.8%

Birim alanda meydana gelen ısı miktarı denklem (5) kullanılarak çap boyunca hesaplanmış ve hesaplanan değerler Şekil 5'de verilmiştir. Matkabın radyal bölgesine yakın kesme kenarlarında iş parçasına geçen ısı miktarı fazla iken matkabın dışına doğru ısı geçişi azalmaktadır.

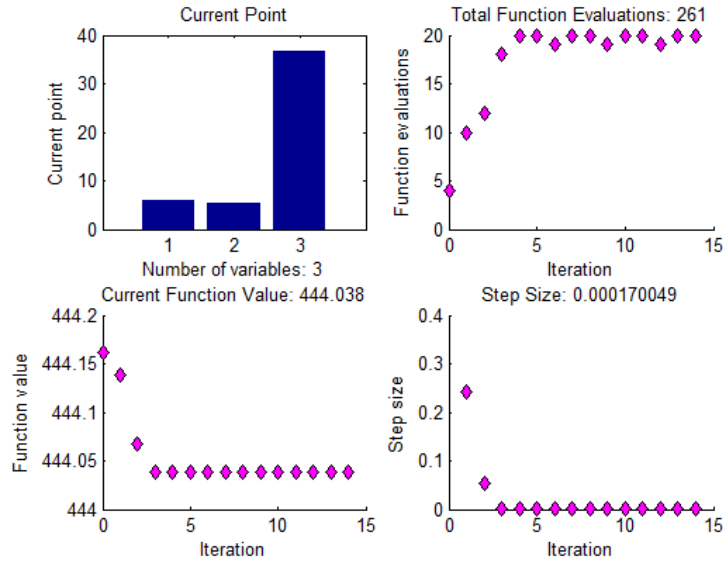


Şekil 5 Kesici kenardan iş parçasına geçen ısının rölatif çapa dağılımı a) $V_c=50$ m/dak $f=0.15$ mm/dev b) $V_c=100$ m/dak $f=0.15$ mm/dev c) $V_c=100$ m/dak $f=0.3$ mm/dev

Çalışmada yan duvarlardan kaynaklı ısınma etkisi ile soğutma etkisi beraber düşünülerek çözdürülmüştür. Yani yan duvarlara verilen ısı akılarında MMY'in soğutma etkisi de mevcuttur. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. Optimizasyon sonuçlarının detaylı gösterimi 50 m/dak kesme hızı ve 0.15 mm/dev ilerleme hızı için Şekil 6'de verilmiştir.

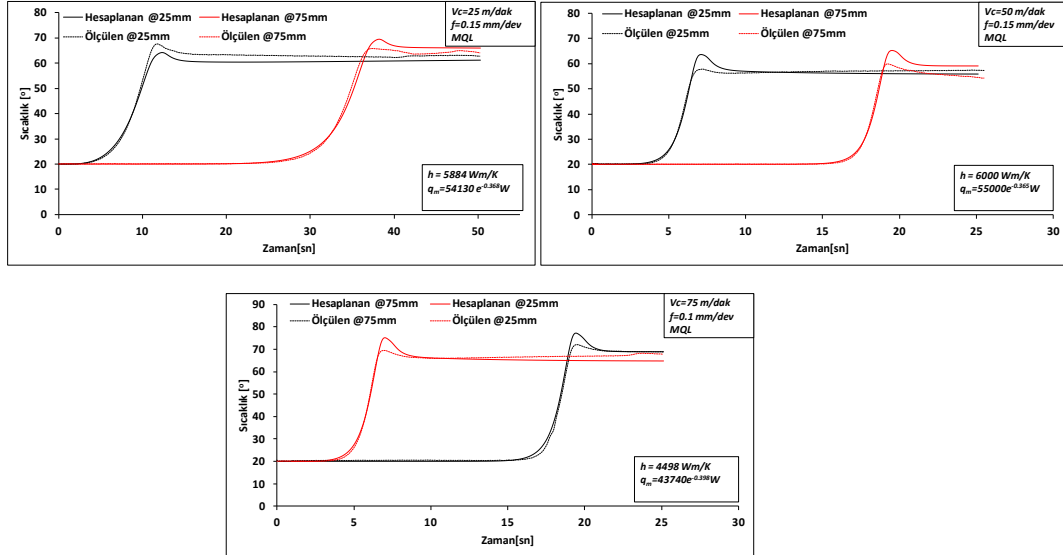
Tablo 4 Hesaplanan duvardaki ısı akısı ve ısı taşınım katsayısı

Set #	Kesme Hızı [m/dak]	İlerleme [mm/dev]	q_{wa}	q_{wb}	h [$\text{W/m}^2\text{K}$]
1	25	0.15	21558	-0.416	5844
2	50	0.15	55000	-0.365	6000
3	75	0.1	43740	-0.398	4498



Şekil 6 Vc = 50 m/dak f = 0.15 mm/dev kesme parametresi için optimizasyon eğrileri

Modellenen ve ölçülen sıcaklıklar Şekil 7'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi her üç kesme parametresi içinde deneysel sonuçlar ile ölçüm sonuçları uyumaktadır



Şekil 7 MMY Derin delik delme sıcaklık model sonuçları a) Vc=25 m/dak f=0.15 mm/dev b) Vc=50 m/dak f=0.15 mm/dev c) Vc=75 m/dak f=0.1 mm/dev

Şekil 7'de verilen sonuçların daha iyi anlaşılabilmesi için karekök hataları, maksimum hatalar ve ortalama hatalar denklem 21, 22 ve 23'e göre hesaplanmış ve Tablo 5'de listelenmiştir.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{ölçülen} - T_{hesaplanan})^2}{N}} \quad (21)$$

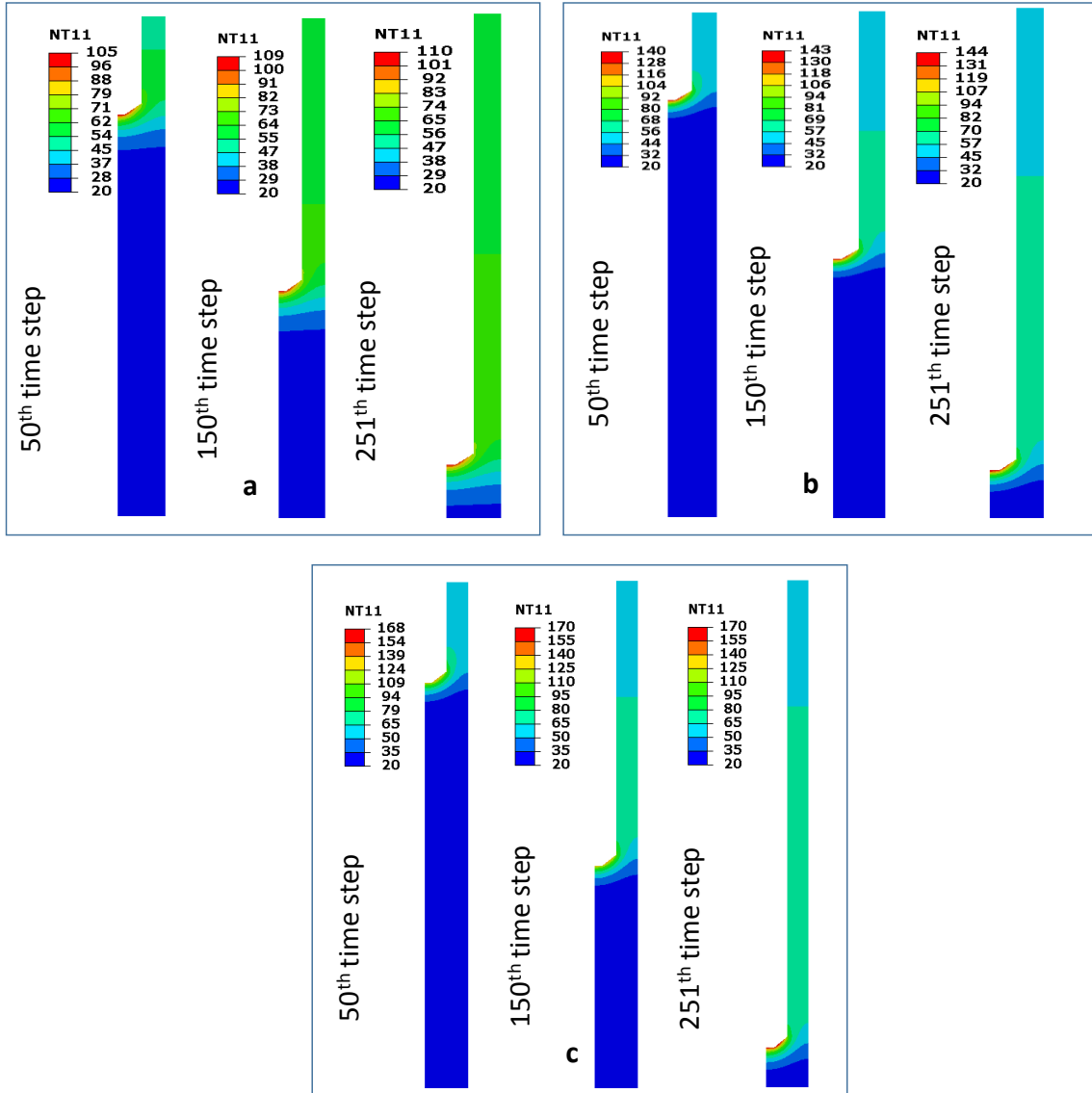
$$e_{max} = \frac{|T_{hesaplanan} - ölçülen|_{max}}{T_{hesaplanan}} \quad (22)$$

$$e_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^N |T_{hesaplanan} - ölçülen|}{N} / T_{hesaplanan} \quad (23)$$

Tablo 5 Karakök hataları, maksimum hatalar ve ortalama hatalar

Kesme Parametreleri		TC1	TC2
Vc=25 m/dak f=0.15 mm/dev	RMS Hata [°C]	2.42	1.25
	Maks. % Hata	5%	5%
	Ort. % Hata	3%	3%
Vc=50 m/dak f=0.15 mm/dev	RMS Hata [°C]	1.03	1.40
	Maks. % Hata	10%	9%
	Ort. % Hata	2%	2%
Vc=75 m/dak f=0.1 mm/dev	RMS Hata [°C]	3.20	1.95
	Maks. % Hata	8%	7%
	Ort. % Hata	2%	2%

Sıcaklıklar doğrulandıktan sonra delik delme modelinde olduğu gibi sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Şekil 8'de 3 farklı zaman adımı için kesme parametrelerin sıcaklık dağılımına etkisi verilmiştir. Maksimum sıcaklıklar benzer olarak bütün testlerde matkabın özünün olduğu kısımda gerçekleşmiştir. Kesme hızı 75 m/dak ile yapılan modelde sıcaklık dağılımı küçük bir alanda meydana gelmiştir, bunun sebebi işlemin çok kısa bir sürede ($t=1.89$ sn) gerçekleşmesinden dolayı ısının transfer olmaya zaman bulamaması ile açıklanabilir.



Şekil 8 Farklı zaman adımlarında MMY Derin delik delme sıcaklık model dağılımları a) Vc=25 m/dak f=0.15 mm/dev b) Vc=50 m/dak f=0.15 mm/dev c) Vc=75 m/dak f=0.1 mm/dev

4. SONUÇ

Çalışmada delik delme işleminde iş parçası üzerindeki sıcaklık modelinin işlem parametrelerine bağlı olduğunu gösterilmiştir. Adveksiyon ısı paylaşım modeli kesici kenarlar boyunca ısı akışının tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu yöntemi uygulamak amacıyla, itme gücü ve moment değerleri bilmek önemlidir. Delme kuvvetlerini modellemek için mekanistik yaklaşım uygulanmıştır. Kuvvet sonuçlarına göre ısı paylaşım oranları ve ısı akıları matkap özü ve kesici kenar boyuca elde edilmiştir. Matkap duvarındaki sürtünmeden ve sıcak talaşın transferinden kaynaklı ısı oluşumu ve MMY sisteminin soğutma etkisi tersine ısı transferi yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak ısı transfer modeli FEA yöntemi oluşturulmuştur ve iş parçasındaki ısıl dağılımı hesaplanmıştır. Çözüm sırasında talaşın oluşup uzaklaşması, her bir çözüm adımında elemanları yok ederek simule edilmiştir. Deneysel olarak sıcaklıkları ölçmek için gömülü ısıl eleman yöntemi uygulanmış ve modelden hesaplanan sıcaklıklar ile deneysel sonuçların birbiri ile örtüştüğü görülmüştür. En fazla ısıl yükün matkap özü bölgesinde olduğu görülmüş ve bu ısıl yük matkap çevresine doğru azaldığı hesaplanmıştır.

5. TEŞEKKÜR

Çalışma TÜBİTAK 112M335'nolu proje kapsamında yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında yapılmıştır. Ayrıca Karcan Kesici Takımlar firmasının MANUNET projesi için geliştirdikleri takımlar bu projede kullanılmıştır.

6. KAYNAKLAR

- [1] Trigger, K.J. ve Chao B.T. 1951. "An analytical evaluation of metal cutting temperature", Transactions of ASME, 73, 57-68
- [2] Chao, ET. and K.J. Trigger. 1955 "Temperature Distribution at the Tool-chip Interface in Metal Cutting" Trans. ASME, vol. 77, pp. 1 107-1 121
- [3] Loewen, E. G. ve Shaw, M.C. 1954. "On The Analysis Of Cutting Tool Temperatures", Transactions of ASME, 71, 217-231
- [4] Stephenson, D.A. ve Stevenson, R. 1995. "The Mechanical Behavior of Zinc During Machining", Journal of Engineering Material Technology, 117, 172-178
- [5] Weiner, J.H. 1954. "Shear-Plane Temperature Distribution İn Orthogonal Cutting", Transactions of ASME, 76, 1331-1341
- [6] Young, H.T. ve Liou, H.Y. 1994. "On The Analysis Of Chip Temperature Distrubution İn Orthogonal Machining", International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 31, 73-84
- [7] Venuvinod, P.K., and Lau, W.S., 1986, Estimation of Rake Temperatures in Free Oblique Cutting,Â Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 26, No. 1, pp. 1 14.
- [8] Shaik, A.R., Raman S., Civan, S., ve Cohen, P.H.1995. "A New Forward Temperature Estimator for Remote Thermocouple sensing in Machining", International Journal of Mechanical Sciences, 37-5, 511- 526
- [9] Subramani, G., Whitmore, M. C., Kapoor, S.G.,ve DeVor, R.E. 1995. "Temperature Distribution in a Hollow Cylindrical Workpiece During Machining: Theoretical Model and Experimental Results", Journal of Manufacturing Science and Engineering, 113-4, 373-380
- [10] Muraka, P.D., Barrow, G., ve Hinduja, S. 1979. "Influence of the Process Variables on the Temperature Distribution in Orthogonal Machining Using the Finite Element Method", International Journal of Mechanical Sciences, 21, 445-456
- [11] Usui, E. ve Shirakashi, T. 1982. "Mechanics of Machining from Deceptive to Predictive Theory", On the Art of Cutting Metals – 75 years later, ASME PED, 7, 13-35 62
- [12] Oxley, P.L.B. 1989. The Mechanichs of Machining, Ellis Horwood, Ceicester
- [13] Smith,A.J.R. ve Armarego, J.A. 1981. "Temperature prediction in orthogonal cutting with a finite difference approach", Annals of CIRP
- [14] Chan, C.L ve Chandra, A. 1991. "A Boundary Element Analysis Of Temperature Distributions İn Metal Cutting", ASME Journal of Engineering Industry, 113, 311–319.
- [15] Longbottom J.M., Lanham J.D. 2005. "Cutting temperature measurement while machining – a review", Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 77, 2 , pp:122–130
- [16] Beck, L.V., Blackwell, B. ve St. Clair, Jr B.K. 1985. "Inverse Heat Conduction", Wiley, New York
- [17] Özisık, N. 1993. Heat Conduction, John Wiley & Sons, New York
- [18] Alifanov, M.ve Egerov, Y.V. 2006. "Algorithm and results of solving inverse heat-conduction boundary problems in a two-dimensional formulation", Journal of Engineering Physics. 53-5, 1335-1342

- [19] Jarny, Y., Özişik, N. ve Bardon, J.P.1991. "A general optimization method using adjoint equation for solving multidimensional inverse heat conduction", *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 34-11, 2911-2919
- [20] Lima, A.E., Bruno, A.C. ve Szczupak, J. 1999. "Two-dimensional spatial frequency response of SQUID planar gradiometers", *Superconductor Science and Technology*. 12-11, 949
- [21] Kusiaka, A. Ve Jean-Luc Battaglia, J. 2005. "Tool coatings influence on the heat transfer in the tool during machining" *Surface and Coatings Technology*. 195, 29-40
- [22] Carvalho, S.R., Lima e Silva, S.M.M., Machado, A.R. ve Guimaraes, G. 2006. "Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder", *Journal of Materials Processing Technology*, 179, 97-104
- [23] Huang, C. H., Jan, C. J., Li, R. ve Shih A. J., 2007. "A Three-Dimensional Inverse Problem in Estimating The Applied Heat Flux of a Titanium Drilling – Theoretical and Experimental Studies" .*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3265 – 3277.
- [24] Gostimirović, M., Sekulić, M., Kopač, J. ve Kovač, P. 2011. "Optimal control of workpiece thermal state in creep-feed grinding using inverse heat conduction analysis" *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 57-10, 730-738
- [25] Watanebe, K., Yokoyuma K., and Ichimaya. R., *Thermal Analyses of the Drilling Process*. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 1977, Vol.11, No.2., pp 71-77 ISSN 0582-4206
- [26] Bono, Matthew, and Jun Ni. The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, Vol. 41, Issue 15, December 2001, pp 2261-2270. ISSN 0890-6955
- [27] Kalidas, S., Kapoor S. G., and Richard E. DeVor. Influence of Thermal Effects on Hole Quality in Dry Drilling, Part 1: A Thermal Model of Workpiece Temperatures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, April 2002, Vol. 124, No 2, pp. 258-266. ISSN 1087-1357
- [28] Tai, B. L., Stephenson, D. A., and Shih, A. J. An Inverse Heat Transfer Method for Determining Workpiece Temperature in Minimum Quantity Lubrication Deep Hole Drilling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, April 2012, Vol.134, No.2, ISSN 1087-1357
- [29] Bono, M. and Ni J. 2001. "The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41(15): 2261-2270. doi:10.1016/S0890-6955(01)00047-5
- [30] Armarego, E. J. A., and J. D. Wright. Predictive models for drilling thrust and torque—a comparison of three flank configurations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1984, Vol. 33, Issue 1, pp 5-10. ISSN 0007-8506
- [31] Altintas, Y.: *Manufacturing Automation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00148-0
- [32] Budak, E., J. Armarego A., and Altintas Y.. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of engineering for industry*, Vol. 118, Issue 2, May 1996, pp. 216-224. ISSN 0022-0817

KESİCİ TAKIM TEKNOLOJİSİ – 1

AL 7050 MALZEMEDE İÇ ÇAP EZME TAKIMI KULLANIMININ YÜZEY KALİTESİNE VE DELİK GEOMETRİSİNE ETKİSİ

Tamer Cobanoğlu^a, Sabri Öztürk^b

a, Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., Ankara/TÜRKİYE, tcobanoglu@tai.com.tr

b, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Bolu/TÜRKİYE,

Özet

Havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan Al 7050 malzemesi ile üretilen yapısal bağlantı elemanlarında yer alan yatak çaplarının hem yorulma direncinin hem de yüzey kalitesi ile delik geometrisinin iyi olması beklenir. Kritik öneme sahip yapısal bağlantı parçalarında delik yüzey kalitesini arttırmak için raybalama, honlama, taşlama gibi talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Teknolojideki son gelişmelerle birlikte ezme takımlarının kullanımı da büyük oranda artmıştır. Bu çalışmamızda, iç çap ezme takımının, uçak kanatçığında kullanılan yapısal bağlantı parçasının yatak çapı yüzey kalitesine ve delik geometrisine olan etkileri araştırılmış ve ezme işleminin yüzey kalitesi üzerinde klasik yöntemlere göre çok daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Ezme, parlatma, yüzey pürüzlülüğü, delik geometrisi

THE EFFECTS OF INTERNAL ROLLER BURNISHING TOOL ON SURFACE QUALITY AND HOUSING GEOMETRY OF AL 7050 MATERIAL

Abstract

Aluminum 7050 material is widely used in aerospace industry and it is expected that the structural parts made from Al 7050 should have high fatigue resistance, good surface quality and fine housing geometry. Surface finish methods like reaming, honing and grinding can be used in order to increase the housing surface quality of the critical structural parts. Today with the technological developments, the usage of internal roller burnishing tools as a finish operation is increasing. In this study, the effect of the internal roller burnishing tool on surface quality and housing geometry of the structural part of an aileron were investigated and it was seen that surface quality was better than the classic surface finish methods.

Keywords: Burnishing, surface roughness, housing geometry

1. GİRİŞ

Talaşlı imalat yöntemleriyle günümüzde kullanılan birçok parçanın istenilen yüzey, boyut ve şekil kalitesinde olması için, yüzeylerinin bir kısmı veya tamamı işlenmektedir. Bu durum talaşlı imalatın önemini ortaya koymaktadır. Talaşlı imalat yöntemiyle birçok metal ve alaşım işlenebilmektedir. Özelliklerinden dolayı alüminyum, farklı alanlarda kullanılabilen mühendislik malzemelerinden biridir. Uçak, silah, otomotiv, uzay, eşya, inşaat, ısıtma-soğutma vb. sanayinin birçok alanında alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Alüminyum ağırlıkça hafif olduğundan, alaşımları yapı çeliklerinden daha fazla özgül mukavemete sahiptir [1].

Alaşımlandırma ile yüksek dayanımlı ve kolay işlenebilen alaşımlar geliştirilmiştir. Alüminyum alaşımlarının işlenmesi için birçok araştırma yapılmıştır. Bunlardan birin de AA 2024 alüminyum alaşımının kuru olarak tornada delme işleminde, işleme parametreleri ve kesici takım çeşidinin aşınma mekanizmalarına etkisi incelenmiştir. Kuru delme şartlarının, delik çapında sapma ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha uygun olduğu belirtilmiştir [2].

Delik ve işleme kalitesini geliştirmek için kullanılan yöntemlerden biri de iç çap ezme yöntemidir. Bu yöntem sayesinde deliklere son bitirme işlemi yapılmaktadır. Çelik malzemenin ezme takımı ile işlenmesi araştırılmış ve yüzey kalitesinin iyileştiği belirtilmiştir [3]. Orta karbonlu çelik malzemede farklı hızlarda iki adet ezme takımı ile çalışmalar yapılmış ve yüzey pürüzlülüğü ve sertliği araştırılmıştır [4].

AA 2014 ile yapılan tornalama çalışmasında yeni bir ezme takımı kullanılmış, yüzey kalitesi ve sertliği açısından başarılı sonuçlar elde edilmiştir [5]. Aynı araştırmacılar [8] titanyum alaşımının işlenmesinde ezme yöntemini kullanmışlardır.

Ezme işlemi, sertlikte artış ve optimum yüzey pürüzlülüğü gibi ek avantajlar sağladığı için yüzey bitirme işlemi olarak her geçen gün artarak kullanılmakta ve makine parçalarının performanslarında artan talepleri karşılamada popüler hale gelmektedir [10].

Metal ve alaşımlarının delik işleme yöntemleri olan; matkapla delme, tornada delik işleme, raybalama, delik taşlama, honlama yöntemleri ile işlenmeleri sonucunda istenen özelliklerde dairesel yüzeyler elde etmek oldukça güçtür.

Alüminyum alaşımları sıklıkla uçak sanayiinde kullanılmaktadır. Kullanılan parçalar yüksek boyut hassasiyetine sahiptir. Bu yüzden parçaların işlenmesi önem arz etmektedir. Parçalarda çok sayıda delik bulunmaktadır. Delikler birçok parçayı birleştiren boşluklar olduğundan hassas bir şekilde işlenmesi gerekmektedir. Bunun için birçok deneme ve çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada 63.5 mm çapında Al 7050 malzeme için iç delik ezme takımı kullanılmıştır. Deliklerin hassasiyeti ve geometrisi klasik yöntemlerle yapılan delme işlemiyle karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME VE METOT

Test parçası, kanatçık üzerinde kullanılan yapısal parça esas alınarak, Al 7050 malzemedan imal edilmiştir. Kullanılan Al 7050 malzemenin özellikleri Çizelge 1’ de görülmektedir.

Çizelge 1. Al 7050 Kimyasal özellikler

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Zr%	Ti%
0,12	0,15	2,0-2,6	0,010	1,9-2,6	0,04	5,7-6,7	0,08-0,115	0,06

Malzemeye T7451 ısıl işlemi uygulanmıştır. T7451 ısıl işlemli malzemeye ait mekanik özellikler Çizelge 2’de verilmiştir.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

T7451 ısıtılma işlemi, çözültüye alma ve su verme işlemlerinin ardından gerilim giderme ve yapay yaşlandırma (çökeltme) işlemlerini kapsar. Uygun sıcaklıkta belli süre ısıtılan alaşım homojen yapıya ulaştıktan sonra su vererek sıcaklık ani olarak oda sıcaklığına düşürülür ve sonrasında malzemeye gerilim giderme işlemi uygulanır. Ardından çökeltme ısıtılma işlemi uygulanarak mukavemet değeri artırılır.

Çizelge 2. Al 7050-T7451 malzeme mekanik özellikleri

Durum	Çekme Mukavemeti	Akma Mukavemeti	Uzama %
	MPa	Mpa	
T7451	510	441	9

Test parçalarının ezme işlemi için konvansiyonel freze tezgahı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Mitutoyo SJ210 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı, delik çaplarının ölçüm işlemleri için iki ayaklı Bowers marka iç çap mikrometresi kullanılmıştır.

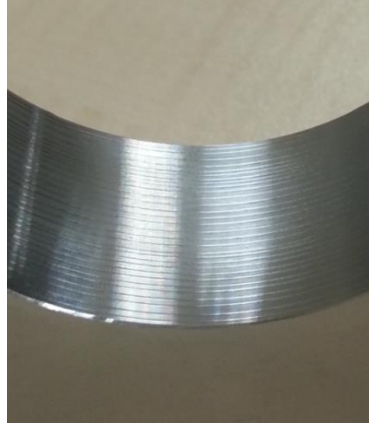
Ezme takımları kendinden beslemeli ve makinadan beslemeli olmak üzere iki farklı tasarıma sahiptir. Kendinden beslemeli takımlarda tezgah ilerlemesi devre dışı bırakılır ve yalnızca dönme hareketi verilir. Bu sayede, ezme takımının malzeme içine giriş anından itibaren ilerleme hareketi takım sayesinde gerçekleştirilir. Makinadan beslemeli ezme takımlarında ise ilerleme hareketi tezgahın ilerleme hareketi ile sağlanmaktadır. Test çalışmaları sırasında kendinden beslemeli ezme takımı kullanılmış ve tezgahın ilerlemesi devre dışı bırakılmıştır.

2.1 Ezme öncesi yüzey hazırlığı

- 120 x 120 mm ebatlarındaki test parçası tezgah tablasına bağlanmıştır (Şekil 1).
- Test parçası son çap ölçüsüne göre 59,98 mm olacak şekilde kaba işlenmiştir.
- Ezme öncesi, yüzeyi ezmeye uygun hale getirmek için son paso alınırken, tezgah ilerlemesi 0,3-0,4 mm/dev olarak ayarlanmıştır.
- Son paso verilirken iş parçası, resim toleransından 0,04-0,06 mm kaba olacak şekilde işlenmiştir.
- Yüzey kalitesi Ra 1,8 – 2,4 µm olacak şekilde ayarlanmıştır (Şekil 2).



Şekil 1. Test parçasının freze tezgahı tablasına bağlantısı



Şekil 2. Test parçasının ezme işlemi öncesi yüzey pürüzlülüğü

2.2 İç çap ezme işlemi

Ezme öncesi hazırlıkların yapılmasından sonra test parçası tablaya bağlı durumdayken, iç çap ezme takımı tezgahın iş miline bağlanmıştır. İş milinin ilerlemesi devre dışı bırakılarak, takımın kendinden besleme özelliğinin kullanılması sağlanmıştır. Tezgah devri 150 dev/dk olarak ayarlanmıştır. İç çap ezme takımı Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. İç çap ezme takımı

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Testler 10 farklı ezme miktarı için yapılmıştır ve her test sonrasında deliğin çap, ovallik, koniklik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Sonuçlar Çizelge 3’de verilmiştir.

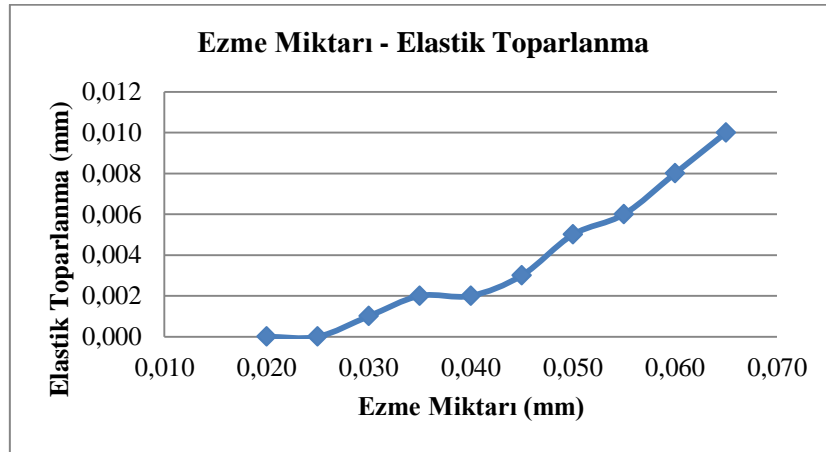
Çizelge 3. Test sonuçları

Ezme Miktarı (mm)	Çap değeri (mm)	Ovallık (mm)	Koniklik (mm)	Yüzey pürüzlülüğü Ra (μm)
0,020	60,000	0,001	0,001	0,330
0,025	60,005	0,001	0,002	0,260
0,030	60,009	0,002	0,002	0,200
0,035	60,013	0,001	0,003	0,150
0,040	60,018	0,003	0,002	0,120
0,045	60,022	0,002	0,004	0,100
0,050	60,025	0,003	0,005	0,085
0,055	60,029	0,003	0,005	0,080
0,060	60,032	0,003	0,006	0,085
0,065	60,035	0,004	0,005	0,080

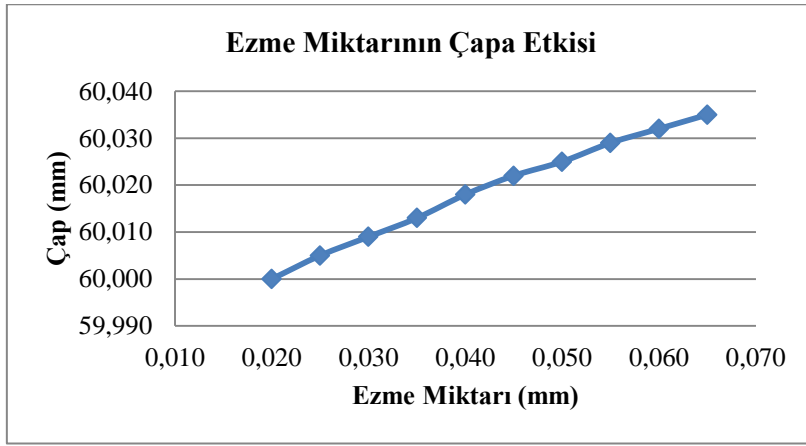
Ezme işlemi temelinde bir çeşit soğuk şekil verme işlemidir. Ezme sırasında malzemede plastik deformasyon oluşmakta, ezme kuvvetinin işlem sonunda ortadan kalkmasından dolayı malzemede elastik toparlanma meydana gelmektedir. Bu elastik toparlanma miktarı, ezme takımının ayarlandığı çap ile ezme sonrasında ölçülen çap değeri arasındaki fark olarak hesap edilmiştir.

3.1 Ezme miktarının çap değerine etkisi

Ezme miktarının 0,020 mm olması durumunda, yüzeyde oluşturulmuş tepelerin düzlenmesi işlemi yalnızca bu bölgeye etki etmektedir ve ana malzeme üzerinde bir etkisi olmamaktadır. Bu sayede elastik toparlanma durumu meydana gelmemektedir. Ezme miktarı arttıkça etki ana malzemeye ulaşmakta ve basıncın kalkması ile birlikte ana malzemede bir elastik toparlanma oluşmaktadır (Şekil 4). Ezme miktarı 0,065 mm olduğunda elastik toparlanma 0,01 mm olarak ölçülmüş ve bu da çap değerine etki etmiştir. Bundan dolayı ezme miktarının belirlenmesi sırasında, mutlaka miktara bağlı olarak ana malzemede gerçekleşecek olan elastik toparlanmanın da hesaba katılmasının gerekli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Ezme miktarına göre çap değerleri Şekil 5’de görülmektedir.



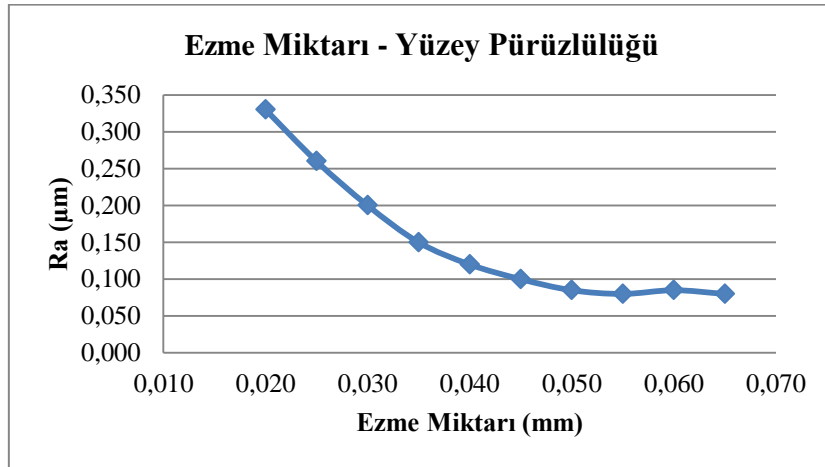
Şekil 4. Ezme miktarına göre oluşan elastik toparlanma



Şekil 5. Ezme miktarına göre çap değerleri

3.2 Ezme miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Ezme miktarının artması ile birlikte basınç artmakta ve bunun sonucunda da ezme etkisi yüzeyden aşağılara doğru etki etmektedir. Etki alanı artması sonucunda yüzeyde oluşturulan tepelerin düzlenmesi sonrasında ana malzemeye de etki etmesi ile yüzey kalitesinde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir [10]. Belirli bir ezme değerinden sonra yüzey kalitesinde artış olmamakta ve sabitlenmektedir. Düşük ezme değerlerinde ise yüzey pürüzlülüğü daha yüksek çıkmaktadır (Şekil 6). Bunun sebebi de, ezilen yüzeyde çukurcukların tamamının dolmamasıdır.



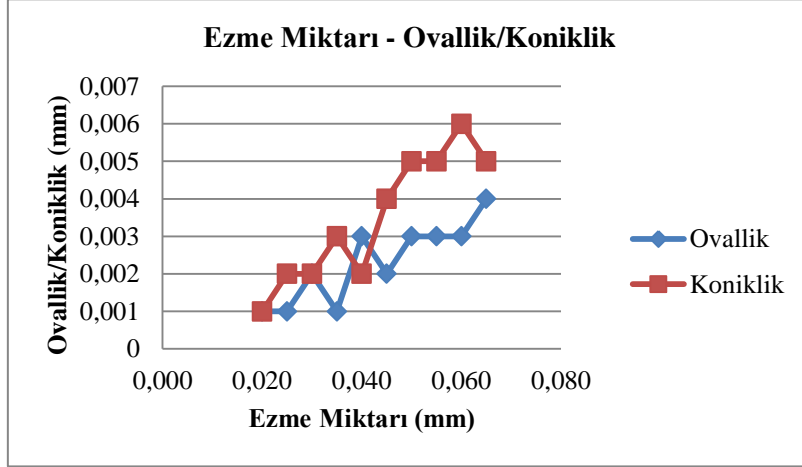
Şekil 6. Ezme miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi



Şekil 7. Ezme sonrası yüzeyden görüntü

3.3 Ezme miktarının delik ovalliğine ve konikliğine etkisi

Ezme işlemi sırasında takımın deliğe girişinden itibaren tüm iç çap boyunca kendini yataklayarak ilerlemesi sayesinde, çapta ovallik ve koniklik oluşumunun çok küçük değerlerde olduğu görülmüştür. Şekil 8'den de görüldüğü üzere ovallik ve koniklik değerleri en fazla 0,006 mm ölçülmüştür. Buna etki eden sebebin, yapısından dolayı takımın deliğin içinde kendini yataklamasıdır.



Şekil 8. Ezme miktarının ovallik ve konikliğe etkisi

3.4 Ezme işleminin malzeme yapısına ve kalıcı gerilmelere etkisi

Ezme işlemi soğuk şekil verme işlemlerinden olup malzeme üzerinde plastik deformasyon oluşturur. Ezme yüzeyinde çekme ve basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Yüzeyde basma gerilmeleri ve hemen altında çekme gerilmeleri oluşur. Yüzeydeki basma gerilmeleri sertlik artışı meydana getirdiği gibi malzemenin yorulma dayanımını da artırır [10]. SEM analizinin yapıldığı çalışmada [11] ezme kuvvetinin belirli bir değerin üzerine çıkması ile malzeme yüzeyinin iç yapısında katmanlar arasında ayrılmalar olduğu görülmüştür. Malzeme tipine göre optimum ezme oranının belirlenmesi bu tür iç yapı kusurlarının oluşmasını engellemek için önemli olmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, iç çap ezme takımı kullanılarak, Al 7050 T7451 malzemeden yapılmış test parçaları üzerinde yer alan 60 mm çapındaki deliğe, son yüzey işlemi olarak ezme işlemi uygulanmıştır. Ezme miktarının yüzey pürüzlülüğü, çap değeri, ovallik ve koniklik üzerine etkileri araştırılmıştır.

- Ezme miktarının 0,020 mm'den 0,065 mm'ye değişimi ile yüzey pürüzlülüğünde 0,330 μm 'den 0,080 μm 'ye düşüş gerçekleşmiştir.
- Ezme miktarının artışı ile ezme basıncı artmakta ve ezme etkisi derinliği artmakta, bundan dolayı elastik toparlanma meydana gelmektedir.
- Ezme miktarı artması çap değerinin artmasına sebep olmakta, bu da deliğin çıkış tarafında talaş yığılmasına sebep olmaktadır.
- Ezme miktarının ovallik ve koniklik üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür.
- Ezme işlemi sırasında yağ kullanılması yüzey kalitesini iyileştirmektedir.
- Ezme öncesi yüzey pürüzlülük değerinin düşük olması durumunda ezme işleminin etkisi daha az olmaktadır. Ezme işlemi yüzeydeki tepelerin yatırılması ile gerçekleştiğinden ezme oranının fazla olması durumunda da ezme sonrası yüzey pürüzlülüğü istenen kalitede olmamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Smith, W.S. 2001. “Çeviri: Mehmet Erdoğan. Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri”, Nobel Yayın Dağıtım, cilt 2, s.318- 602.
- [2] Nouari, M., List, G., Girot, F., Gehin, D. 2005. “Effect of Machining Parameters and Coating on Wear Mechanisms in Dry Drilling of Aluminium Alloys”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, cilt 45, s. 1436-1442.
- [3] Stoic, Antun, et al. 2010. “An investigation of machining efficiency of internal roller burnishing”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, cilt 40.2, s. 188-194.
- [4] Babu, P., Ravindra, et al. 2009. “ Effect of internal roller burnishing on surface roughness and surface hardness of mild steel”, Journal of Scientific and Industrial Research, cilt 68, s.1-29.
- [5] El-Axir, M. H., Othman, O. M., Abodiena, A. M. 2008. “Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process”, Journal of Materials Processing Technology, cilt 196.1, s. 120-128.
- [6] Steusloff, A., Steusloff, H. 1974. “Apparatus for boring and burnishing internal cylindrical surfaces of metallic workpieces”. U.S. Patent No 3,795,957.
- [7] Yeldose, B. C., Ramamoorthy, B. 2008. “An investigation into the high performance of TiN-coated rollers in burnishing process”, Journal of Materials Processing Technology, cilt 207.1, s. 350-355.
- [8] El-Axir, M. H., Othman, O. M., Abodiena, A. M. 2008. “Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing process”, Journal of Materials Processing Technology, cilt 202.1, s. 435-442.
- [9] Drechsler, A., Kiese, J., Wagner, L. 1999. “Effects of shot peening and roller burnishing on fatigue performance of various titanium alloys”, Shot Peening, Institute of Precision Mechanics, Warsaw, Poland, s.145-152.
- [10] Cobanoglu, T., Ozturk, S. 2015. “Effect of burnishing parameters on the surface quality and hardness”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, cilt 229.2, s.286-294.
- [11] Gharbi, F., Sghaier, S., Al-Fadhalah, K.J. 2010. Benameur, T. “Effect of burnishing process on the surface quality and microstructure properties of AISI 1010 steel plates”, Journal of Materials Engineering and Performance, cilt 20.6, s.903-910.

ALUMİNYUM ALAŞIMLARINDA ÇAPAKSIZ İMALATIN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Zeynep Eymur^a, Erdem Turfan^a, Arda Özgen^a, Akın Gürsoy^a
Veli Naksiler^b, Anıl Sonugür^b ve Emre Özlü^b

a, ASELSAN A.Ş., P.K. 106172, Yenimahalle / Ankara, Türkiye,

eymur@aselsan.com.tr, meturfan@aselsan.com.tr, ardaozen@aselsan.com.tr, gursoy@aselsan.com.tr

b, Maksima İmalat ARGE Ltd. Şti, GOSB Teknopark, Gebze, Kocaeli, Türkiye

veli@maxima.com.tr, anil@maxima.com.tr, emre@maxima.com.tr

Özet

Bu projede, AL6061 parçalar üzerinde frezeleme ve delik delme operasyonları sırasında oluşan ve üretim verimliliğini düşüren çapakları önlemek için yapılan çalışmalar sunulmuştur. Çalışmalar işleme parametrelerinin en iyilemesi, takım yolu stratejilerinin en iyilemesi, özel takımlar ve parça üretimi olmak üzere dört grupta toplanmıştır. Takım, takım yolu ve işleme parametrelerinin en iyilemesi adına ön testler gerçekleştirilmiş sonrasında da elde edilen parametrelerle çeşitli numuneler üzerinde deneme kesimleri yapılmıştır. İşleme sonrası parça kenarlarında kalan çapakları temizlemek için de farklı tiplerde pah kırma takımları denenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu çapaksız parça üretiminde %85'e yakın başarı kaydedilmiştir. Tüm bu çalışmalardan alınan sonuçlar neticesinde çapaksız imalat için izlenmesi önerilen adımlar listesi oluşturulmuştur.

Anahtar kelimeler: çapaksız imalat, süreç en iyilemesi, takım yolu en iyilemesi

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE BURR-FREE MACHINING OF ALUMINUM ALLOYS

Abstract

In this study, process optimization and toolpath strategies are developed to eliminate the burrs formed during the milling and drilling of AL6061 Aluminum alloy. The studies are gathered in four groups as optimization of tool and process parameters, optimization of toolpath (cutting) strategy, special tools, and part production. To optimize the tool geometry, tool path and cutting parameters, pre-cutting tests are conducted and obtained values are applied on an industrial part. Moreover, a new cutting strategy is developed to eliminate the burrs on the edges of the parts. To eliminate the burrs left on the edges of the part, chamfer tools with different type are used. As a result, close to 85% success is obtained at the burr free production. All the suggested methods and strategies are presented in a methodic order for burr free production.

Keywords: burr-free production, process optimization, toolpath optimization,

1. GİRİŞ

Günümüzde özellikle yüksek hassasiyet gerektiren operasyonlarda çalışan teçhizatlar ve bu teçhizatlarda kullanılan parça sayısının artması, kullanılan parçaların yüzey kalitesi ve ölçü toleranslarının tatmin edilmesi gibi parametreleri oldukça önemli kılmıştır. Hassas operasyonlar için talaşlı imalat yöntemleri ile imal edilen parçalarda geometrik ölçü toleransları kadar yüzey kalitesinin de önemi bulunmaktadır. Yüzey kalitesi, üretilen parçaların dış etkilere karşı direnci, mekanik ömrü ve makina içerisinde gerektiği şekilde çalışmasını direkt olarak etkilemektedir. Yüzey kalitesine işleme sürecinin yanı sıra etki eden diğer faktörde çapak oluşumudur. Çapakların imalatı tamamlanmış parçanın üzerinden kaldırılması işlemi ise “çapak alma” olarak adlandırılmaktadır. Çapak, keskin bir köşede ince bir şerit halinde olabileceği gibi yüzeyde bir çıkıntı formunda da olabilir. Deliklerde oluşan çapaklar genellikle malzeme ve bağlama sorunlarına sebep olurlar. Çapaklar deliklerin çıkış noktalarında daha fazla baskı oluşmasına sebep olarak çatlama dayanımı ve yorulma ömrünü ciddi derecede azaltırlar ve montaj sırasında parçalara zarar verebilirler. Frezeleme veya tornalama ile üretilmiş ve çapakları temizlenmemiş parçalar hareketli bölgelerde çalışıyorlar ise istenmeyen sürtünme durumları ve yüksek sıcaklık değerleri ortaya çıkarabilmektedirler. Çapaklar, tribolojik açıdan da oldukça zararlıdır, makina elemanlarının arasına gerektiği kadar yağ girişini engellemekte ve parça ömrünü azaltmaktadırlar.

Çapak oluşumunun azaltılması veya engellenmesi, yukarıda bahsedilen sorunları engellemek açısından büyük önem taşımaktadır. Çapak oluşumunun engellenmesi, parça tasarımından başlayarak, imalat sürecinin son adımına kadar devam eden bir süreçtir.

Literatürde, bu amaçları sağlamak ve çapaksız imalata erişebilmek adına yapılmış birçok çalışma ve araştırma bulunmaktadır. Çapak oluşumu, mekaniği ve önleme metotları ile ilgili olan çalışmalar Tablo 1’de 6 başlık olarak kaynaklarıyla sınıflandırılmıştır.

Tablo 1: Çapak oluşumu, mekaniği ve önleme metotları ile ilgili olan çalışma sınıfları

#	Çalışma Sınıfları	Kaynak
1	Parça tasarımı ve takım yolu çıkarılışı sırasında izlenebilecek metodları içeren çalışmalar	[1, 2]
2	Çapak oluşumunun ve engellenmesinin daha iyi anlaşılabilmesi adına yapılmış deneysel metodları içeren çalışmalar	[3, 4, 9]
3	Sonlu elemanlar yöntemi ile farklı kesici takım-iş parçası eşleşmeleri için çapak oluşum sürecini analiz eden çalışmalar	[12, 13, 14]
4	Çapakların imalat sırasında oluşum sürecini inceleyen ve malzeme özelliklerini dikkate alan çalışmalar	[8, 15]
5	Çapak oluşum sürecini analitik olarak modelleyen ve imalat süreci öncesinde simülasyonlar yapılmasını sağlayan çalışmalar	[5-7, 10, 16, 19]
6	Genel olarak birçok yöntemi özetleyen ve çapak alma&önleme teknolojilerinin geldiği son noktayı içeren araştırma çalışmaları	[11, 17, 18]

Yapılan çalışmalar, çapak oluşumuna takım aşınmasının negatif yönde, kesici uç yarıçapının sivri olmasının da pozitif yönde etkisi olduğunu göstermektedir. Parça tasarımının da çapak oluşumunda etkili olduğu ve tasarım aşamasında profil dönüş açılarının önemli olduğu belirtilmiştir..

Delik delme operasyonunda genellikle deliğin giriş ve çıkışlarında çapak oluşumu gözlemlenmektedir. Deliğin giriş kısmında gözlemlenen plastik deformasyon ve kesici ucun malzemeyi talaş şeklinde kaldıramaması, bu bölgedeki çapak oluşumlarının ana sebebi olarak ele alınabilir. Delik çıkışında ise malzemenin dışa doğru uzaması ve yine kesici ucun bu kısmı talaş olarak kesememesi üzerine çapaklar oluşmaktadır. Çalışmalar genellikle çıkış bölgesindeki çapaklar üzerine yoğunlaşmıştır. Çıkış çapakları, giriş çapaklarına göre çok daha ciddi boyutlardadır ve parçanın performansı açısından daha ciddi sorun teşkil ederler. Literatürde delik delme sonrası oluşan çapakların ortadan kaldırılması için çok çeşitli çalışmalar sunulmuştur. Biermann, D. ve Hartman, H. [20] kriyojenik soğutma, İşbilir ve Ghassemieh, E. [21] sonlu elemanlar analizi, Pilny, L. De Chiffre, L. Piska, M. Villumsen, M. F. [22] süreç optimizasyonu, Chang, S. S. F. Bone, G. M. [23] ultrasonik vibrasyonu kullanarak çapak oluşumunu azaltıcı yönde çalışmalar yapmışlardır. Bunların yanında mikro boyutta çapak oluşumunu ve delikleri inceleyen çalışmalarda literatürde mevcuttur [24-26]. Bazı araştırmacılar matkap

geometrisini değiştirip çapak oluşumuna etkisini incelemişlerdir [27-29]. Chang, S. S. F. ve Bone, G. M. [30] tarafından gerçekleştirilen modelde oluşan çapağın uzunluğu hesaplanmaya çalışılmıştır. Bir başka çalışmada geliştirilen modelle sünek malzemelerin delik çıkışlarında oluşan çapak tipi hesaplanmaya çalışılmıştır [31].

Bu çalışmalardan özetle kaplamalı ve kaplamasız takımlar arasında fazla bir fark gözlenmemiştir. Kesme hızının çapak oluşumuna kayda değer bir etkisi olmadığı fakat ilerleme ve delik derinliği gibi işleme parametrelerinin etkilerinin değiştiği görülmüştür. Matkap uç açısının optimize edilmesinin çapak oluşumuna pozitif yönde etki ettiği gözlenmiştir. Delik giriş ve çıkışlarında farklı ilerleme ve kesme hızı kullanılması da çapak oluşumunu etkilemiştir. Deliği tek seferde açmak yerine farklı matkaplar ile birkaç seferde genişletmenin de giriş ve çıkıştaki çapaklarını azalttığı görülmüştür.

Bu çalışmada örnek endüstriyel parça geometrisinin karmaşık olması kullanılan takım sayısını arttırmıştır. Kesme parametreleri içinde iş mili devri maksimum 10,000 devir/dakika olarak seçilmiş ve bu devrin üzerine çıkılmamıştır. Parça üzerinde geliştirilen takım yolu, işleme stratejisi, takım tasarımı ve çapaksız imalatın metodik bir şekilde genelleştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Ayrıca ulaşılması ve temizlemesi zor geometrilere oluşan çapaklar için özel takımlar kullanılmıştır.

2. İŞLEME PARAMETRELERİNİN EN İYİLEMESİ

Kesme parametreleri belirlenirken önceki tecrübelerden, takımların katalog değerlerinden ve tezgâhların limitlerinden yola çıkılmıştır. Belirlenen parametrelerden bir deney matrisi oluşturulmuş ve bu değerlerle deneme kesimleri yapılmış ve kesme parametrelerinde doğrulamaya gidilmiştir. Testlerde iş mili devri olarak 10,000 dev/dk kullanılmıştır. Üretimi istenen örnek parça üzerindeki en zor bölgelerden biri 1 mm genişliğindeki yarıklar olduğundan bu yarıkların işlenmesi sırasında kullanılacak olan 0.8 mm çaplı freze ile testler yapılmıştır. Delikler için parametre en iyilemesi yapılırken $\varnothing 1.4$ mm çaplı delik baz alınarak testler yapılmıştır. Aşağıdaki Tablo 1 de belirtilen değerlerle düz kanal kesimleri yapılmış ve kanalların giriş ve çıkışlarındaki çapak oluşumu ve yüzeyler incelenmiştir.

Tablo 2 : Freze operasyonları için kesme parametreleri deney matrisi

Takım	Devir	İlerleme	Derinlik	KANAL	KANAL
Freze (\varnothing)	dev/dk	mm/dk	ap (mm)	GİRİŞ	ÇIKIŞ
0,8 mm 2 Ağızlı karbür takım	10000	1000	0,010	√	√
			0,020	√	√
			0,030	√	X
			0,040	X	X
			0,050	X	X
			0,060	X	X
		1500	0,010	√	√
			0,020	√	√
			0,030	X	X
			0,040	X	X
			0,050	X	X
			0,060	X	X
		2000	0,010	√	√
			0,020	√	√
			0,030	X	X
			0,040	X	X
			0,050	X	X
			0,060	X	X
		3000	0,010	√	√
			0,020	√	√

√ : Çapak Boyu < 5 μ m X: Çapak Boyu > 5 μ m

Kesme parametrelerinin belirlenmesi sırasında sadece bir markanın takımını kullanılmış ve deneme kesimleri sırasında farklı marka takımlar kullanılarak takım karşılaştırması yapılmıştır.

3. TAKIMYOLU STRATEJİLERİNİN EN İYİLEMESİ

Kesme parametrelerini en aza indirmek adına yapılan kanal kesimleri sonrasında bir takım veriler elde edilmiştir. Fakat sadece kesme parametrelerini kullanarak çapaksız parça imalatı mümkün değildir. Bu amaçla çeşitli takım yolu stratejileri geliştirilmiş ve mevcut stratejilerle ve kesme parametreleriyle en iyi sonucu elde etmek adına bir deney matrisi oluşturulmuştur. Aşağıdaki Tablo 2’de gösterilen deney matrisindeki bazı parametrelere açıklık getirmek adına ;

- *Helisel*: Takım parça ile temas ettikten sonra parça yüzeyinden ayrılmadan kesme işlemini tamamlar. Takım kesme işlemi boyunca yüzey ile sürekli temas halindedir.
- *Düz*: Takım belirlenen ap değeri kadar kesme işlemi yaptıktan sonra kesme yüzeyinden ayrılıp tekrar kesme işlemine başlar. Takım her kademedede yüzeye tekrar girer.
- *Kademeli*: İşlenecek duvar yüzeyinin ilk 0,1 mm’lik kısmının 25 mikron ya da daha küçük aralıklarla işlenmesidir.

Şekil 1’ de iki farklı markaya ait freze takımlarının aynı parametrelerle açılan yarıkların 70x büyütme ile alınmış fotoğraflarında çapak dağılımları gösterilmiştir. A Marka takımın daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



(a)

(b)

(c)

Şekil 1 : Aynı kesme parametrelerinde yarıklardaki çapak oluşumu a)Yarı finişsiz (A Marka takım) b) Yarı finişsiz (B Marka takım) c) Yarı finişli (A Marka takım)

Yapılan testler neticesinde düz ve helisel takım yolları arasında çok fazla fark olmamasına karşın kademeli yapılan kesimlerde ve A Marka takımlarda daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3: Freze operasyonları için takım yolu stratejileri deney matrisi

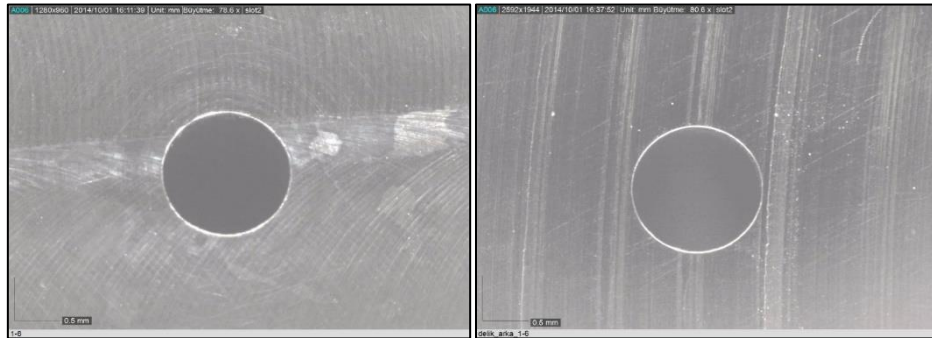
Devir	Takım1	Takım2	İlerleme	Takım Yolu		Yanal Finiş Pasosu (ae)	Eksenel İlerleme (ap)	Takım	Sonuç			
dev/dk	A	B	mm/dk									
10000	Ø0,8	Ø0,8	500	helisel	kademeli	0,025	0,010*10 - 0,05	A	X			
								B	X			
							0,010*10 - 0,1	A	X			
				B				√				
				0,010*10 - 0,05			A	X				
							B	X				
			0,010*10 - 0,1	A	X							
				B	√							
			1000	Ø0,8	Ø0,8		helisel	kademeli	0,025	0,010*10 - 0,05	A	X
											B	√
										0,010*10 - 0,1	A	X
							B				X	
0,010*10 - 0,05	A	X										
	B	X										
0,010*10 - 0,1	A	X										
	B	√										
√: Çapak Boyu < 5 µm X: Çapak Boyu > 5 µm												

Freze operasyonları için parametre ve takım yolu stratejilerini belirledikten sonra delik delme operasyonları içinde benzer bir yol izlenmiştir. Delik delme işleminde çapak oluşumunu azaltıcı yönde etkisi olduğu için ön delik delme işlemi yapılmıştır. Ø1.4 delikler delinmeden önce delikler Ø1 mm matkapla delinmiş ve daha sonra Tablo 3 de belirtilen değerlerle delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Çapak oluşumunu önleyici yönde etkisi olduğu için delik girişlerinde gagalama yöntemi kullanılmıştır. İşlemlerden sonra deliklerin giriş ve çıkışlarının fotoları alınmış ve çapak oluşumları incelenmiştir. Şekil 2’de örnek olarak çapaklı ve çapaksız delikler gösterilmiştir.

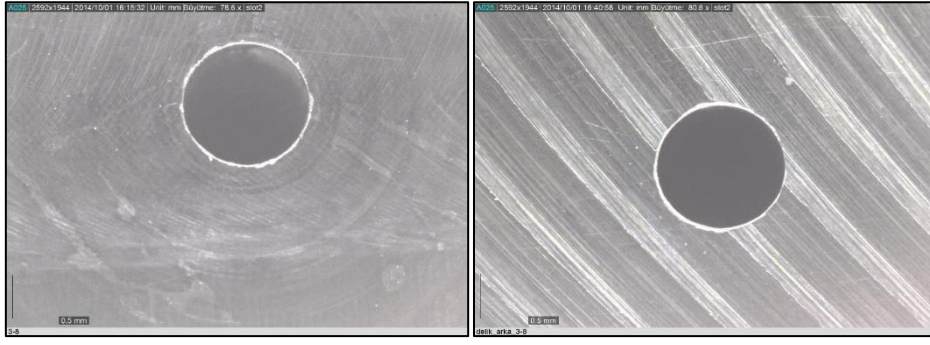
Tablo 4: Delik delme operasyonları için kesme parametreleri ve takım yolu stratejileri deney matrisi

Deney No	Devir	İlerleme	Gagalama Adımı	Adım Sayısı	Toplam İlk Giriş	Giriş Çapağı	Çıkış Çapağı
1	dev/dk	mm/dk	mm	*	mm	x	x
2	1000	50	0,025	10	0,250	x	x
3	2500	50	0,025	10	0,250	√	√
4	5000	50	0,025	10	0,250	√	√
5	1000	100	0,025	10	0,250	x	x
6	2500	100	0,025	10	0,250	x	x
7	5000	100	0,025	10	0,250	√	√
8	1000	50	0,050	5	0,250	x	x
9	2500	50	0,050	5	0,250	x	x
10	5000	50	0,050	5	0,250	√	√
11	1000	100	0,050	5	0,250	x	x
12	2500	100	0,050	5	0,250	x	x
13	5000	100	0,050	5	0,250	x	x
14	1000	50	0,100	3	0,300	x	x
15	2500	50	0,100	3	0,300	x	x
16	5000	50	0,100	3	0,300	x	x
17	1000	100	0,100	3	0,300	x	x
18	2500	100	0,100	3	0,300	x	x
19	5000	100	0,100	3	0,300	x	x
20	1000	200	0,025	10	0,250	x	x
21	1500	200	0,025	10	0,250	x	x
22	1500	100	0,025	10	0,250	x	x
23	1500	100	0,050	5	0,250	x	x
24	1000	100	0,000	1	0,000	x	x
25	1500	100	0,000	1	0,000	x	x
26	1500	150	0,000	1	0,000	x	x

√:yok x : var



a) Tablo 3-Deney No: 4 (S:5000 dev/dk, F:50 mm/dev, Gagalama Adımı: 0,025 mm)

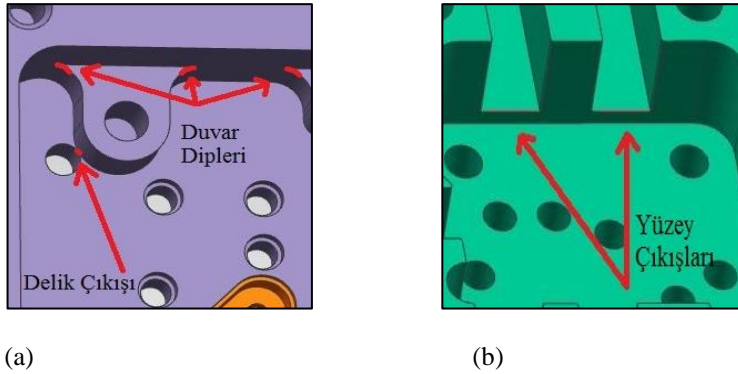


b) Tablo 3-Deney No: 21 (S:1500 dev/dk, F:200 mm/dev, Gagalama Adımı: 0,025 mm)

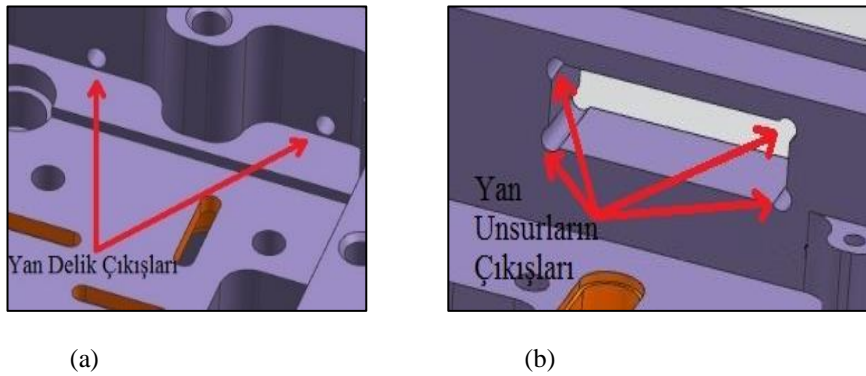
Şekil 2 a) Çapaksız delikler; delik girişi (sol resim), delik çıkışı (sağ resim) b) Çapaklı delikler; delik girişi (sol resim), delik çıkışı (sağ resim).

4. KRİTİK ÇAPAK OLUŞUMU OLAN BÖLGELER

Parça üzerinde oluşan çapakları temizlemek ya da oluşmasını önlemek adına farklı yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan en pratik ve yaygın olanlarından biri pah takımı ile kenarlarda oluşan çapakları temizlemektir. Fakat pah takımının da kısmi ulaştığı ve hiç ulaşamadığı bölgeler vardır. Bu bölgeler Şekil 3 ve Şekil 4’ de gösterilmektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında bu bölgeler için özel takımlar ve işleme stratejileri geliştirilmiştir.



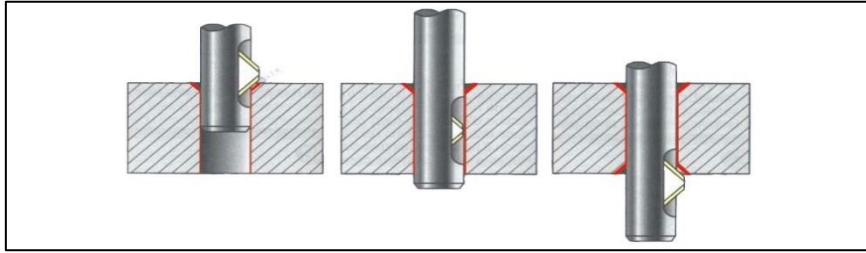
Şekil 3: Pah takımının kısmi girdiği bölgeler; a) Delik çıkışları ve duvar dipleri, b) Yüzey çıkışları.



Şekil 4: Pah takımının giremediği bölgeler a) Yan delik çıkışları, b) Yan unsur çıkışları.

5. ÇAPAK OLUŞUMUNU ENGELLEMELİK İÇİN GELİŞTİRİLEN YÖNTEMLER VE ÖZEL TAKIMLAR

Çapak oluşumunun en kritik olduğu bölgelerden ikisi delikler ve farklı geometrilerdeki unsurların giriş ve çıkışlarıdır. Delik girişlerindeki ve çıkışlarındaki çapağı önlemek için işleme stratejisi olarak ön delik delinmesinde çapak oluşumunu önleyici yönde etki vardır. Bununla birlikte kesme testleri ile uygun kesme parametreleri belirlenmesi çapak oluşumunu minimize edebilir. Bu ilk iki adım deliklerin girişlerindeki çapakları önleyici olsa da çıkışlarda alınan sonuç her zaman sıfır çapak olmayabilir. Yapılan testler de bunu göstermiştir. İşleme sonrasında sıfır çapak elde edilmek isteniyorsa 3. bir adıma geçilmelidir. Ön delik işlemi ve kesme parametreleri belirlendikten sonra delik çıkışlarındaki çapağı alabilen çift taraflı özel çapak alma takımları ile sıfır çapak elde edilebilir. Fakat bu işlem günümüzde 5 mm ve üzerindeki delikler için uygulanabilmektedir. Şekil 5’ de çift taraflı çapak alma pah kırma takımı gösterilmektedir.

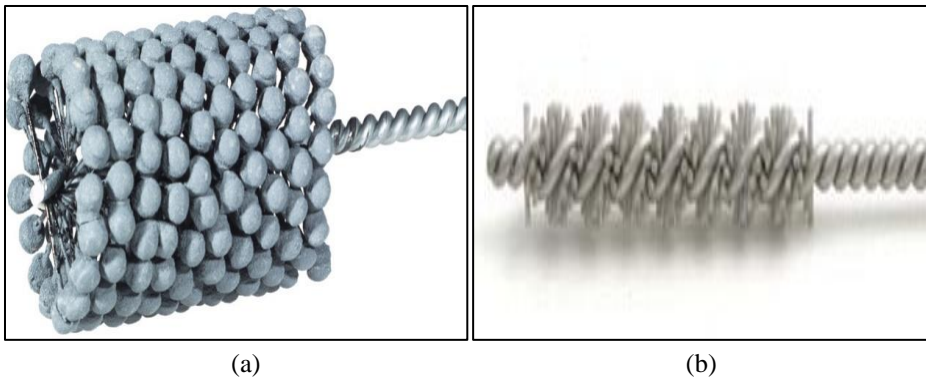


Şekil 5: Çift taraflı çapak alma pah kırma takımı.

Bu projede 5 mm den küçük deliklerin çıkışlarında, unsurların kesiştiği duvar diplerinde ve pah takımının giremediği unsurların çıkışlarında çapak oluşumunu önlemek için “*kademeli finiş*” işlemi uygulanmıştır. Bu stratejiye göre deliklerde dahil kritik bölgelerin hepsine frezeleme işlemi uygulanmıştır. Bunun için ikinci bir finiş programı oluşturulmuş ve sadece bu finiş operasyonları için ayrı bir finiş takımı kullanılmıştır. Oluşturulan yeni kademeli finiş programı çapak oluşumunu önlemesi açısından aşağıda belirtilen adımlara uygun olarak hazırlanmıştır.

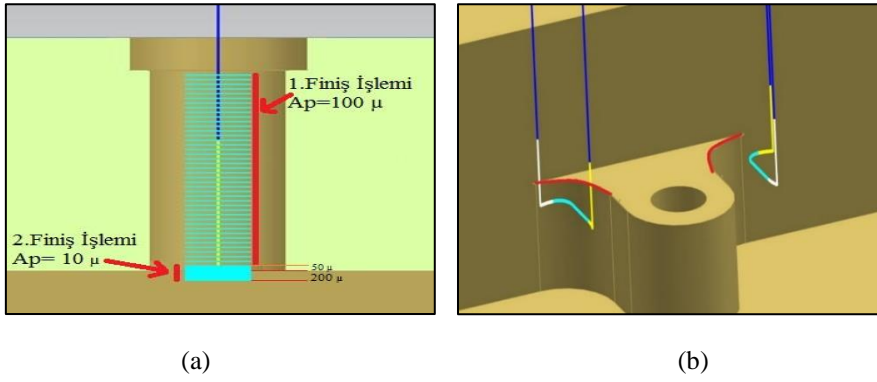
Yukarıda bahsedilen yöntemde izlenmesi önerilen adımlar şunlardır:

- 1- İlk finiş programı, unsurun ya da deliğin patladığı yüzeye 50 μm kala bitirilmelidir.
- 2- İkinci finiş programı ilk finiş programının bittiği yerden başlatılmalıdır.
- 3- İkinci finiş programında kesme derinliği (ap) değeri 10 μm 'ye düşürülmelidir.
- 4- İkinci finiş programı unsurun patladığı yüzeyden 200 μm ilerde bitirilmelidir.
- 5- Finiş işlemi sonrasında sadece $\text{Ø}4$ mm den büyük delikler için Şekil 6 (a) 'da gösterilen honlama fırçası, 4 mm den küçük delikler içinde Şekil 6 (b) 'de gösterilen minyatür fırça kullanılmalıdır. Fırçaların çapları delik çaplarından % 20-30 daha büyük seçilmelidir



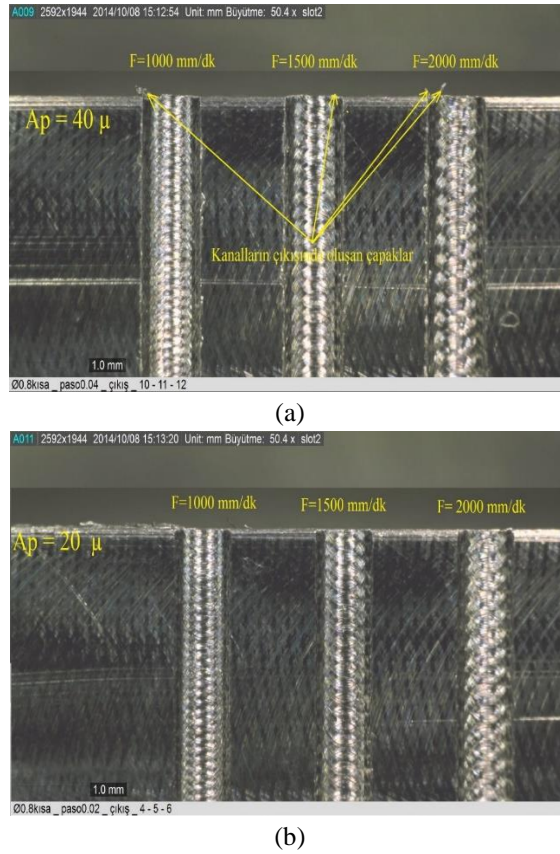
Şekil 6: (a) Honlama Fırçası $\text{Ø} > 4$ mm (b) Minyatür Fırça $\text{Ø} < 4$ mm.

Şekil 7 (a)' da parça üzerindeki bir delikten alınan kesit görüntüsünde, kademeli finiş işlemi gösterilmektedir.



Şekil 7: (a) Kademeli finiş uygulanmış delik kesiti ve takım yolu.(b) Kademeli finiş uygulanmış unsurun takım yolu, ($a_p = 10 \mu m$)

Çıkış bölgelerinde düşürülen kesme derinliği sayesinde çapak oluşumu büyük miktarda önlenmiştir. Aynı strateji, unsurların kesiştiği duvar dipleri gibi pah takımının tam olarak giremediği bölgelerde de uygulanmıştır. Şekil 7 (b)'de kademeli finiş uygulanmış bir unsurun duvarla kesiştiği bölgenin görüntüsü takım yollarıyla birlikte verilmiştir.



Şekil 8: (a) Finiş pasosu 40 µm, (b) Finiş pasosu 20 µm.

Çapak oluşumunun kritik olduğu bölgelerden bir diğeri de yüzey çıkışlarıdır. Bu yüzeylerin çıkışlarındaki çapakları önlemek için farklı finiş pasoları ile kanal kesimleri yapılmıştır. Yapılan testler sonunda en iyi sonuç 25 µm ve altı pasolarda görülmüştür. Şekil 8 'de $\varnothing 0.8 \text{ mm}$ çaplı freze takımıyla farklı yüzey pasolarında ve ilerlemelerde yüzey çıkışlarında oluşan çapaklar gösterilmektedir. Yapılan testler sonunda en iyi sonuç 25 µm ve altı finiş pasolarında görülmüştür.

Yüzeylerin bitiminde oluşan çapakların önlenmesi için 25 µm finiş pasosu bırakılmıştır fakat kaba ve finiş takımlarının farklı olması ve aynı oranla aşınmamaları gibi etkenlerden dolayı bazı yüzey çıkışlarında her zaman olmasa da çapak oluşumu gözlenmiştir. Bunun önüne geçmek ve en iyi sonucu almak için yüzey çıkışlarına da pah kırılmaya çalışılmıştır.

6. ÇAPAKSIZ İMALAT İÇİN ÖNERİLEN YOL HARİTASI

Bu bölümde projede geliştirilen yöntemler genelleştirilmiş bir biçimde sunulmuştur. Çapaksız parça üretimi için izlenmesi önerilen adımlar şunlardır:

- 1) Parça Geometri Analizi ve Takımlandırma
 - a. Parçanın takımlandırması yapılırken parça geometrisine uygun olan ve parça üzerinde bütün kenarlara pah kırabilecek pah takımını seçmek esas alınmalıdır.
 - b. Tırlamaya ya da kırılmaya izin vermeyecek minimum pah takımı çapı seçilmelidir.
 - c. Matkap takımları mutlaka karbür olarak seçilmelidir. Bu sayede esneme ve eş merkezlilik gibi sorunlar minimize edilir.
- 2) Kademeli Finiş
 - a. Pah takımı belirlendikten sonra parça üzerinde pah kırılmayan bir bölge yoksa kademeli finiş işlemine gerek kalmayacaktır.
 - b. Pah takımının kısmi ya da hiç giremediği yerler varsa bu bölgeler için kademeli finiş programı hazırlanmalı ve sadece bu bölgeler için ayrı bir finiş takımı hatta mümkünse sıfır takım kullanılmalıdır.
- 3) Delik İşleme ve Eş Merkezlilik
 - a. Kör deliklerin girişlerine ve patlayan deliklerin hem giriş hem de çıkışlarına pah kırılabilir, ön delik işlemine ve başka özel işleme gerek kalmadan parça çapaksız işlenebilir.
 - b. Kör deliklerin girişleri parçanın diğer unsurlarına çok yakınsa ve pah takımı bu bölgeye giremiyorsa;
 - i. Deliğe delik çapının maksimum %80 'i çapta bir matkapla ön delik işlemi uygulanır.
 - ii. Deliğin ilk 100 mikronluk kısmına kademeli finiş işlemi uygulanır ve 10 mikron ap değeri ile delik girişine finiş atılır. Deliğin kalan kısmına da freze ile normal finiş atılır.
 - iii. Deliğin çapının çok küçük ve derinliğinin de fazla olduğu (ör:20D) ve üzeri istisnai durumlarda işlemede ya da takım temininde sorun olabilir. Böyle bir durumla karşılaşıldığında;
 - Ön testler yapıp minimum çapak oluşumunu veren kesme parametreleri ve ön delik matkap çapı belirlenmelidir.
 - Ön delik işlemi yapıldıktan sonra delik girişinde gagalama yapılarak delik karbür matkapla delinmelidir.
 - Kısmi de olsa delik delme işleminden sonra delik kenarına pah kırılmalıdır.
 - c. İki tarafa patlayan delikler kademeli değilse;
 - i. Deliklere ön delik delme işlemi uygulanır.
 - ii. Eğer bütün deliklerin girişlerine frezeleme işlemi yapılabilirse sadece deliklerin girişine kademeli finiş işlemi uygulanır. Delik çıkışları ve deliğin tamamı parça döndürüldüğünde diğer taraftan işlenir.
 - iii. Deliğin ilk seferde işlenmemesinin sebebi parçanın diğer tarafındaki delik çıkışının olduğu yüzey işlenirken delik kenarlarından içeriye doğru çapak kalabilme olasılığıdır. Bu olasılığı ortadan kaldırmak için delikler iki taraftan işlenir.
 - iv. İkinci işlemede takım ilk işlenen yüzeyin üzerinden geçirilebilir. Delikler derinse ve takım boyu yetmiyorsa delikler yarısı bir taraftan yarısı diğer taraftan olacak şekilde de işlenebilir. Bu kısım programcıya kalmıştır. Eğer deliklerin patladığı tarafta pah takımı ile bütün deliklere pah kırılabilirse o zaman delikler ilk bağlamada işlenir ve patladığı yüzey tarafında da sadece pah kırılır.
 - v. Delikler delindikten sonra bütün deliklerden delik çapından %20-30 büyük çapta delik temizleme fırçası geçirilir.
 - d. İki tarafa patlayan delikler kademeli delik ise;
 - i. 3.c.i adımı uygulanır.
 - ii. Deliklerin eş merkezliliği açısından kademeli delikleri tek taraftan işlemek tercih edilebilir. Ama çapak oluşumunu önlemek için kademeli deliklerde de daha küçük deliğin olduğu yüzeyin girişi kademeli finiş ile 100 mikron işlenir. Kalan kısım diğer taraftan işlenir. 3.c,ii belirtilen öneriler burada da uygulanabilir.
 - iii. 3.c.iii işlemi uygulanır. (En küçük çaplı delik temel alınır)

7. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu makalede gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve iyileştirmeler sonucunda örnek parçanın yüzde 85'ine yakın kısmının çapaksız üretilbildiği görülmüştür. Kalan kısımlarda oluşan çapaklar ise genellikle pah kırılmayan yüzey çıkışları ya da bu çıkışların duvarlarla kesiştiği köşelerdir. Bazı bölgelerdeki çapaklar da, parçanın fikstüre bağlanma şekline ve kullanılan cıvataların konumundan dolayı bu bölgelere takımın ulaşmamasından kaynaklanabilmektedir. Bu tip çapakların ince olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden manuel temizlemesi de daha kolay olmakta ve fazla vakit almamaktadır. Delik delme operasyonlarında ön delik işlemi uygulamak ve delik girişlerinde gagalama yöntemini kullanmak çapak oluşumunu önemli ölçüde azaltmıştır.

Çapaksız parça imalatı, içinde çok fazla değişkeni barındırdığından dolayı seri imalatlarda pah takımı ile kenarlara pah kırmak en bariz çözüm yolu olarak değerlendirilmiştir. Pah kırılmayan noktalarda ve delik çıkışlarında ise “kademeli finiş yöntemi” uygulamanın mümkün olduğu gösterilmiştir. Tüm bunların yanısıra ise önceki çalışmalarımızdan 2 mm ve düşük çaplı takımlar için 20,000 dev/dak iş mili hızının çapaksız işlemeye daha uygun olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmadaki kısıtlardan birisi olan 10,000 dev/dak “kademeli finiş yöntemi” uygulandığında bile bazı noktalarda çapak oluşumuna yol açmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Chu, C.H., 1996. “A Framework for Burr Minimization in a CAD/CAM Integrated Environment”, Sponsored by CODEF/NSF,
- [2] Chu, C.H., Dornfeld, D., 2000. “Tool Path Planning for Avoiding Exit Burrs”, Journal of Manufacturing Processes, Volume 12, Pages 116-123.
- [3] Olvera, O., Barrow, G., 1995. “An Experimental Study of Burr Formation in Square Shoulder Face Milling”. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 36, Pages 1005-1020
- [4] Lin, T.R., 2000. “Experimental Study of Burr Formation and Tool Chipping in the Face Milling of Stainless Steel”. Journal of Materials Processing Technology, Volume 108, Pages 12-20
- [5] Ko, S.L., Dornfeld, D.A., 1996. “Analysis of Fracture in Burr Formation at the Exit Stage of Metal Cutting”. Journal of Materials Processing Technology, Volume 58, Pages 189-200
- [6] Ko, S.L., Dornfeld, D.A., 1996. “Burr Formation and Fracture in Oblique Cutting”. Journal of Materials Processing Technology, Volume 62, Pages 24-36
- [7] Deng, W.J., Xie, Z.C., Lin, P. and Xu, T.,K., 2012. “Study on Burr Formation at the Top Edge in Rectangular Groove Cutting”. Advances in Materials Science and Engineering, Volume 2012, Article ID 956208, 9 Pages
- [8] Aurich, J.C., Dornfeld, D.A., 2009. “Burrs – Analysis, Control and Removal”. CIRP Annals, Manufacturing Technology, Volume 58, Pages 519-542
- [9] Chern, G.L., 2006. “Experimental Observation and Analysis of Burr Formation Mechanisms in Face Milling of Aluminum Alloys”. International Journal of Machine Tool and Manufacture, Volume 46, Pages 1517-1525
- [10] Toropov, A., Ko S.L., 2006. “A Model of Burr Formation in the Feed Direction in Turning”. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Volume 46, Pages 1913-1920
- [11] Nakayama, K., Arai, M., 1987. “Burr Formation in Metal Cutting”. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 36, Pages 33-36
- [12] Hashimura M., Ueda, K., Dornfeld, D., Manabe, K., 1995. “Analysis of Three-Dimensional Burr Formation in Oblique Cutting”. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 44, Pages 27-30
- [13] Ffield, P., Askari, A., Dornfeld, D., 1998. “Burr Prevention and Minimization for the Aerospace Industry”. SAE Technical Paper, The Boeing Company, University of Berkeley
- [14] Deng, W.J., Tang, Y., Xia, W., 2008. “Finite Element Simulation for Burr Formation Near the Exit of Orthogonal Cutting”. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 43, Pages 1035-1045
- [15] Ramachandran, N., Pande, S.S., Ramakrishnan, N., 1993. “The Role of Deburring in Manufacturing A State of the Art Survey”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 44, Pages 1-13.
- [16] Lekkala, R., Bajpai, V., Singh, R.K., Joshi, S.S., 2011. “Characterization and Modeling of Burr Formation in Micro-End Milling”. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Volume 35, Pages 625-637

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [17] Chern, G.L., 2006. "Study on Mechanisms of Burr Formation and Edge Breakout Near the Exit of Orthogonal Cutting", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 176 Pages 152-157
- [18] Lee, K., Dornfeld, D.A., 2004. "Micro-burr Formation and Minimization Through Process Control", *Precision Engineering*, Volume 29, Pages 246-252
- [19] Toporov, A.A., Ko, S.L., Lee, J.M., 2006. "A New Burr Formation Model for Orthogonal Cutting of Ductile Materials". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Volume 55, Pages 55-58
- [20] Biermann, D., Hartmann, H., 2012. "Reduction of Burr Formation in Drilling Using Cryogenic Process Cooling", *Procedia CIRP*, Pages 85-90.
- [21] Isbilir, O., Ghassemieh, E., 2011. "Finite Element Analysis of Drilling of Titanium Alloy". *Procedia Engineering*, Volume 10, Pages: 1877-1882.
- [22] Pilny, L., De Chiffre, L., Piska, M. Villumsen, M. F., 2012. "Hole Quality and Burr Reduction in Drilling Aluminum Sheets". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Volume 5, Pages: 102-107.
- [23] Chang, S. S. F., Bone, G. M., 2005. "Burr Size Reduction in Drilling by Ultrasonic Assistance". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Volume 21, Pages: 442-450.
- [24] Lee, K., Dornfeld, D. A., 2005. "Micro Burr Formation and Minimization Through Process Control". *Precision Engineering*, Volume 29, Pages: 246-252.
- [25] Stein, J. M., Dornfeld, D. A., 1997. "Burr Formation in Drilling Miniature Holes", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Volume 46, Pages 63-66
- [26] Stirn, B., Lee, K., Dornfeld, D. A., Not Specified. "Burr formation in Micro Drilling", University of Technology at Aachen (RWTH), Aachen, Germany. University of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA.
- [27] Aziz, M., Ohnishi, O., Onikura, H., 2012. "Innovative Micro Hole Machining with Minimum Burr Formation by the Use of Newly Developed Micro Compound Tool", *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 14, Pages 224-232.
- [28] Lim Ko, S., Koo Lee, J., 2001. "Analysis of Burr Formation in Drilling with a New Concept Drill", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 113, Pages 392-398.
- [29] Ko, S. L., Chang, J. E., 2003. "Development of Drill Geometry for Burr Minimization in Drilling", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Volume 52, Pages 45-48
- [30] Chang, S. S. F., Bone, G. M., 2010. "Burr Height Model for Vibration Assisted Drilling of Aluminum 6061 – T6", *Precision Engineering* Volume 34, Pages 369-375.
- [31] Segonds, S., Masouvane, J., Songmene, V., Bes, C., 2013. "A Simple Analytical Model for Burr Type Prediction in Drilling of Ductile Materials", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Pages 971-977.

KILAVUZ KESİCİ TAKIMLARI İLE Ti-6Al-4V ALAŞIMINA VİDA AÇILMASINDA KESME FORMUNUN KESME TORKUNA ETKİSİ

Gültekin Uzun^a, İhsan Korkut^a

^a, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara /TÜRKİYE,
uzun.gultekin@gazi.edu.tr, ikorkut@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, kaplamalı (TiAlN) ve kaplımsız 4 farklı tipte kılavuz kullanılmıştır. Kılavuz ile vida açma işlemleri Ti6Al4V alaşımı üzerinde dört farklı kesme hızı (2, 3, 4 ve 5 m/dak) ve vida adımı miktarı kadar ilerleme (1,25 mm/dev) değeri ile ıslak ve kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Kılavuz ile vida açma işlemleri sırasında kılavuzların kesme performansları ve kesme kuvvetleri belirlenmiştir. Bütün kesme şartlarında en iyi kesme torku sonuçları eğik ağız bilemeli düz kanallı kılavuz kesicisi ile elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kılavuz ile Vida Açma, Ti6Al4V, İşlenebilirlik, Kesme torku

THE EFFECT OF CUTTING FORMS ON CUTTING TORQUE FOR TAPPING ON AN Ti-6Al-4V ALLOYS

Abstract

In this study, 4 different types of tap as coated (TiAlN) and uncoated have been used. Tapping processes have been carried out on Ti-6Al-4V alloy with 4 different cutting speeds (2, 3, 4 and 5 m/min) and feed which is equal to thread pitch (1.25 mm/min) in both wet and dry conditions. Cutting performances and cutting forces have been determined during tapping processes. In all cutting conditions, it was determined that straight flutes with spiral point taps exhibited the best cutting performance.

Keywords: Tapping, Ti-6Al-4V, Machinability, Cutting Torque

1. GİRİŞ

Talaşlı üretimde vida çekme işlemleri için kılavuz seçimi çok önemlidir. Doğru kılavuz seçimi ve gerekli parametreler (kesme hızı, devir, ilerleme, kesme geometrisi, soğutma sıvısı v.b.) oluşan vida dişinin kalitesini ve üretim ekonomisini etkilemektedir. [1]. Kılavuz ile vida çekerken oluşan yüksek tork, kılavuzun geri tepmesi (yaylanması) ve dönüş zorluğu kılavuzun kırılmasına neden olmaktadır [2]. Bu olumsuzluklar genellikle üretim esnasında görülebilmektedir. Endüstrideki rekabet ve yüksek verimlilik daha kaliteli vida dişi oluşturma ihtiyacı doğurmaktadır [3]. Titanyum ve alaşımları sahip oldukları, yüksek dayanım, ısı direnç ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı makina parçası olarak etkin bir şekilde tercih edilmektedir [4-6]. Ti6Al4V alaşımında, kesme anında takım/talaş ve takım/iş parçası arasında ortaya çıkan yüksek ısı birçok problemi beraberinde getirmektedir [7, 8]. Düşük termal iletkenliğe sahip titanyum alaşımı, işleme anında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklarda bile mukavemetini korurken, kesici takımlar yüksek sıcaklık ve basınç altında mukavemetini yitirebilmektedir [9,10]. Titanyum alaşımlarının yumuşak matrise sahip olmaları, işlem anında hızlı sertleşmesine yol açmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda kesici takım malzemesiyle reaksiyona girme eğilimleri ve kesici takım ucuna yapışmaları gibi nedenler, işlemin verimliliğini önemli derecede etkilemektedir [11-13]. Ribero, bu alaşımların hangi klasik yöntem kullanılırsa kullanılsın, işlenmesinin daima bir problem olduğunu belirtmiş ve uygun işleme şartlarının araştırılmasının gerektiğini belirtmiştir [14]. Kılavuz ile vida açılması sırasında kesici ve malzeme arasında oluşan olaylar diğer kesici takımlara nazaran daha karmaşıktır. Küçük çaplı kılavuzlarla derin deliklere kılavuz ile vida açılması sırasında sıkça meydana gelen kesici kırılmalarının sebepleri ve çözümlerinin incelendiği çalışmada; titanyum malzemesine kılavuz ile vida açılmasında ortaya çıkan yüksek tork (moment) gösterilmiştir [2]. Yüksek tork, titanyum malzemesinin elastikiyet özelliğinin kesici ile malzeme ara yüzünde daha fazla sürtünme direnci oluşturmaya bağlanmıştır. Diğer bir çalışmada düz oluklu kaplamasız M10 HSS kılavuz ile vida dişi açma sırasında kesme sıvısı kullanımının kılavuzda oluşan çentik ve yanak aşınmalarına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, en düşük kesme torkunu kuru kesme şartlarında tespit etmişlerdir [15]. M8 kılavuz ile paslanmaz çelik üzerinde farklı kaplanmış kılavuzlar kullanılarak sertlik, mekanik özellikler, abrasiv aşınma direnci ve sürtünme katsayıları belirlenmiştir. TiCN kaplamanın mükemmel abrasiv ve adhesiv aşınma direncinin olduğunu vurgulamışlardır [16]. S.C. Veldhuis ve arkadaşları, kılavuz ile vida açma operasyonları sırasında ultra ince flor katkılı kesme sıvısının takım/iş parçası arasındaki aşınmaya etkilerini incelemişler ve sürtünme katsayısını %18 azalttığı gözlemlemişlerdir [17]. İşlenmesi çok zor olarak bilinen malzemelerden biri olan beta-tipi titanyum alaşımının kesilmesinde, CBN kaplamalı kılavuzların takım ömrü ve kılavuz çekme direncilerinin geleneksel kaplamalı kılavuzlardan daha iyi olduğunu vurgulamışlardır [18]. Kılavuz ile vida açma işlemi için pek çok değişken kullanılarak modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin deneysel olarak test edilerek kullanılabileceklerini vurgulamışlardır [19, 20]. Kayır yapmış olduğu çalışmalarında, AA5083 malzemesine kılavuzlarla vida açılmasında, matkap delik çapının küçük olması durumunda tork değerinin arttığı tersi durumda ise azaldığını ortaya koymuştur. Kılavuzların kırılmasında en etkili kuvvetin kesme torku olduğunu ve küçük delik çaplarında artan artan kesme torkunun kılavuzu kırmaya karşı daha fazla zorlayacağını ifade etmiştir. Vida açma deneylerinde kullanılan kaplamalı ve kaplamasız kılavuzlardan elde edilen sonuçlara göre, 15° uçlu düz kanallı kılavuzların kırılmaları karşı daha fazla dayanacağı sonucuna varmıştır [21, 22]. Titanyum alaşımlarının işlenmesinde ortaya çıkan sorunların temelini, bu alaşımların yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanıma sahip olmaları oluşturmaktadır. Kılavuz ile vida açma işleminin diğer talaş kaldırma işlemlerine göre daha karmaşık bir durumdur. Ayrıca işlenebilirliği zor olan Ti alaşımları, süper alaşımlar vb. malzemelerde bu süreç daha da zorlaşmakta ve kesici takım ömrünün azalmasına neden olmaktadır [23]. Bu bağlamda, kılavuzun verimli olarak kullanılabilmesi için kesme şartlarının (Kılavuz seçimi, kesme parametreleri, vb.) en iyi şekilde belirlenmesi gerekir. Kılavuzlarda, kesme kuvvetlerinin ölçülmesi ve takım aşınmasının tespiti üzerine yapılan çalışma sayısının, diğer talaşlı imalat operasyonlarında yapılan çalışmalara oranla daha az olduğu fark edilmiştir. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımına, açık deliklerde dört farklı kesme formuna sahip, kaplamalı ve kaplamsız kesiciler kullanılarak, dört farklı kesme hızında ıslak ve kuru kesme şartlarında kesici takımların kesme performansları belirlenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deneysel Yöntem

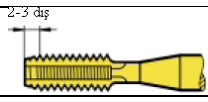
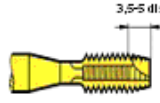
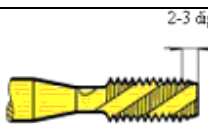
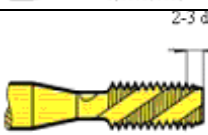
Deneysel titanyum alaşımları içinde endüstride en çok kullanım alanına sahip olan Ti-6Al-4V ($\alpha+\beta$ -Ti alaşımı) kullanılmıştır. Bu alaşımın endüstriyel uygulamalardaki oranı %45'tir. Ti-6Al-4V alaşımlarının en önemli özellikleri, korozyona karşı yüksek direnci, sertliği ve dayanıklılığıdır. Malzemenin kimyasal bileşenleri Tablo 1'de verilmiştir. Ti-6Al-4V numune malzemeler 100x80x15 boyutlarındadır.

Tablo 1. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşenleri.

Kimyasal İçerik							
Al	V	Fe	O	N	H	C	Ti
5.9%	4.00%	0.09%	0.14%	0.01%	0.002%	0.01%	Denge Miktarı

Deneysel; imalat sanayisinde yaygın olarak kullanılan standart metrik vidaların açılmasına karar verilmiş ve M8x1.25 anma ölçüsü esas alınmıştır. Bu çalışma, kaplamalı (TiAlN), kaplamasız ve dört farklı kesme geometrisine sahip kılavuzlar ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de makine kılavuzlarının formları ve bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Kılavuz formları ve tipleri

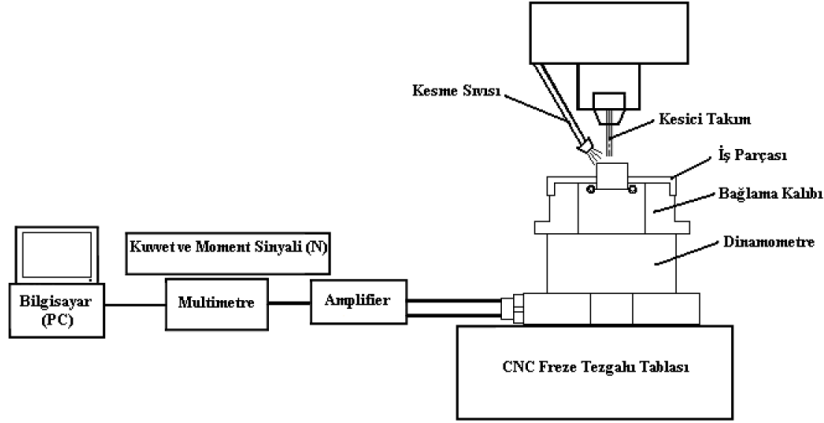
Kılavuz Vida Ölçüsü	Kılavuz Şekli (Form DIN 371)				Ağız Tipi	Helisel Kanal	Malzemesi	Kısaltmalar
M8 X 1.25	Form C (2-3 Diş)				Düz	Düz	HSS-E	DÜK (Düz kılavuz)
	Form B (3.5-5 Diş)				Eğik	Düz	HSS-E	EADK (Eğik ağız bilemeli düz kılavuz)
	Form C (2-3 Diş)				Düz	R15° Helis	HSS-E	SAHK (Sağ helis kılavuz)
	Form D (2-3 Diş)				Düz	L15° Helis	HSS-E	SOHK (Sol helis kılavuz)
Kaplama Türü	Renk	Kaplama Tipi	Kaplama Sıcaklığı	Katman Yapısı	Kalınlık (μm)	Nano Sertlik (HV0,05)	Sürtünme Katsayısı	Isıl Kararlılık
Titanyum Alüminyum Nitrit	Eflatun	PVD	930° F-500° C	Tek Tabakalı	1,5 – 4,0	3300	0,50	1470° F-800° C

Kılavuz çekilecek delik çapının oluşturulması için 6,8 mm çapında iki ağızlı helisel karbür matkap kullanılmıştır. Deneysel ıslak ve kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Islak kesme şartlarında %20 emülsiyon kesme sıvısı kullanılmıştır. Deneysel kesme sıvısı CNC tezgâhına ait soğutma sistemi ile kesici ve iş parçası üzerine püskürtülerek kullanılmıştır.

Bu çalışmada dört farklı (2, 3, 4 ve 5 m/dak) kesme hızı ve 1.25 mm/dev ilerleme değeri kullanılmıştır. Kesme hızı, literatürde yapılan çalışmalar ve kesici takım katalogları dikkate alınarak ön deney çalışmaları neticesinde belirlenmiştir. Farklı kesme hızlarında, ıslak ve kuru kesme şartlarında, kaplamalı (TiAlN) ve kaplamasız şekilde deneyerek en iyi kesme sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır.

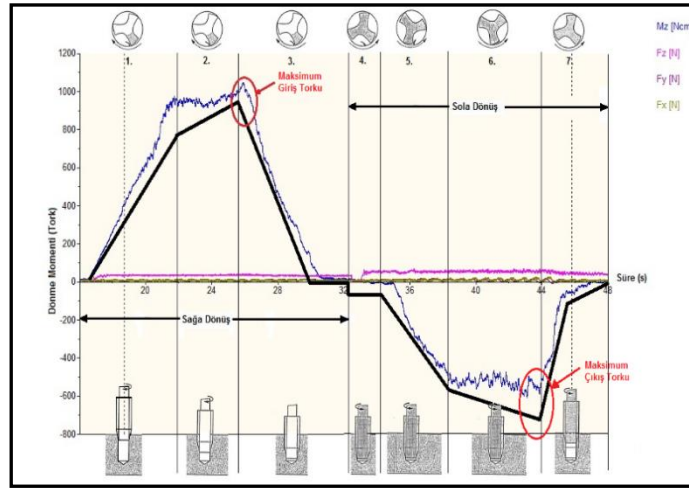
2.2. Kesici Takımların ve Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi

Kesme kuvvetlerinin ve momentin deneysel olarak belirlenmesi için dik işleme merkezine bağlanan, üç kesme kuvveti bileşenini (F_x , F_y , F_z) ve momenti (M_z) aynı anda ölçme kapasitesine sahip, KISTLER 9272A tipi dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre vasıtasıyla elde edilen veriler Kistlere ait DynoWare yazılımı ile grafiksel hale dönüştürülmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Şekil 2’de bir kılavuz ile vida açma işlemi sırasında dönme momentinin (Tork) nasıl gerçekleştirildiği grafiksel ve deney seti ile ölçülmesi gösterilmektedir. Burada M_z (Ncm) dönme torkunu, F_z (N) ise ilerleme (baskı) kuvvetini ifade etmektedir



Şekil 2. Kılavuz ile vida açma işlemi sırasında dönme momentinin (torkun) grafiksel ve deneysel ölçülmesi [1, 24].

1. Bölge kılavuzun bütün ağızlama dişlerinin parçaya kavraması
2. Bölge kavrayan bütün dişler ile kesme momentinin oluşması
3. Bölge fener milinin ve kılavuzun tamamen durması
4. Bölge geri dönüş işleminin başlaması ve diş göbek sırtının temas anı
5. Bölge talaşların atılması
6. Bölge atılan talaşın talaş kökünün sıkışması
7. Bölge ise kılavuz ve iş parçası arasındaki kayma sürtünmesini göstermektedir [24].

3. DENEY SONUÇLARI

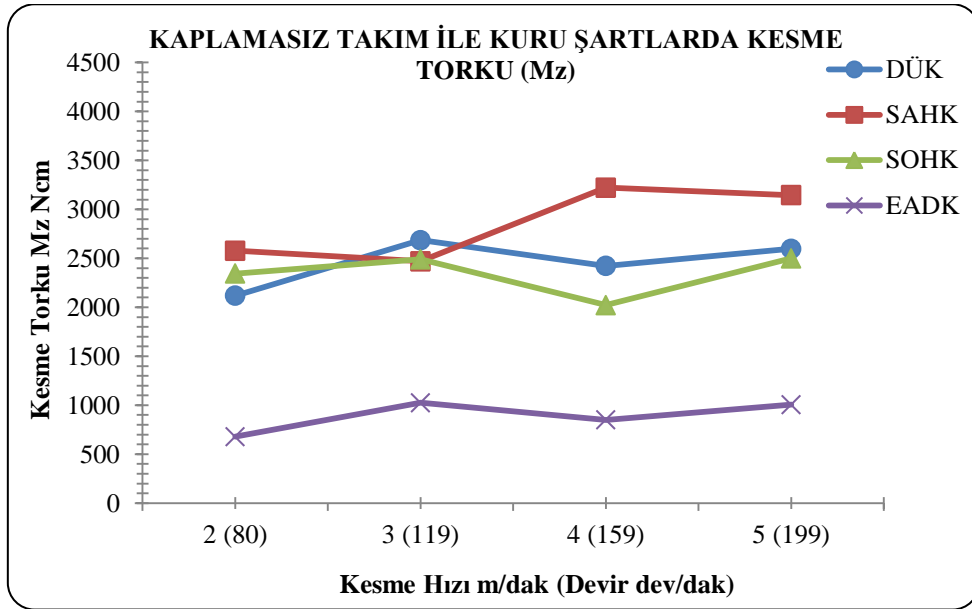
Deneysel çalışmada elde edilen çıktılar Tablo 3’de verilmiştir. Tabloda görülen DÜK kodu düz kanallı kılavuzu, SAHK kodu sağ helis kanallı kılavuzu, SOHK kodu sol helis kanallı kılavuzu, EADK kodu eğik ağız bilemeli düz kanallı kılavuzu ve OK kodu ovalama kılavuzunu simgelemektedir. Elde edilen veriler Tablo 3’deki değerlerin grafiklere aktarılmasıyla ayrı ayrı yorumlanmıştır.

Tablo 3. Deneysel çalışmadaki girdilere bağlı olarak elde edilen veriler

Kesici Takım	Kesme Hızı m/dak	Devir Dev/dak	Kesme Şartı	Kesme Torku (Mz) Ncm	Açıklama	Kesme Şartı	Kesme Torku (Mz) Ncm	Açıklama
DÜK	2	80	Kaplamaşız Kuru	2119		Kaplamaşız Islak	1270	
	3	119		2686			3652	Kırıldı
	4	159		2422			3779	Kırıldı
	5	199		2598			537	
SAHK RH15	2	80		2578			3594	Kırıldı
	3	119		2471			3730	Kırıldı
	4	159		3223			3701	Kırıldı
	5	199		3145			3652	Kırıldı
SOHK LH15	2	80		2344			3770	Kırıldı
	3	119		2490			3145	Kırıldı
	4	159		2021			3877	Kırıldı
	5	199		2500			732	
EADK	2	80		679			859	
	3	119		1025			732	
	4	159		850			977	
	5	199		1006			1328	
DÜK	2	80	Kaplamaşlı Kuru	2734		Kaplamaşlı Islak	2412	Sıkışma
	3	119		2744			2314	Sıkışma
	4	159		2803			2793	Sıkışma
	5	199		2627			2471	Sıkışma
SAHK RH15	2	80		1719			830	
	3	119		2734			2676	Sıkışma
	4	159		2861			830	
	5	199		3115			2432	Sıkışma
SOHK LH15	2	80		2529			2354	Sıkışma
	3	119		2764			2217	Sıkışma
	4	159		2842			2119	Sıkışma
	5	199		3241			2666	Sıkışma
EADK	2	80		1553			1475	
	3	119		1660			1045	
	4	159		1299			1523	
	5	199		1338			1260	

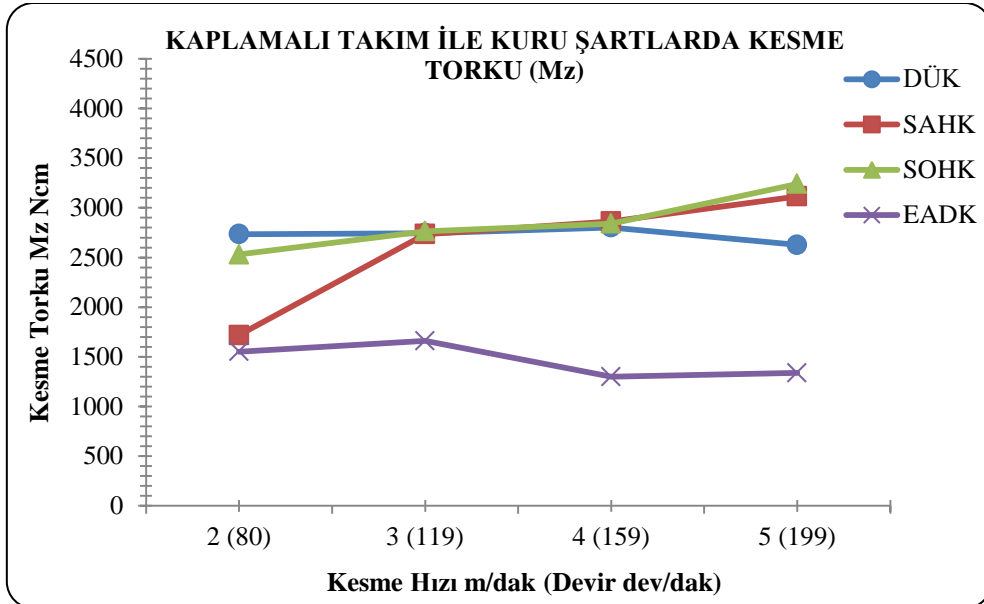
3.1. Kuru Kesme Şartında Kesme Torkunun İncelenmesi

Şekil 3 incelendiğinde, 2 m/dak kesme hızında en yüksek kesme torku 2 m/dak kesme hızında SAHK kesicisinde oluşmuştur. Bu kesicide talaş tahliyesinin kanal boyunca yukarıya doğru olması, talaş tahliye işlemini zorlaştırmakta ve sıkışmaların olmasına sebebiyet vermektedir [21, 22]. Bütün kesme hızlarında en düşük kesme torku (679 N/cm) 2 m/dak kesme hızında EADK kesicisinde görülmüştür. EADK kesicisinin ağız kısmındaki açılmalı eğim talaş tahliyesinin daha kolay yapılmasını sağlamaktadır. Böylece talaş yığılması olmamakta ve kılavuz daha rahat bir kesme yapabilmektedir [15, 21, 23]. Ayrıca, ağızlama sayısının 3,5-5 diş (Form B) olması, dişlere dağılan momenti düşürmekte ve kesme momentinin düşük çıkmasını sağlamaktadır [22].



Şekil 3. Kesme hızına bağlı olarak kaplamasız kesici takımlar arasındaki kesme torkunda ki değişim

Kuru kesme şartları altında kaplamalı takımlara ait Şekil 3 incelendiğinde 2 m/dak kesme hızında en yüksek kesme torku (2734 Ncm) DÜK kesicisi ile elde edildiği görülmüştür. En düşük kesme torku ise (1553 Ncm) EADK kesici ile ölçülmüştür. Bu durum EADK kesicisinin ağız kısmında bulunan açılal bilemenin talaş tahliyesini rahatlatması ile kesicinin kesme geometrisine atfedilmiştir [15, 21, 23]. 3 m/dak kesme hızında DÜK, SAHK ve SOHK kesicilerinin kesme torkları yakın değerlerde gerçekleşmiştir. En yüksek kesme torku (2744 Ncm) DÜK kesicisi ile ölçülmüştür. En düşük kesme torku ise (1660 Ncm) diğer kesme hızında olduğu gibi EADK kesicisinde elde edilmiştir. 4 m/dak kesme hızında 3 m/dak kesme hızında olduğu gibi DÜK, SAHK ve SOHK kesicilerinde birbirlerine yakın kesme torkları oluşmuştur. En yüksek kesme torku bu kesme hızında (2861 Ncm) SAHK kesicisinde gerçekleşmiştir. 4 m/dak. kesme hızı ve bu grafikteki diğer kesme hızlarındaki en düşük kesme torku (1299 Ncm) EADK kesicisi ile ölçülmüştür.

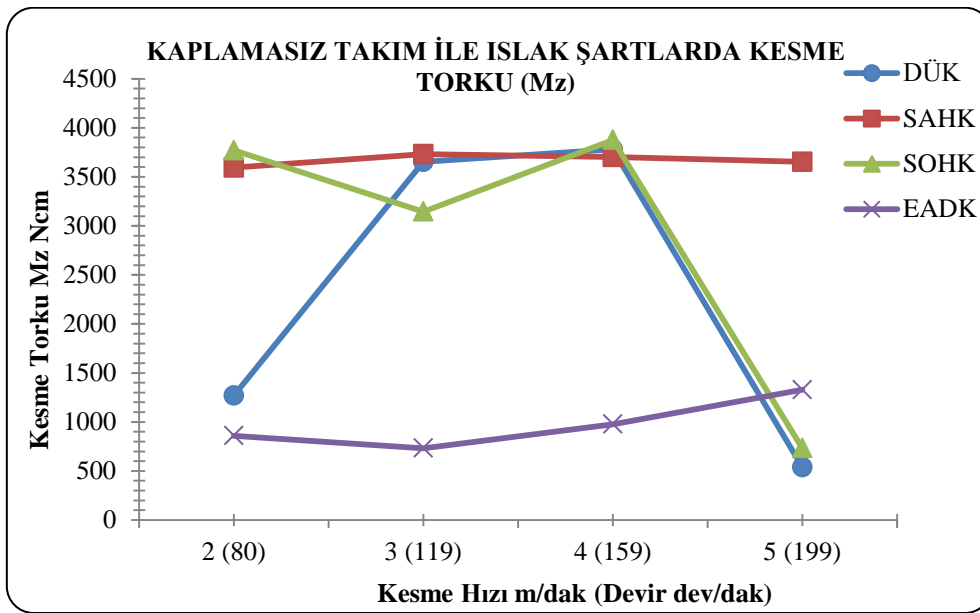


Şekil 4. Kesme hızına bağlı olarak kaplamalı kesici takımlar arasındaki kesme torkun değişim.

5 m/dak kesme hızında SAHK ve SOHK kesicileri için kesme hızının artışı ile kesme torklarında %9 ve %14 artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durum kesme hızının artışı ile talaş tahliyesinin zorlaşması ile açıklanabilir [23]. SOHK kesici ile 5 m/dak kesme hızında ve diğer bütün kesme hızlarındaki en yüksek kesme torku (3241 Ncm) ölçülmüştür. Bu kesme hızında en düşük kesme torku (1338 Ncm) EADK kesicisi ile belirlenmiştir. DÜK kesicisinde ise kesme hızının artışı ile kesme torkunda %8 oranında düşüş görülmüştür.

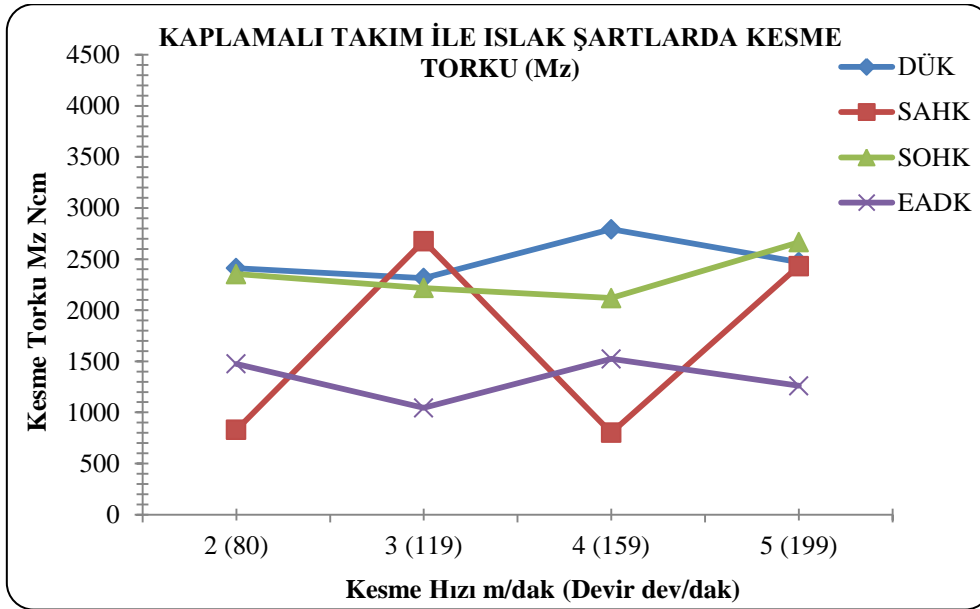
3.2. Islak Kesme Şartında Kesme Torkunun İncelenmesi

Kılavuz ile vida açma işleminde kesme sıvısının görevi, soğutmaktan ziyade talaşın az bir sürtünme ile kaydırılmasını sağlamaktır. Soğutma görevi ikinci planda kalır. Pratik olarak; hafif malzemelere ince kesme sıvıları, sert ve daha sünek olan malzemelerde ise daha kalın kesme sıvıları kullanılmaktadır. Miktarı ise kılavuz çekme metoduna, delik derinliğine ve kesme hızına bağlı olarak değişir [23]. Kesme sıvısı olarak çalışmalarda kesme yağı, makine yağı veya su-yağ (emülsiyon) karışımları kullanılmıştır. Emülsiyon miktarları %10-20 arasında değişiklik göstermektedir [15, 17, 18, 25, 26]. Çalışmada, emülsiyon miktarı %20 tutularak kesme sıvısının soğutma özelliği değil yağlama özelliği ön planda tutulmuştur.



Şekil 5. Kesme hızına bağlı olarak kaplamasız kesici takımlar arasındaki kesme torkunda ki değişim.

Islak şartlarda kaplamasız takım ile yapılan deney sonuçları (Şekil 5) incelendiğinde, 2 m/dak kesme hızında en düşük kesme torku (859 N/cm) EADK kesicisi ile ölçülmüştür. Bu kesme hızında en yüksek kesme torkları SAHK ve SOHK kesicilerine aittir. Bu kesicilerde talaş sıkışması gerçekleşmiş ve kesiciler kırılmıştır. Bu nedenle en yüksek kesme torkları bu kesicilerde oluşmuştur. 3 m/dak kesme hızında DÜK, SAHK ve SOHK kesicilerinde kırılma gerçekleşmiştir. Kırılmaların nedeni olarak kesme sıvısının kesme bölgesindeki ısıyı düşürmesi ile malzeme mukavemetinin artması ile oluştuğu kanısına varılmıştır [1, 4, 5]. 3 m/dak kesme hızında en düşük kesme torku (732 N/cm) yine EADK kesicisinde gerçekleşmiştir. EADK kesicisinde kesme hızının artışı ile kesme torkunda %17 düşüş görülmüştür. 4 m/dak kesme hızında DÜK, SAHK ve SOHK kesicilerinde yine kırılmalar gerçekleşmiştir. Bu durum kesme sıvısına ve malzemenin yüksek mukavemetine atfedilmiştir [16, 18]. 4 m/dak kesme hızında En düşük kesme torku (977 N/cm) kırılma gerçekleşmeyen EADK kesicisinde meydana gelmiştir. 5 m/dak kesme hızında sadece SAHK kesicisinde kırılma gerçekleşmiş ve en yüksek kesme torku (3652 N/cm) bu kesicide elde edilmiştir. Bu kesme hızında en düşük kesme torku (537 N/cm) DÜK kesici ile ölçülmüştür. Bu düşük tork ayrıca deneyler boyunca ölçülmüş en düşük kesme torkudur. Bu kadar düşük kesme torku oluşumu talaş tahliyesinin soğutma sıvısı yardımıyla atfedilmiştir. İkinci en düşük kesme torku ise SOHK kesicisinde görülmüştür. EADK kesicisinde kesme hızı artışı ile kesme torkunda %26 lık bir artış belirlenmiştir.



Şekil 6. Kesme hızına bağlı olarak kaplamalı kesici takımlar arasındaki kesme torkunda ki değişim.

Islak kesme şartları altında kaplamalı takımlar için Şekil 6 incelendiğinde 2 m/dak kesme hızında DÜK ve SOHK kesicisinde sıkışma gerçekleşmiş ve tezgâh durdurulmuştur. Sıkışma nedeni ile en yüksek kesme torku (2412 Ncm) DÜK kesicisinde oluşmuştur. Kesici takım kaplaması kesici takımın dayanım kuvvetini arttırmış ve kesicilerin kırılmasını engellemiştir. Bu durum kaplamanın yüksek mukavemete sahip olması sonucu kesici takımın direncini arttırmasına atfedilmiştir [15, 16, 27]. 2 m/dak kesme hızında en düşük kesme torku (830 Ncm) SHAK kesicisinde oluşmuştur. Kesme torklarında EADK kesicisi için kuru kesme şartlarına göre %5 ve SAHK kesicisinde %107 düşüş görülmüştür. 3 m/dak kesme hızında DÜK, SAHK ve SOHK kesicilerinde sıkışma gerçekleşmiş ve en yüksek kesme torku (2676 Ncm) SAHK kesicisinde meydana gelmiştir. 3 m/dak kesme hızında en düşük kesme torku (1045 Ncm) EADK kesici ile elde edilmiştir. 4 m/dak kesme hızında da 2 m/dak kesme hızında olduğu gibi DÜK ve SOHK kesicilerinde sıkışma gerçekleşmiş ve kaplamanın kesici mukavemetini artırması kırılmaları engellenmesi ile en yüksek kesme torku (2793 Ncm) DÜK kesicisi ile tespit edilmiştir. 4 m/dak kesme hızı için ve Şekil 6 daki tüm kesme hızları için en düşük kesme torku (801 Ncm) ise SAHK kesici ile ölçülmüştür. 5 m/dak kesme hızında 3 m/dak kesme hızında olduğu gibi DÜK, SAHK ve SOHK kesicilerinde sıkışmalar olmuştur. Bu sıkışma sonucu en yüksek kesme torku (2666 Ncm) SOHK kesicisi ile elde edilmiştir. 5 m/dak kesme hızında en düşük kesme torku (1260 Ncm) EADK kesicisi ile ölçülmüştür.

4. TARTIŞMA

Bütün kesme hızlarında en düşük kesme torkları EADK kesicisinde elde edilmiştir. Bu kesicinin geometrisinin buna neden olduğu kanısına varılmış ve yapılan diğer çalışmalar ile bu durum paralellik göstermiştir [16, 21, 22, 23, 28].

EADK kesicisinde kesme hızının artışı ile kesme torklarında düşüşler olduğu görülmektedir. Bu durum kesme hızının artışıyla kesici ile delik duvarı arasındaki sürtünmenin azalmasına atfedilmiştir [16, 18]. Özellikle Kaplamasız EADK kesicileri ile kuru kesme şartında yapılan deneylerde %58 ile %74 oranında, kaplamalı EADK kesicileri ile kuru kesme şartında yapılan deneylerde %10 ile %58 oranında kesme torklarında azalmalar gözlemlenmiştir.

Islak kesme şartında EADK kesicileri ile kuru kesme şartına göre kesme torkunda %112 ile %126 oranında kesme torklarında azalmalar gözlemlenmiştir. Bu durum kesme sıvısının kesici ile iş parçası arasında film tabakası oluşturması ve bu film tabakasının kesme işlemini kolaylaştırmasına atfedilmiştir [15, 17, 18, 29, 30].

Islak kesme şartlarında kesme sıvısı kesme bölgesinde oluşan ısıyı düşürmesi malzemenin mukavemetini korumasını sağlamıştır. Bu nedenle yüksek mukavemete sahip olan Ti-6Al-4V malzemesi kesicileri zorlayarak kırma eğilimi göstermiştir [4, 5, 30]. Kesme bölgesindeki ısının engellenmesi asıl kesme şartlarının oluşmasını sağlamıştır. Ayrıca helisel kılavuzların kesme kanallarının helisel şekilde olması kılavuzların daha zayıf bir yapıya sahip olmasına sebebiyet vermektedir [23]. Kesici kırılmalarının nedeni olarak, titanyum malzemesine dış açılmasında ortaya çıkan yüksek tork gösterilmektedir. Yüksek torkun titanyum malzemesinin elastikiyet özelliğinin kesici ile malzeme ara yüzünde daha fazla sürtünme direnci oluşturmasına sebebiyet vermiş ve kırılmalar gerçekleşmiştir [2]. 3500 N/cm üzerinde oluşan torkların hiçbirine kesiciler dayanmamış ve kırılmışlardır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ti-6Al-4V titanyum alaşımı üzerinde yapılan vida açma deneyleri ile kesici formu, kesme hızı, kaplamalı-kaplamasız ve ıslak-kuru kesme şartlarının kesme torku üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bu çalışmayla elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Bütün kesme şartlarında genel olarak en iyi kesme torku sonuçları eğik ağız bilemeli düz kanallı kılavuz ile elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak, ağız kısmında ki açılmalık bilemenin kesme işlemini rahatlatmış ve kesme torklarını düşürdüğünü söylemek mümkündür.
- Sağ helisel kılavuzların bütün deneylerinde kesme torkunun yüksek olması, talaş tahliyesinin yukarı yönde yapmaya çalışması ve talaşın kanal içinde sıkışmaya sebebiyet vermesi olarak açıklanabilir.
- Kaplamalı takımlar ile ıslak şartlarda kuru kesme şartlarına göre daha düşük kesme torkları tespit edilmiştir. Bu durum kaplamanın ve kesme sıvısının sürtünme katsayısını düşürmesi ile açıklanabilir.
- Kesici kırılmalarının nedeni olarak, titanyum malzemesine dış açılmasında ortaya çıkan yüksek tork gösterilebilir.

KAYNAKLAR

1. Uzun G., Korkut İ., 2013,. “The effect of cryogenic treatment on tapping” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67 Pp. 857-864 .
2. Kuo, K., 2007. “Experimental Investigation Of Ultrasonic Vibration-Assisted Tapping”, *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193: 306–311.
3. Li, W., Li, D., Ni, J., 2003. “Diagnosis Of Tapping Process Using Spindle Motor Current” *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43: 73–79.
4. Nabhani, F., 2001. “Machining of Aerospace Titanium Alloys”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 17: 99–106.
5. Ezugwu, E.O., Wang, Z.M., 1997. “Titanium alloys and Their Machinability – a review”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 68: 262–274.
6. Ensarioğlu, C., Çakır, M.C., 2005. “Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü”, *Mühendis ve Makine*, 46 (546): 1-7.
7. Kishawy, H.A., Wilcox, J., 2003. “Tool wear and chip formation during hard turning with self – propelled rotary tools”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43: 433–439.
8. Schueller, J.K., Tlusty, J., Smith, S., Leigh, E., 2000. “Advanced machining techniques on titanium rotor parts”, *American Helicopter Society*, Virginia, 1-7.
9. Nabhani, F., 2001. “Wear Mechanisms of Ultra – Hard cutting tools materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 115: 402–412.
10. Haron, C.H. C., Jawaid, A., 2005. “The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti₆Al₄V”, *Journal of Materials Processing Technology*, 166: 188–192.
11. Jawaid, A., Che Haron, C.H., Abdullah, A., 1999. “Tool wear characteristics in turning of titanium alloy Ti–6246”, *Journal of Materials Processing Technology*, 92 – 93: 329 – 334.

12. James B., 2012. “Cool Tips for Cutting Titanium”, <http://www.americanmachinist.com/304/Issue/Article/False/77297/>.
13. Kitagawa, T., Kubo, A., Maekawa, K., 1997. “Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and $Ti_6Al_6V_2Sn$ ”, *Wear*, 202 (2): 142–148.
14. Riberiro, M.V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R., 2003. “Optimization of titanium alloy (6Al4V) machining”, *Journal Of Materials Processing Technology*, 143–144: 458–463.
15. Cao T., Sutherland J. W., 2002. “Investigation of thread tapping load characteristics through mechanistics modeling and experimentation” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42 Pags. 1527–1538.
16. Reiter A.E., Brunner B., Ante M., Rechberger J. 2006.” Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 200, Pags. 5532–5541.
17. Veldhuis S.C., Dosbaeva G.K., Benga G., 2007 “Application of ultra-thin fluorine-content lubricating films to reduce tool/workpiece adhesive interaction during thread-cutting operations”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, Pags. 521–528.
18. Jin M., Watanabe S., Miyake S., Murakawa M., 2000 “Trial fabrication and cutting performance of c-BN-coated taps”, *Surface and Coatings Technology*, Pages 443-447.
19. Armarego E.J.A., Chen M. N.P., 2000. “Predictive Cutting Models for the Forces and Torque in Machine Tapping with Straight Flute Taps” *Department of Mechanical and Manufacturing Engineering*, The University of Melbourne, Australia.
20. Dogra A. P. S., Kapoor S. G., Devor R. E., 2002. “Mechanistic Model for Tapping Process With Emphasis on Process Faults and Hole Geometry” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124.
21. Kayır Y., 2010. “Kılavuz kesici takımları ile AA5083 malzemesine vida açılmasında matkap delik çapının kesme kuvvetlerine etkisi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 25 No 4 Sayfa 671-679.
22. Kayır Y., 2010. “Kılavuz kesici takımları ile AISI 1050 çeliğine vida açılmasında matkap delik çapının kesme kuvvetleri ve momente etkisi” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 15 Sayı 1 Sayfa 99-111.
23. Uzun G., Korkut İ., 2012. “Ti6Al4V Alaşımına kılavuz ile vida açmada kesme formunun deneysel incelenmesi” *International Iron & Steel Symposium*, Sayfa 870-876, 02-04 Nisan, Karabük, Türkiye.
24. Emuge Franken, 2010. “Diş Açma Teknolojisi”. http://www.emugedownloads.com/pdf/prospekte/multi/zp10015_tr.pdf
25. Su, Y., He, N., Li L., Li X.L., 2006. “An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti6Al4V”, *Wear*, vol. 261, 760–766.
26. Sokovic, M., Mijanovic, K., 2001. “Ecological aspects of the Cutting Fluids and its Influence on Quantifiable Parameters of the Cutting Processes”, *Journal Of Materials Processing Technology*, Vol.109, 181-189.
27. Braic, V., Zotia, C.N., Balaceanu, M., Kiss, A., Vladescu, A., Popescu, A., Braic, M., 2010. “TiAlN/TiAlZrN multilayered hard coatings for enhanced performance of HSS drilling tools”, *Surface & Coatings Technology*, vol. 204 pp. 1925-1928.
28. Liu, G., He, N., Man, Z.L., Li, L., 2004. “Cutting Force in the Milling of Inconel 728”, *Key Engineering Material*, Vol. 259-260, pp. 824-828.
29. Wang, Z.G., Rahman, M., Y.S. Wong, 2005. “High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, 105–114.
30. Çiftçi, İ., 2005. “Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 20:2, 205-209.

HELİSEL MATKAP UÇ VE KANAL GEOMETRİSİNİN AISI 4140 ÇELİĞİNİN DELME PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Güven Meral^a, Hakan Dilipak^a, Ulvi Şeker^a ve Çağlar Yavaş^b

*a, Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Tasarım Bölümü, Ankara/TÜRKİYE,
guvenmeral@gazi.edu.tr, hdilipak@gazi.edu.tr, useker@gazi.edu.tr*

*b, Karcan Kesici Takım Sanayi Ve Ticaret Limited Şirketi, Eskişehir/TÜRKİYE,
c.yavas@karcan.com*

Özet

Bu çalışmada, farklı matkap uç ve kanal geometrilerinin delik delme performansı üzerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda ticari olarak tedarik edilebilen en yaygın iki takım geometrisi (Geometri 1, Geometri 2) ile geliştirilen özgün iki kanal geometrisi (Geometri 3, Geometri 4) performansları test edilmiştir. Deneysel çalışmada iki ağızlı, helisel, 10 mm çaplı, yekpare karbür matkaplar kullanılmıştır. Deney deseni için matkapın geometrik formu, kesme hızı ve ilerleme miktarı olmak üzere dörder seviyeli üç farklı kontrol faktörü ile bir Taguchi Deney Tasarımı oluşturulmuştur. Deneyler endüstriyel anlamda yaygın kullanıma sahip AISI 4140 malzeme üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarının istatistiksel değerlendirilmesi için ANOVA analizi kullanılmış, deney parametrelerinin deney sonuçları üzerindeki önemi ve etki oranları değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler ışığında AISI 4140 malzemesi için geliştirilen özgün matkap geometrisi olan Geometri 4 diğer geometrilere (Geometri 1 ve Geometri 2) ve geliştirilen diğer özgün geometriye (Geometri 3) kuvvet ve yüzey pürüzlülükleri açısından üstünlük sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140, Delik delme, helisel matkap, matkap geometrisi, kanal formu

AN INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF TWIST DRILL POINT AND FLUTE GEOMETRY ON DRILLING PERFORMANCE OF AISI 4140 MATERIAL

Abstract

In this study, it is aimed the effects of twist drill point and flute geometry on drilling performance of AISI 4140 material investigated. The two most common twist drills geometries that can be purchased commercially (Geometry 1, Geometry 2) and other two original twist drills geometries which were developed (Geometry 3, Geometry 4) have been tested in the experimental studies. Solid carbide drills used in the drilling tests are have two-flute, helical (twist) and diameter with 10 mm. The geometric form of the drill, cutting speed and feed rate including a four level with three different control factor Taguchi Experimental Design was created for test pattern. In the drilling tests, AISI 4140 steel material has widespread using in the industrial application were used. ANOVA analysis has been used for statistical evaluation of test results and test parameters' importance and effect on the test results were evaluated. After the tests, Geometry 4 has exhibited better results than other Geometries (Geometry 1, Geometry 2 and Geometry 3) for drilling of AISI 4140 material.

Keywords: AISI 4140, Drilling, Twist Drill, Drill Geometry, Flute Form

1. GİRİŞ

Delik delmede birçok faktör delme performansına etkiler. Bunlardan biri de matkap geometrisidir. Endüstriyel uygulamaların çoğunda kullanılan helisel matkaplarda, matkap uç geometrisi ve buna bağlı olarak arkasında oluşan kanalın geometrisi matkabın en kritik bölümüdür. Küçük bir geometri değişikliği matkap performansını büyük ölçüde etkilemektedir.

Etkin ve güçlü bir helisel matkap tasarımı ve üretimi oldukça karmaşık bir süreç olup karmaşık geometrisi diğer kesici takım tipleri ile karşılaştırıldığında tasarım hedeflerinin, düşük kesme kuvveti, aşınma direnci, burulma ve eğilme dayanımı, talaş tahliye yeteneği vb. çok sayıda parametre içerir. İşlemede etkili olan bu parametreler takım tasarımında yüksek düzeyde deneyim gerektirir [1]. Matkap malzemesi, geometrisi ve delik delme parametreleri, delik delme performansı ve delik kalitesi üzerinde önemli etkiye sahiptir [2].

Literatürde yapılan çalışmaları kısaca değerlendirildiğinde;

- Delik delme sürecinde işleme performansına etki eden faktörlerden kesici takım türü ve uç geometrisi, iş parçası malzemesi, delik çapı, tezgâh rijitliği, soğutma sıvısı, kesme hızı ve ilerleme gibi kesme parametreleri ile ilgili çeşitli araştırmaların yapıldığı görülmektedir [3-8].
- Takım ömrü ve matkap uç geometrisi (matkap uç geometrisinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri ve optimum kesme şartlarına ulaşabilmek için matkap uç geometrisinde değişikliklerin yapılması gibi) üzerine yapılan çalışmaların çokluğu dikkat çekmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda özellikle uç geometrisine bağlı olarak kesme kuvveti ve momentlerle ilgili çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir [9-17].
- Takım ömrünü belirleyen aşınma ve aşınmaya sebep olan kesme kuvvetleri ve momentleriyle ilgili yapılan çalışmalarda, uç geometrisi haricinde kesme hızı, ilerleme, delik çapı, tezgâh rijitliği gibi faktörlerin etkileri de çeşitli deneysel ve teorik çalışmalarla incelenmiştir [18-20].

Literatürdeki çalışmaların değerlendirilmesi ışığında, hedeflenen bu çalışma ile endüstride geniş uygulama alanına sahip AISI 4140 malzemenin delinmesi sırasında karşılaşılan problemlerin elimine edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla; delmedeki kesme parametreleri ve takım uç geometrilerinin kesme kuvvetleri ve delik kalitesi üzerindeki etkileri bir arada değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan İş Parçası Malzemesi

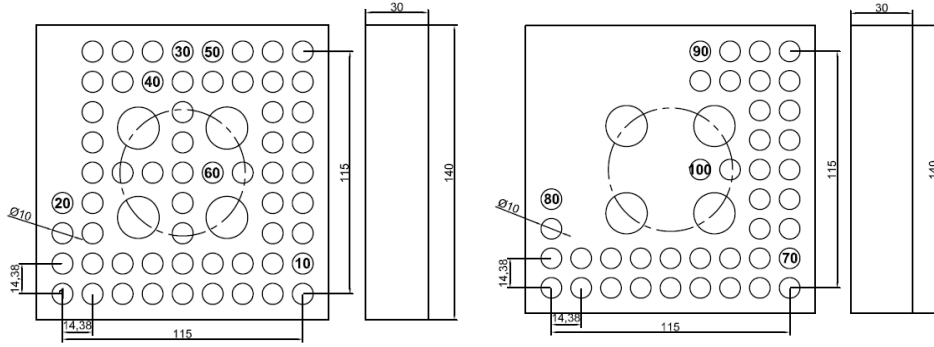
Deneylerde iş parçası malzemesi olarak AISI 4140 kullanılmıştır. Bu malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. deneylerde kullanılan AISI 4140 malzemesinin kimyasal kompozisyonu

Element	C	Mn	Si	Cr	S	P	Mo	Fe
% Ağırlık	0,41	0,83	0,21	0,9	0,027	0,027	0,18	Kalan

Bu malzemeden elde edilen deney numunelerinin şekli ve boyutları, kullanılan takım tezgâhları ve çalışma şartlarına bağlı olarak şekillendirilmiştir. Deneylerde kullanılan numunelerin üzerine deney deliklerinin açılmış olduğu formuyla temsili resmi Şekil 2.1’de verilmiştir. Deneylerde boydan boya delikler delinmiştir. Takım çapı 10 mm seçildiği için $3xD \leq L$ formülüyle malzemelerin kalınlığı 30 mm olacak şekilde belirlenmiştir.

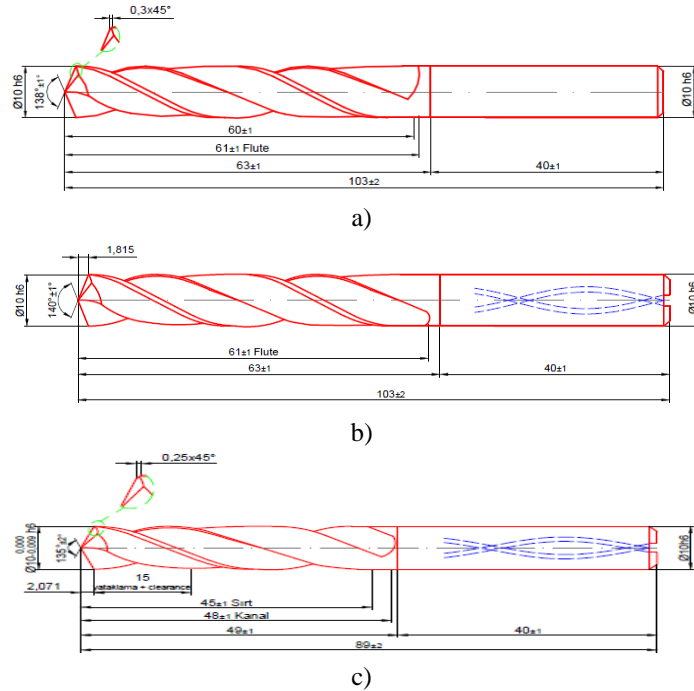
Dinamometre üzerinden sağlık ölçüm yapabilmek adına dinamometre çapı olan 125 mm'lik alan dışına taşmayacak şekilde plakalar üzerine delik yerleşimleri yapılmıştır. 100'er delik tekrarı sağlamak amacıyla her deney için ikişer adet plaka kullanılmıştır.

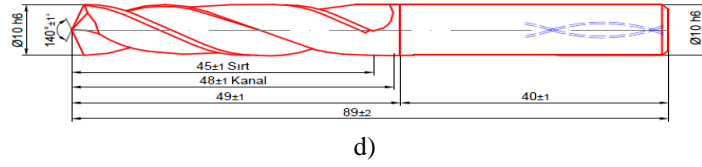


Şekil 2.1. Üzerine delikler açılmış formuyla deney numuneleri

2.2. Kullanılan Kesici Takımlar (Matkaplar) ve Takım Tezgahı

Deneylerde ikisi ticari olarak tedarik edilebilen en yaygın iki takım geometrisine ait, diğer ikisi ise proje kapsamında geliştirilen, iki ağızlı, helisel, 10 mm çaplı yeckpare karbür matkaplar kullanılmıştır. Matkaplar Ceratizit firmasına ait CTS20D kalitesinde %10 Co içeren sementit karbür çubuklardan üretilmiştir. Kaplama işlemi Oerlikon Balzers firmasında yaptırılmıştır. Bu firmanın Balinit Fatura Top adlı, mikrosertliği 3300 HV, kuru sürtünme katsayısı 0,25 sıcak sertliği 900°C olan ve yüksek oksidasyon direncine sahip TiAlN kaplama uygulaması kullanılmıştır. Deneylerde optimum kesme şartlarını sağlamak için kesici takımlar içten soğutma kanallı olarak seçilmiştir. Kullanılan matkaplarda, özgün geometriye sahip takımlarda, helisel kanal boyunda ve buna bağlı tam boyda fark olmakla beraber, kanal boyu 3D delik delme için yeterli olup işleme deneyleri sırasında salgı, titreşim, eksenden sapma vb. şartların yaratacağı olumsuz etkiye bağlı olarak karşılaştırmayı olumsuz etkilemesini elimine etmek için "takım taşma mesafeleri" tüm takımlar için sabit tutulmuştur. Kullanılan kesici takımlarla ilgili geometrik özellikler ve deney tasarım çizelgesinde ifade ettikleri geometrilere ait bilgiler Şekil 2.2'de verilmiştir.





Şekil 2.2. Deneysel olarak kullanılan yekpare karbür matkaplar; a) Geometri 1, b) Geometri 2, c) Geometri 3 (Özgün Geometri 1), d) Geometri 4 (Özgün Geometri 2)

Deneysel olarak Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, CNC Atölyesinde mevcut JOHNFORD VMC-550 CNC freze tezgâhı kullanılmıştır. CNC tezgâhı; üç eksenli lineer ve dairesel enterpolasyon yapabilen, metrik ve inç birimlerinde ISO formatlı programlanabilir FANUC kontrol ünitesi bir Dik İşleme Merkezidir.

2.3. Deneysel olarak kullanılan Taguchi L16 deney tasarımı

Deneysel olarak ikisi ticari olarak tedarik edilebilir en yaygın kullanıma sahip takım geometrisine ait, diğer ikisi ise proje kapsamında geliştirilen iki özgün geometriye sahip takım dikkate alınarak; matkapın geometrik formu, kesme hızı ve ilerleme miktarı olmak üzere dördüncü seviyeli üç farklı kontrol faktörü ile bir Taguchi Deney Tasarımı oluşturulmuştur. Deney girdisi olarak dört farklı geometride matkap, dört farklı kesme hızı ve dört farklı ilerleme değeri seçilmiştir. Kullanılan Minitab paket programı vasıtasıyla dört seviyeli Taguchi L16 deney tasarımı oluşturulmuştur. Çizelge 2.2’de deney tasarımının seviyeleri ve kontrol faktörleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Ana deneysel olarak kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri

Faktörler	Birim	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
Geometri	-	Geometri 1	Geometri2	Geometri 3	Geometri 4
KesmeHızı	m/dk	90	100	110	120
İlerleme	mm/dev	0,15	0,20	0,25	0,30

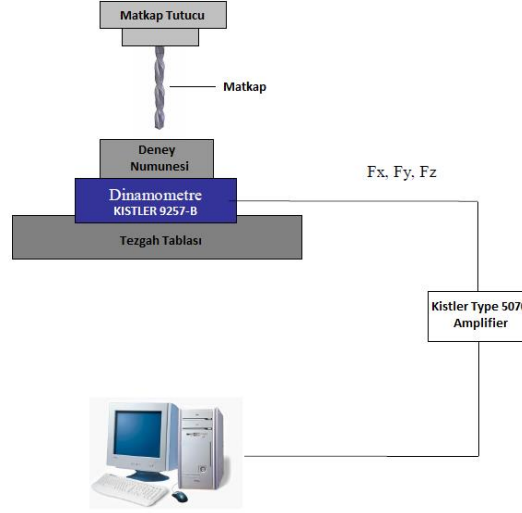
Çizelge 2.2’deki faktörler göz önünde bulundurularak, deneysel çalışma için en uygun tasarım olarak Taguchi L16 ortogonal dizin seçilmiştir. Çizelge 2.3’de Minitab istatistik yazılımı yardımı ile belirlenen deney tasarımı verilmiştir. Yapılan deneylerde AISI 4140 malzemesi için 16 kesici takım ile (aşınma ve/veya sıvanmaları görebilmek amacıyla) 100 delik delme tekrarı yapılarak toplamda 1600 delik delme işlemi yapılmıştır.

Çizelge 2.3. Taguchi L16 ortogonal deney tasarımı

DENEY NO	DEĞİŞKENLER	GEOMETRİ (A)	İLERLEME (mm/dev) (B)	KESME HIZI (m/dak) (C)
1	A1B1C1	Geometri 1	0.15	90
2	A1B2C2	Geometri 1	0.2	100
3	A1B3C3	Geometri 1	0.25	110
4	A1B4C4	Geometri 1	0.3	120
5	A2B1C2	Geometri 2	0.15	100
6	A2B2C1	Geometri 2	0.2	90
7	A2B3C4	Geometri 2	0.25	120
8	A2B4C3	Geometri 2	0.3	110
9	A3B1C3	Geometri 3	0.15	110
10	A3B2C4	Geometri 3	0.2	120
11	A3B3C1	Geometri 3	0.25	90
12	A3B4C2	Geometri 3	0.3	100
13	A4B1C4	Geometri 4	0.15	120
14	A4B2C3	Geometri 4	0.2	110
15	A4B3C2	Geometri 4	0.25	100
16	A4B4C1	Geometri 4	0.3	90

2.4. Yapılan Ölçümler

CNC Dik İşleme Merkezi'nde yapılan deneylerde, delik delme işlemlerinin uygulandığı AISI 4140 malzemesi için takım etkiyen kuvvet ve momentler ölçülmüştür. Her takım için 100 tekrar yapılarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen kuvvet verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Kesme kuvvetlerinin ve momentin deneysel olarak belirlenmesi için kuartz kristal esaslı çalışan KISTLER 9257-B tipi dinamometre ve Kistler Type 5070 amplifier kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 2,3'de şematik olarak gösterilmiştir.

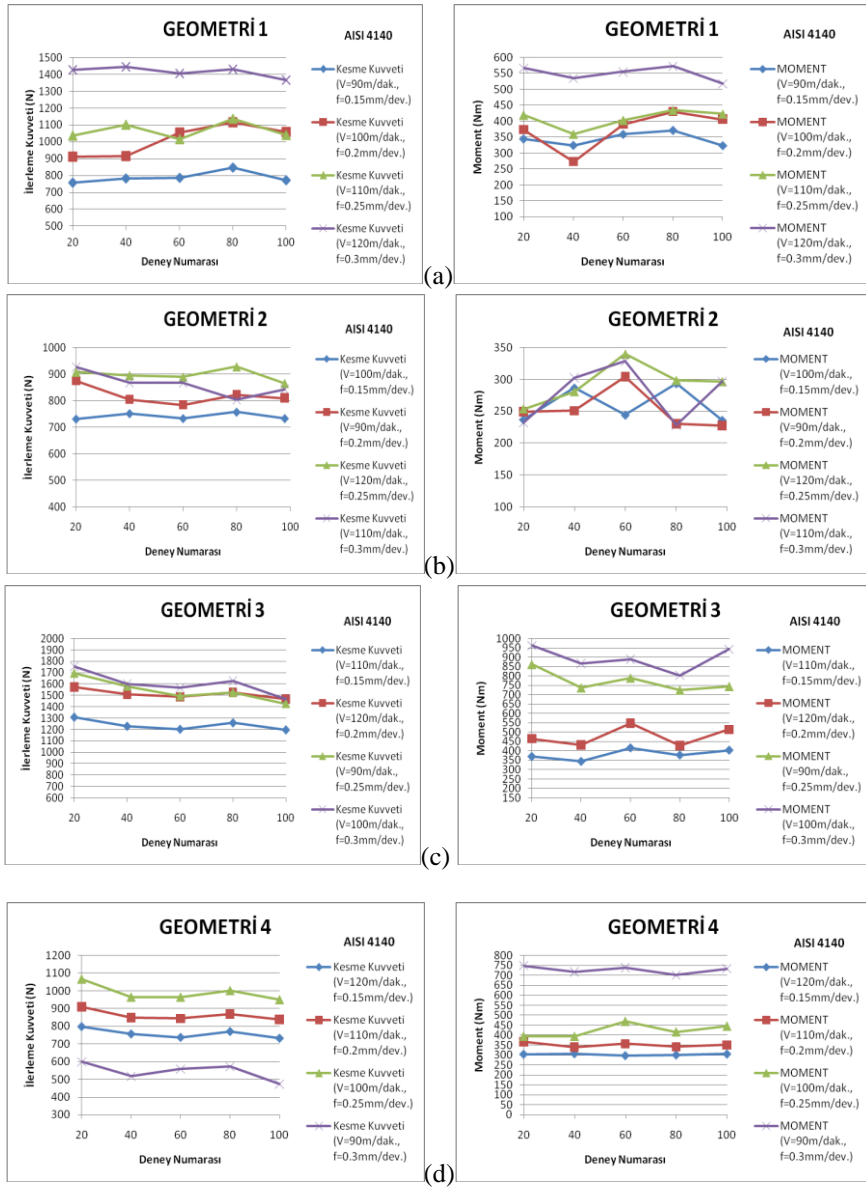


Delinmiş deliklerde, delik yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için "Mahr" marka Perthometer M1 tipi, masa üstü ve yazılı çıktı alınabilen yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. Yatay olarak düz bir zemine konumlandırılan deney numunelerindeki deliklerin ölçümü, yüzey pürüzlük ölçüm cihazını bir aparatla dikey olarak sabitleyerek gerçekleştirilmiştir. Her farklı şart için yapılan 100 delik delme tekrarında 1., 10., 20., 30., 40., 50., 60., 70., 80., 90. ve 100. olmak üzere her şart için 11 deliğin yüzey pürüzlüğü ölçülmüştür. Bu şekilde 100 tekrar için kullanılan aynı kesici takımın bu deliklerdeki durumunun gözlenmesi amaçlanmıştır. Ölçümlerin güvenilirliği için ölçülen her delik için eksenel ve radyal olarak rastgele seçilmiş farklı noktalardan dört ölçüm yapılmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak her delik için girişteki ve çıkıştaki ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri belirlenmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. İlerleme Kuvvetleri ve Momentlerin Genel Değerlendirilmesi

Deneyler sırasında ölçülen ilerleme kuvvetleri ve momentler Şekil 3,1'deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Dört farklı geometri için deney tasarımındaki kesme parametrelerine bağlı olarak 1.delikten 100. deliğe ilerleme kuvveti ve momentlerdeki değişim.

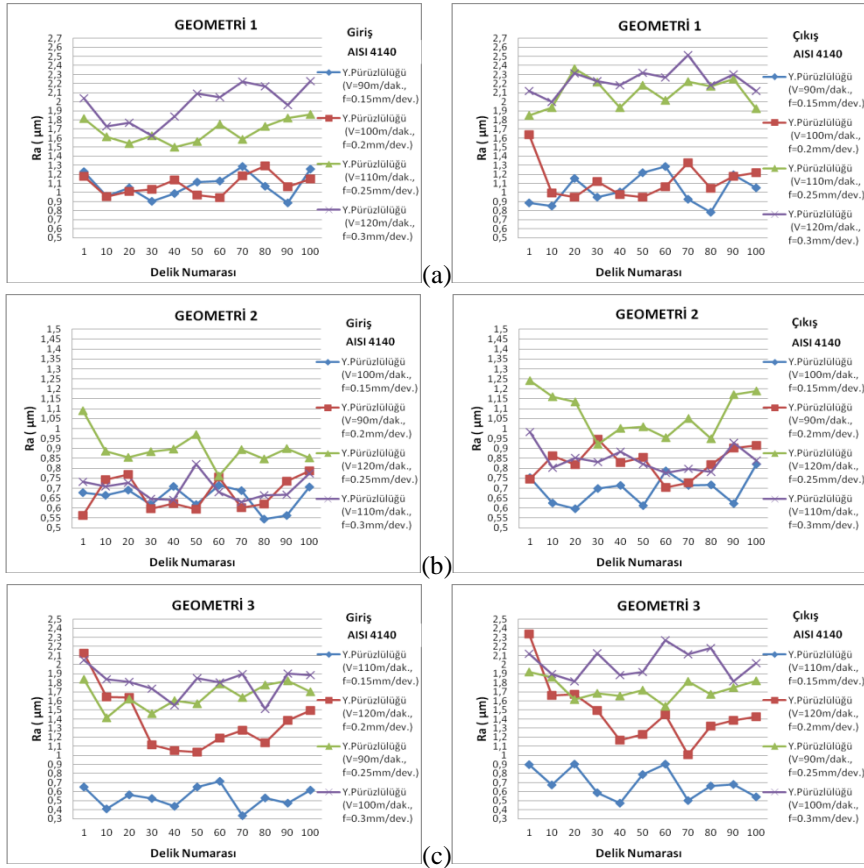
Şekil 3.1'deki grafikler toplu halde değerlendirildiğinde; dört farklı geometri için de kesme parametrelerine bağlı olarak 1. delikten 100. Delğe ilerleme kuvvetindeki değişimlerin benzer eğilim sergilediği ve ilerleme kuvvetlerinde kayda değer bir artışın gözlenmediği görülmektedir. En yüksek kesme kuvvetleri yüksek kesme hızı ve yüksek ilerleme değerlerinde elde edilmiştir. Bu da artan talaş kesitine bağlı olarak beklenen bir durumdur. 100'üncü deliğe doğru kuvvetlerde kısmen bir düşüş eğilimi görülmektedir. Bu düşüş eğilimi de işlenen parçadaki sıcaklıkla beraber ısınmaya bağlı olarak malzemedeki plastik deformasyonun kolaylaşmasına atfedilebilir [21]. Artan kesme hızı ile artan enerji tüketiminin kesme esnasında ısı enerjisine dönüşmesi sonucu artan sıcaklık plastik deformasyonu ve talaş akışını kolaylaştırmakta, buna bağlı olarak da kesme kuvvetlerinde bir düşüş gözlenmektedir [22, 23]. Geometrilere ait ilerleme kuvvetlerinin genel ortalaması alındığında en yüksek ilerleme kuvvetine göre Geometri 4'de yaklaşık %26'lık bir iyileşme sağlandığı görülmektedir. Bu iyileşmenin nedeni olarak matkabın sahip olduğu özgün uç geometrisi ve kanal formuna bağlı talaş kaldırma ve talaş tahliye yeteneğinin daha iyi olması gösterilebilir. İlerleme kuvvetlerinde gözlenene benzer eğilim momentler (Geometri 2 hariç) için de geçerli olup 1'inci delikten 100'üncü deliğe doğru ölçülen momentlerde önemli bir sapma görülmemektedir. İlerleme kuvvetindeki artışa paralel olarak momentlerin de arttığı görülmektedir. Grafiklerde görülen küçük sapmaların muhtemelen talaş kaldırma esnasında talaş sıkışmasına veya talaşın yeniden kesilmesine bağlı olduğu düşünülmektedir. Geometri 2 moment açısından çok fazla

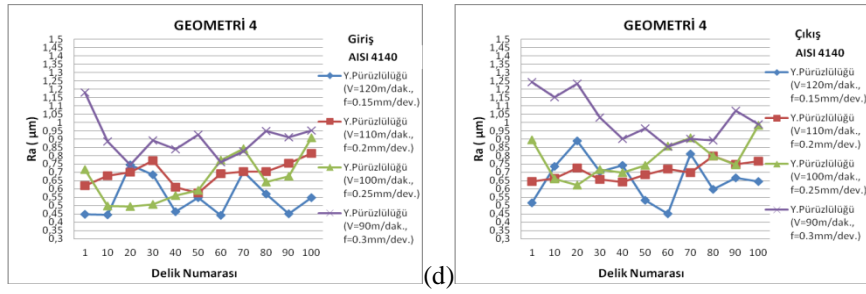
dalgalanma sergilemiştir. Bu durum Geometri 2'nin talaş tahliyesi konusunda diğer geometriler kadar başarılı olmadığını göstermektedir.

3.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Genel Değerlendirmesi

Delinmiş deliklerde, 1. Delikten 100. Deliğe delik yüzeylerinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüklerindeki değişim, kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak, Şekil 3.2'deki grafiklerde gösterilmiştir.

Şekil 3,2'deki grafikler incelendiğinde tüm matkap geometrileri için yüzey pürüzlülük değerlerinde dalgalanmalar görülmektedir. Bunun talaş tahliyesi esnasında talaşın delik cidarında yarattığı izlerden kaynaklandığı ve bu izlerin de düzenli işlemenin yarattığı izlerden farklı düzensizlikler yaratarak ölçülen yüzey kalitelerinde de düzensiz sonuçların gözlenmesine sebep olduğu düşünülmektedir [24]. Değerlerdeki bu sapmalara rağmen, her dört geometri için de, yüzey kalitesinin bir delme işleminden beklenen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin altında olduğu ve delme işlemi için dört geometride de tatminkâr yüzey kalitelerinin elde edildiği söylenebilir [25]. Geometrilere ait yüzey pürüzlülüklerinin genel ortalaması alındığında en yüksek pürüzlülük değerine göre Geometri 4'de yaklaşık %51'lik bir iyileşme sağlandığı görülmektedir. Bu iyileşmenin nedeni olarak Geometri 4'e ait özgün kanal formunun delme esnasında talaşın akışını kolaylaştırdığı ve delik içerisinde talaşın sıkışmasını engelleyerek delik kalitesini arttırdığı söylenebilir. Elde edilen yüzeylerde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin artan kesme hızı ile azaldığı, artan ilerleme değerlerine bağlı olarak ise arttığı görülmektedir. Bu durum, geleneksel talaş kaldırma işlemlerinde beklenen tarzda gelişmiştir. Kesme hızında belli bir noktaya kadar artışın yüzey kalitesini olumlu etkilediği bilinmektedir [22, 23, 26, 27]. Ayrıca talaş kaldırma işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre ilerleme miktarıdır [26]. Dolayısı ile artan kesme hızına bağlı olarak yüzey kalitesinin iyileşmesi, artan ilerlemeye bağlı olarak ise kötüleşmesi beklenen bir sonuçtur.





Şekil 3.2 Dört farklı geometri için deney tasarımındaki kesme parametrelerine bağlı olarak 1.delikten 100. deliğe ilerleme kuvveti ve momentlerdeki değişim.

3.3. Delme İşleminde Matkap Geometrisi ve Kesme Parametrelerine Göre Çıktıların ANOVA Analizi

DeneySEL çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular, grafiklere aktarılmak suretiyle, işlenecek malzeme için değerlendirilmiş ve optimum parametreler belirlenmiştir. AISI 4140 malzeme, Taguchi L16 orthogonal deney tertibine uygun olarak delinmiş, elde edilen deney sonuçlarının Taguchi metodu yardımıyla optimizasyonu yapılmıştır. Bu optimizasyon işleminde, Taguchi kayıp fonksiyonu olarak bilinen ve aynı zamanda sinyal/gürültü oranı (S/N-Sinyal/Noise ratio) olarak da ifade edilen 3 farklı amaca uygun fonksiyon bulunmaktadır. Buna göre, amacın “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi” ve “nominal en iyi” olmasına göre kullanılan eşitliklerden “en küçük en iyi” (Eş 3.1) kullanılarak moment (Ncm), ilerleme kuvveti (N), giriş tarafında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra, μm) ve çıkış tarafında ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra, μm) verileri için S/N oranları hesaplanmış ve sonuçlar toplu halde Tablo 3.1’de verilmiştir.

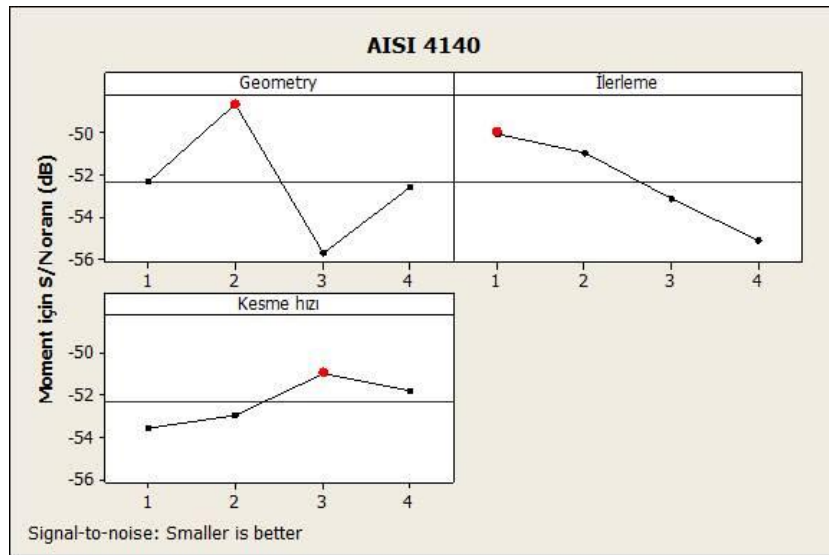
$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1’de y_i performans yanıtının i . gözlem değeri, n bir denemede test sayısıdır.

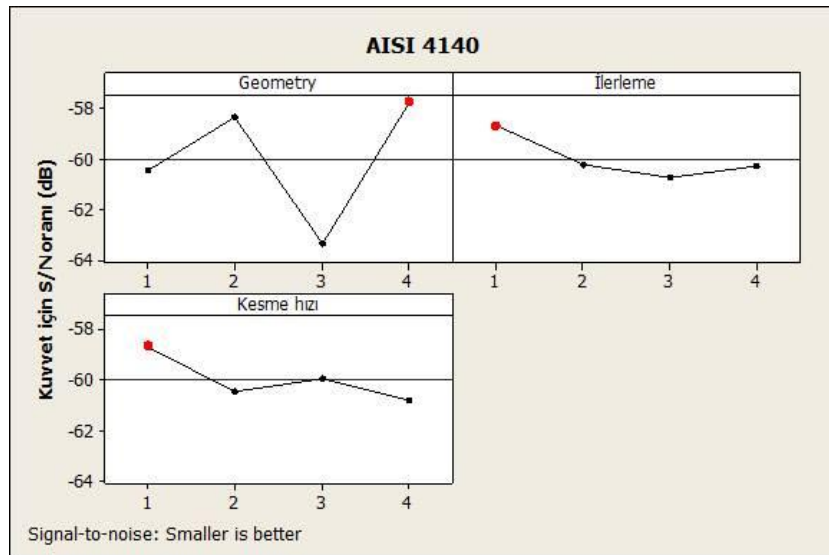
DeneySEL sonuçlar neticesinde S/N oranlarına bağlı olarak (Tablo 3.1) optimal parametreler tahmin edilmiştir. Şekil 3.3’de Moment, Şekil 3.4’de İlerleme Kuvveti, Şekil 3.5’de deliğin giriş tarafındaki ortalama yüzey pürüzlülüğü ve Şekil 3.6’de ise deliğin çıkış tarafındaki ortalama yüzey pürüzlülüğü kontrol faktörlerinin S/N oranlarının grafik olarak gösterimi verilmiştir.

Tablo 3.1. AISI 4140 için deney sonuçları ve S/N oranı, (η)

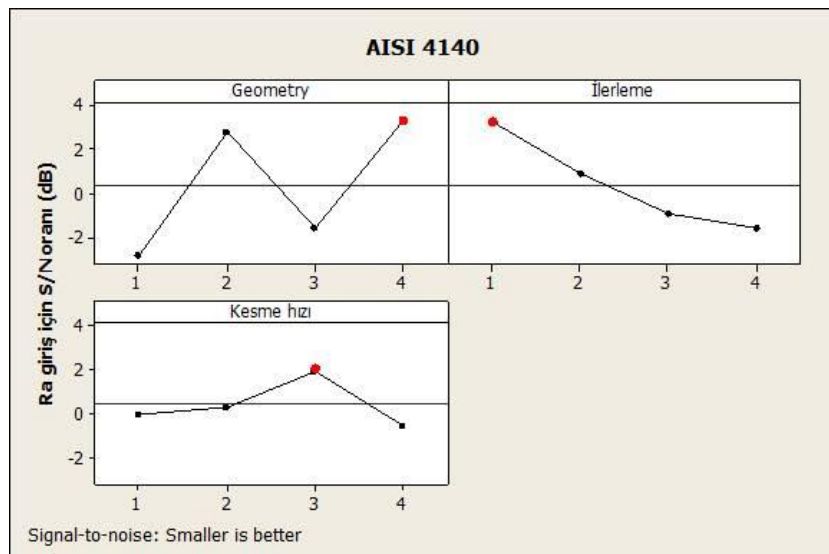
No	A	B	C	Moment		Fz		Ra (Giriş Tarafında)		Ra (Çıkış Tarafında)	
				Ölçülen (Ncm)	S/N (dB)	Ölçülen (N)	S/N (dB)	Ölçülen (μm)	S/N (dB)	Ölçülen (μm)	S/N (dB)
1	1	0,15	90	344,28	-50,7382	789,39	-57,9458	1,079	-0,66043	1,028	-0,23986
2	1	0,20	100	374,98	-51,4802	1030,83	-60,2487	1,084	-0,70059	1,133	-1,08460
3	1	0,25	110	422,67	-52,5200	1072,71	-60,6096	1,672	-4,46473	2,097	-6,43197
4	1	0,30	120	541,05	-54,6647	1418,03	-63,0337	1,912	-5,62976	2,210	-6,88785
5	2	0,15	100	259,13	-48,2704	741,30	-57,3999	0,689	3,23562	0,649	3,75511
6	2	0,20	90	252,11	-48,0318	818,96	-58,2463	0,664	3,55664	0,830	1,61844
7	2	0,25	120	293,63	-49,3560	896,57	-59,0517	0,851	1,40141	1,025	-0,21448
8	2	0,30	110	277,44	-48,8464	860,89	-58,6990	0,705	3,03622	0,836	1,55587
9	3	0,15	110	382,52	-51,6331	1238,95	-61,8611	0,519	5,69665	0,691	3,21044
10	3	0,20	120	477,30	-53,5758	1512,95	-63,5965	1,354	-2,63237	1,414	-3,00899
11	3	0,25	90	809,42	-58,1635	1500,00	-63,3218	1,655	-4,37596	1,751	-4,86372
12	3	0,30	100	956,35	-59,6123	1657,00	-64,3865	1,803	-5,11991	1,904	-5,59334
13	4	0,15	120	302,36	-49,6105	760,00	-57,6163	0,577	4,77648	0,672	3,45201
14	4	0,20	110	350,92	-50,9042	862,39	-58,7141	0,681	3,33706	0,669	3,49148
15	4	0,25	100	424,38	-52,5551	988,86	-59,9027	0,655	3,67517	0,750	2,49877
16	4	0,30	90	750,00	-57,5012	559,74	-54,9597	0,851	1,40141	0,987	0,11366



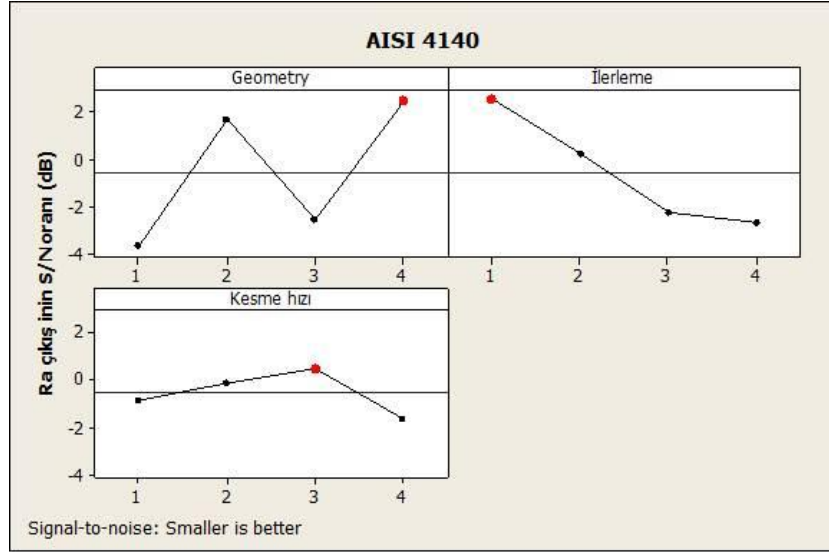
Şekil 3.3. Moment için (Ncm) Mean S/N Oranı



Şekil 3.4. İlerleme Kuvveti için (N) Mean S/N Oranı



Şekil 3.5. Giriş Tarafında Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm) için, Mean S/N Oranı



Şekil 3.6. Çıkış Tarafında Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm) için, Mean S/N Oranı

Şekil 3.3' den moment için yapılan değerlendirmede en uygun kesme parametreleri "A2B1C3" olarak bulunur. Buna göre en iyi sonuçlar; Geometri 2 (A2), İlerleme oranı (B1): 0,15 mm/dev ve kesme hızı (C3):110 m/dak olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.4' den ilerleme kuvveti için yapılan değerlendirmede ise en uygun kesme parametreleri "A4B1C1" olarak bulunur. Buna göre en iyi sonuçlar; Geometri 4 (A4), ilerleme oranı (B1): 0.15 mm/dev ve kesme hızı (C1):90 m/dak olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.5'den giriş tarafındaki ortalama yüzey pürüzlülüğü için yapılan değerlendirmede en uygun kesme parametreleri kombinasyonunun "A4B1C3" olduğu görülmektedir. Buna göre en iyi sonuçlar; Geometri 4 (A4), ilerleme oranı (B1): 0,15 mm/dev ve kesme hızı (C3):110 m/dak olarak belirlenmiştir. Şekil 3.6'dan çıkış tarafındaki ortalama yüzey pürüzlülüğü için yapılan değerlendirmede de giriş tarafında olduğu gibi, en uygun kesme parametreleri kombinasyonunun "A4B1C3" olduğu görülmektedir. Buna göre en iyi sonuçlar; Geometri 4 (A4), ilerleme oranı (B1): 0,15 mm/dev ve kesme hızı (C3):110 m/dak olarak belirlenmiştir.

4. SONUÇ

Deneysel çalışmalardan elde edilen bu veriler ışığında AISI 4140 malzemesi için geliştirilen özgün matkap geometrisi olan Geometri 3 ile delme esnasında karşılaşılan olumsuzluklar dikkate alınarak yapılan geometri düzeltilmesiyle geliştirilen Geometri 4, diğer geometrilere (Geometri 1 ve Geometri 2) kuvvet ve yüzey pürüzlülükleri açısından üstünlük sağlamıştır. Geliştirilen bu özgün geometri (Geometri 4)için;

- AISI 4140 malzemesinin delinmesinde, kesme kuvvetleri ve enerji tüketimi açısından genel olarak uygulanabilir parametreler; "V=90 m/dak, f=0,15 mm/dev" olarak belirlenmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğünün öne çıktığı uygulamalar açısından ise, hem giriş tarafında hem de çıkış tarafında daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için bu parametrelerin; "V=100 m/dak, f=0,15 mm/dev" olarak uygulanması tavsiye edilir.
- Verimlilik beklentisinin yüksek olduğu uygulamalarda; AISI 4140 malzeme için "V=120 m/dak, f=0,20 mm/dev" parametrelerinin kullanımıyla dahi başarılı sonuçlar alınacağı tespit edilmiştir.

SEMBOLLER

F _x :	x yönünde elde edilen ilerleme kuvveti (N)
F _y :	y yönünde elde edilen ilerleme kuvveti (N)
F _z :	Delme işleminde “z” yönünde ölçülen İlerleme Kuvveti (N)
R _a :	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
M:	Delme Momenti (Ncm)
V:	Kesme Hızı (m/dk.)
f:	İlerleme (mm/dev.)

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı “TÜBİTAK 1501- Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı” kapsamında “3130691” No’lu proje ile destekleyen TÜBİTAK-TEYDEB’e ve Karcan Kesici Takım Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi’ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Abele, E., Fujara, M., 2010, “Simulation based twist drill design and geometry optimization”, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 59(1): pages 145-150.
2. Tsao, C.C., 2008, “Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills”, Journal of Materials Processing Technology, 206(1-3): pages 405-411.
3. Kim, K.W., Ahn, T.K., 2005, “Force Prediction and Stress Analysis of a Twist Drill from Tool Geometry and Cutting Conditions”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 6 (1).
4. Li, R., Shih, 2007, “Spiral point temperature and stress in high-throughput drilling of titanium”, Internatioanal Journal of Machine Tools & Manufacture, Article in press.
5. Ogawa, M, Inose, M., Arai, M., Saga T., 1994, “Micro drilling of 5056 wrought aluminum alloy”, Journal of Japan Institute of Light Metals (Japan), 44(9):486-491.
6. Armerago, E.J.A., Cheng, O.Y., 1972, “Drilling With Flat Face and Conventional Twist Drill-II. Experimental Investigation”, Int. J. Mach. Tool Des. Res., 12:37- 54.
7. Galloway, D.F., Leicestershire, 1956, “Some Experiments on the influence of Various Factor on Drilling Performance”, The American Society of Mechanical Engineers, 56-SA-18.
- 8.Hoshi, T. ve Zhao, H., 1989, “Study of a High Performance Drill Geometry”, Annals of the CIRP Vol. 38/1, 87-90.
10. Paul, A., Kapoor, S.G., Devor, R.E., 2005, “Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design ”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45(4-5): 421-431.
11. Saini, D. P. & Woodall, P., 2003, “Drill life optimisation when drilling TI-6AL-4V with HSS drills”. ICME 9th International Conference on Manufacturing Excellence (pp. 1-12). Australia: Instiution of Engineers.
12. Hsieh, J.F., Lin, P.D., 2003, “Production of multifluted drills on six-axis CNC tool-grinding machine”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, 1117-1127.
13. Hsieh, J.F., 2005, “Mathematical model for helical drill point”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 45, 967-977.

14. Tsai, W.D., Wu, S.M., “Mathematical model of multiflute drill point”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 19, 109-120
15. Lin, P.D., Hsieh, J.F., 2002, “Mathematical model for helical drill point”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42, 1181–1193.
16. Thangaraj, A., Wright P.K., 1988, “Computer-assisted predicted of drill-failure using in-process measurements of thrust force”, Journal of Engineering for Industry, 110(4).
17. Devries, M.F. ve Croscheck, M.K., 1988, “An Investigation of the Cutting Mechanisms of the New Point Drill”, Annals of the CIRP Vol. 37/1, 73-78.
18. Rubenstein, C., 1991, “The Torque and Thrust Force in Twist Drilling – I.Theory”, Int. J. Mach. Tool Des. Manufact., 31(4):481-489.
19. Cheung, F.Y., Zhou, Z.F., Gedam, A., Li, K.Y., 2008, “Cutting Edge Preparation Using Magnetic Polishing And Its Influence On The Performance Of High- Speed Steel Drills”, Journal of Materials Processing Technology, 208: 196- 204.
20. Pirtini M., Lazoglu I., 2005, “Forces and hole quality in drilling”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45: 1271-1281.
21. Özçatalbaş Y., “Talaş Kaldırmanın Esasları Ders Notları”, Ankara, (2006).
22. Boothroyd, G., 1981. “Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools”, International Student ed. 5th printing, McGraw-Hill, ISBN 0- 07-085057-7.
23. Shaw, M. C., 1984). “Metal Cutting Principles. London: Oxford University Pres”, ISBN 0-19-859002-4.
24. Zeyveli, M., Demir, H., 2009. “AISI H13 Sıcak İş Takım Çeliğinin İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel İncelenmesi”, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 25, S. 251-261.
25. Ay, İ., <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ot/yuzey.puruzlulugu.pdf>, 2015.
26. Modern Metal Cutting, Practical Handbook, Sandvik, (1994).
27. Gökaya, H., Sur, G., Dilipak, H., 2004. “PVD ve CVD Kaplamalı Sementit Karbür Kesici Takımların İşleme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Z. K. Ü. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Teknoloji Dergisi, Cilt 4, Sayı 7.

TAKIM TEZGAHLARI

KATMANLI İMALAT VE TALAŞLI İMALATIN BİRLİKTE UYGULANDIĞI MELEZ ÜRETİM SİSTEMLERİ ÜZERİNE

Özgür Poyraz^a, Evren Yasa^a, Semih Pilatin^a

a. TEI - TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş. ESKİŞEHİR/TÜRKİYE,
ozgur.poyraz@tei.com.tr, evren.yasa@tei.com.tr, semih.pilatin@tei.com.tr

Özet

Katmanlı imalat teknolojileri, özellikle son yıllarda, sağlamış oldukları avantajlardan dolayı metal malzemelere yönelik olarak fonksiyonel parça üretimi amaçlarıyla kullanımı artmaktadır. Malzeme eksiltme yerine, katman katman malzeme eklemeye dayalı olan katmanlı imalat süreçlerinde üstesinden gelinmesi gereken önemli kısıtlardan bir tanesi, prosesin doğası gereği oluşan yüzey pürüzlülüğüdür. Havacılık gibi zorlayıcı ve yüksek kalite gereksinimlerinin geçerli olduğu uygulamalarda, katmanlı imalat proseslerini takiben ikincil işlemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu ikincil işlemlere örnek olarak %1'den az olan porozite miktarının azaltılması için sıcak izostatik presleme veya yüzey kalitesinin artırılması için talaşlı imalat veya kimyasal aşındırma tekniklerinin kullanılması verilebilir. Genelde yüzey kalitesi veya boyutsal toleransların iyileştirilmesi amaçlarıyla birlikte uygulanan katmanlı imalat ve talaşlı imalatın, aynı tezgâh üzerinde adaptasyonu ile melez üretim sistemleri ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, melez sistemler ve prosesler hakkında kapsamlı bir literatür araştırması ve derlemesi yapılmış olup, farklı katmanlı imalat yöntemlerinin talaşlı imalat ile entegrasyonu için yapılan çalışmalara yer verilmiş, imalat süreleri ve maliyetler açısından yapılan karşılaştırmalara dikkat çekilmiştir.

Anahtar kelimeler: Katmanlı İmalat, Talaşlı İmalat, Melez Üretim, Lazerle Yığma

A REVIEW OF HYBRID PRODUCTION SYSTEMS USING ADDITIVE MANUFACTURING AND MACHINING

Abstract

Additive manufacturing technologies, especially in recent years, are increasingly used for manufacturing of functional parts of metallic materials. Surface roughness is one of the major constraints to be overcome for additive manufacturing, which is formed due to the layered nature of the process. In order to satisfy high quality requirements for applications such as aviation, secondary processes are required following to additive manufacturing. Examples of these secondary processes are hot iso-static pressing for reducing porosity under 1% and machining or chemical ablation techniques for improving surface quality. Hybrid production systems has emerged by integration of additive manufacturing and machining on the same machine, which are usually employed together for improving surface quality and dimensional accuracy. This paper presents a comprehensive review on hybrid production systems which employs additive manufacturing processes and machining together. Benchmark studies for production times and costs are also highlighted in this study.

Keywords: Additive Manufacturing, Machining, Hybrid Production, Laser Cladding

1. GİRİŞ

Katmanlı imalat, konvansiyonel imalat teknolojilerine göre oldukça yeni teknolojilerden oluşmasından dolayı, bu konuda ortaya koyulan ilk standartlar temel terminoloji üzerinedir. Bunlardan biri olan ASTM F2792.429494-1 standardına göre katmanlı imalat, nesnelere 3B (3 boyutlu) model verisinden, genelde üst üste dizilen katmanlar halinde malzemelerin birleştirilerek oluşturulduğu bir imalat yöntemidir [1]. Benzer şekilde, VDI 3404 Katmanlı İmalat Terminolojisi Standardı'nda tanımlandığı haliyle, iş parçasının birbirini takip eden katmanlar veya birimlerle inşa edildiği üretim prosesine katmanlı imalat denilmektedir [2]. Katmanlı imalat teknolojileri oldukça geniş bir proses grubunu içermekte ve her bir proses ile üretilmesi mümkün olan malzeme grupları da farklılıklar göstermektedir. Farklı katmanlı imalat teknolojileri katman oluşturma tekniği, kullanılan malzeme formu ve proses konfigürasyonu açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Tablo 1'de farklı katmanlı imalat türleri ve metal malzemeler için kullanılan yöntemler verilmiştir. [3].

1990'ların başından beri kullanılmakta olan katmanlı imalat teknolojileri, geçmişte görsellik sağlayan modeller, parçaların yerine uyduğunu ve düzgün çalıştığını görme amaçlı prototipler ve takım-kalıp yapmak için kullanılırken, artık birçok sektörde çalışmalar, direk parça imalatı üstünde yoğunlaşmaktadır. Katmanlı imalatın gelişimini yaklaşık son 30 yıldır takip ederek raporlayan Wohlers Raporu'na göre, direk parça imalatı, toplam katmanlı imalat içinde 2000'li yıllardan bu yana oldukça hızlı bir değişim göstermiş olmakla birlikte, 2003'te %4'ten küçük olan bu performans indeksi 2013'te yaklaşık %30'lara ulaşmış durumdadır [4].

Tablo 1. Farklı katmanlı imalat türleri [3].

Malzeme Formu	Proses Adı veya Kısaltması	Yerleşim	Katman Oluşturma Tekniği	Faz Değişimi	Malzemeler
Sıvı	Stereo-lithography	Sıvı reçine içerisinde	Sıvı katman biriktirme	Foto-polimerizasyon	Akrilat, epoksi, reçine
Sıvı	FDM (FFF)	Nozul içerisinde erimiş malzeme	Sürekli ekstrüzyon ve biriktirme	Soğuma ile katlaşma	Polimer (ABS, VA), parafin, metal
Sıvı	Ink-jet Printing	Erimiş malzeme damlaları	Damla biriktirme	Soğuma ile katlaşma	Polimer, parafin
Toz	3D Printing	Toz yatağı ve bağlayıcı	Toz katmanı ve damla biriktirme	Bağlayıcının soğuyarak katlaşması ve buharlaşması	Seramik, metal, polimer
Toz	LAM (SLM/ DMLS/ Laser Cusing)	Toz yatağı	Toz katmanı	Lazer ile eritme, sonrasında soğuma ve katlaşma	Metal
Toz	SLS	Toz yatağı	Toz katmanı	Lazer ile sinterleme	Metal, metal ile seramik, metal ile bağlayıcı
Toz	Laser Cladding (LMD/LENS/DMD/DLD)	Nozul ile toz sevkıyatı	Sürekli toz enjeksiyonu	Lazer ile erime, sonrasında soğuma ve katlaşma	Metal
Toz	EBM	Toz yatağı	Toz katmanı	Elektron ışını ile eritme, sonrasında soğuma ve katlaşma	Metal
Katı	LOM	Saçların beslenmesi, kesilmesi ve birleştirilmesi	Sac plakaların biriktirilmesi	Lehim, yapıştırıcı veya diğer bağlayıcının faz değişimi	Polimer, kompozit, metal, seramik
Gaz	SLCVD	Lazer içerisinde gaz akışı	Gaz yoğunlaşması	Kimyasal tepkime	Metal, seramik

Katmanlı imalat yöntemlerinde benzer proses adımları takip edilmektedir. Bunlar sırası ile 3 boyutlu CAD modelin oluşturulması, CAD modelin STL (Stereolithography) dosya formatına dönüştürülmesi, proses öncesinde belirlenen kalınlıklarda katmanlara ayırma, süreç parametrelerinin seçilmesi ve iş hazırlığı, parçanın katmanlar halinde inşa edilmesi, parçanın makine veya inşa platformundan ayrılarak destek yapılarından temizlenmesi ve ikincil işlemler olarak gerçekleştirilir [3]. Takım veya kalıp ihtiyacı olmadan parça üretimine

İmkân veren katmanlı imalat süreçlerinde üstesinden gelinmesi gereken önemli kısıtlardan bir tanesi, prosesin doğası gereği oluşan yüzey pürüzlülüğüdür. Bahsi geçen süreç adımlarından CAD geometrisinin katmanlara ayrılması ve parçanın katmanlar halinde inşa edilmesi sırasında, eğimli yüzeylerin katmanları arasında oluşan kaymalar yüzey pürüzlülüğünün en önemli sebebidir [5] ve bu durum “merdiven etkisi (ing. Stair Effect)” olarak tanımlanmaktadır [6]. Merdiven etkisi seçilen yöntem ve katman kalınlığına göre değişkenlik göstermektedir [7], [8]. Yapılan bir çalışmada [8] farklı unsurlara sahip bir karşılaştırmalı değerlendirme geometrisi için ikincil işlemler öncesi SLS (ing. Selective Laser Sintering) prosesi ile ulaşılan ortalama yüzey kalitesi Ra-12.1µm değerinde olmasına rağmen FDM (ing. Fused Deposition Modelling) ile ulaşılan ortalama yüzey kalitesi Ra-18.4µm değerine kadar çıkmaktadır. Öte yandan, günümüzde, Lazerle Metal Toz Ergitme Proseslerinde ulaşılan yüzey kalitesi değerleri 5 µm'nin altındadır [52].

Gerek merdiven etkisi, gerekse diğer etkiler ile oluşan yüzey pürüzlülüğü, ürün performansı ve bununla ilgili olarak tasarım gereksinimleri açısından önemlidir. Yüzey pürüzlülüğünün ürün performansı açısından etkili olduğu özellikler arasında akış, sürtünme, aşınma, sertlik, yorulma, kaplanabilirlik ve kullanıcı ile etkileşim gibi pek çok özellik sayılabilir [53]-[55]. Sıralanan özellikler içerisinde yorulma ömrü parçanın toplam çalışma süresini doğrudan etkilemektedir. Bu amaçla havacılık sektöründe kullanımı yaygın olan nikel esaslı süper alaşımlar, titanyum ve alüminyum alaşımları için yorulma ömrü üzerine çalışmalar yapılmaktadır [56]-[59]. Yapılan çalışmalarda yüzey kalitesi, mikro yapı boşlukları ve artık gerilmeler gibi etkenlerin yorulma ömrünü etkilediği raporlanmaktadır. Yüzey kalitesinin, ürün performansını etkileyen farklı özellikler açısından önemi doğrultusunda iyileştirilmesi gerekmektedir. Yüzey kalitesinin iyileştirilmesi genel olarak katmanlı imalat sürecinin ardından gerçekleşir ve ikincil işlemler arasında değerlendirilir [3]. Kullanılacak ikincil işlemler tasarımdan gelen kalite gereksinimlerine göre belirlenir ve istenen yüzey hassasiyetini sağlayacak en verimli işlem seçilir. Uygulanabilecek ikincil işlemler arasında talaşlı imalat, titreşimli yüzey işleme (ing. Vibratory Finishing), aşındırıcı akışkanla yüzey işleme (ing. Abrasive Flow Machining) ve benzeri pek çok işlem araştırılmaktadır [9]. Bunlara ek olarak geliştirilen yeni teknolojiler [10] yüzey kalitesi açısından daha iyi sonuç verseler de, işlem sürelerinin uzunluğu sebebi ile ticari açıdan değerlendirilmeleri gerekmektedir. Örnek olarak, havacılık motorlarında kullanılan, yaklaşık ölçüleri 75mm x 45mm x 30mm olan ve çift kademedede toplam 12 adet kanatçık bulduran bir stator parçasının ortalama yüzey kalitesinin Ra-11.1 µm değerinden Ra-0.033 µm işlenmesi için toplam 66 saat gerektiği raporlanmaktadır [9].

Katmanlı imalat teknolojileri sonucunda elde edilen yüzey kalitesinin istenen düzeyde olmaması ve ikincil işlemler için ayrılan sürenin kısaltılarak toplam proses süresinin iyileştirilmesi amaçları ile, katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte uygulandığı melez üretim sistemlerinin araştırılması gündeme gelmiştir. Katmanlı imalatın sunduğu esnek üretim imkânı, talaşlı imalat ile birleştirilmiş ve bu sayede ürünlerin yüzey işlemleri hassas bir şekilde yapılırken, makine kurulumu nedeni ile yaşanan zaman kayıpları ve hatalı kurulumdan kaynaklanan kalite problemleri daha düşük seviyelere indirilmiştir. Melez kavramı farklı amaçlarla kullanılıyor olmasından dolayı, karmaşıklığın engellenmesi amacıyla, tanımlanması gerekmektedir:

- Melez imalat süreçleri farklı fiziksel ilkelerin tümleşik olarak uygulandığı süreçlerdir ve bunlara örnek olarak talaşlı imalat sırasında malzeme kaldırma oranının artırılması amacıyla geliştirilmiş olan lazer destekli işleme süreci verilebilir [11].
- Birbirini takip eden süreç adımlarında uygulanan proseslerin aynı anda uygulanması ile melez imalat gerçekleştirilebilir ve bu duruma örnek olarak gerdirerek şekil verme (ing. Stretch Forming) ve artımlı sac şekillendirme (ing. Incremental Sheet Forming) verilebilir [12].
- Melez üretim sistemlerinde farklı süreçlerin tek bir alanda yapılması mümkündür ve bu duruma örnek olarak frezeleme ve tornalamanın aynı alanda gerçekleştirilmesi verilebilir [13]. Bu durum için yapılabilecek örneklemeler alışlagelmemiş imalat süreçlerinde de genişletilebilir. Lazerle katmanlı imalatın lazer erozyon veya lazer ergitme ile birleştirildiği çalışmalar bu durumu yansıtmaları açısından uygun bir örnektir [14], [35].
- Melez kavramı için yapılabilecek tanımlamalar arasından en sonuncusu melez ürünler üzerinedir. Melez ürünler farklı malzemelere, farklı yapıya veya farklı işlevlere sahip ürünler olarak tanımlanmaktadır [15].

Katmanlı imalat süreçleri, katmanlı imalat çeşitleri, katmanlı imalat sonucunda ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü, ikincil işlem gereksinimleri ve melez üretim sistemleri hakkındaki tanımlamaların yapılmasından sonra bu bildirinin devam eden bölümlerinde katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte uygulandığı melez üretim sistemleri üzerine yapılan araştırmalar ve çalışmalar aktarılmaktadır.

2. KATMANLI İMALAT VE TALAŞLI İMALATIN BİRLİKTE UYGULANDIĞI MELEZ ÜRETİM SİSTEMLERİ

Katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte uygulandığı melez üretim sistemlerinde temel ilke parçanın malzeme eklenerek oluşturulması ve sonrasında talaşlı imalat vasıtası ile parça kalitesinin hem boyutsal toleranslar hem de yüzey özellikleri anlamında iyileştirilmesine dayanmaktadır. Aynı alanda gerçekleştirilen farklı iki süreçte, ortak kontrol ve hareket sistemlerinin kullanımı toplam sistem maliyetlerini düşürdüğü için yapılan çoğu çalışmadan aksenel hareket özelliğine sahip sistemler tercih edilmiştir. Bu sistemler genellikle katmanlı imalat süreci için yığma ve talaşlı imalat süreci için frezeleme olarak tercih edilmektedir [16]-[34].

2.1. Katmanlı İmalat Ve Talaşlı İmalatın Birlikte Uygulandığı Melez Üretim Sistemlerinin Sınıflandırılması

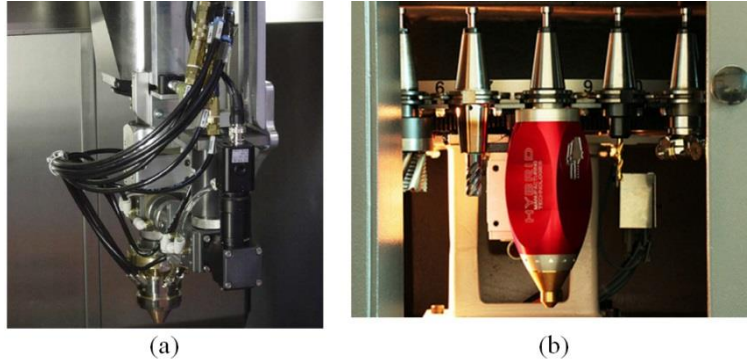
Katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte uygulandığı melez üretim sistemlerinin büyük bir çoğunluğunda yığma yöntemleri ile talaşlı imalat birlikte kullanılmaktadır. Ancak, mevcut çalışmalara konu olan katmanlı imalat yöntemlerinin ürün çeşidi ve parça malzemesi gibi konular açısından sınıflandırılmaları bu alandaki eksikliklerin ve ihtiyaçları belirlemesi anlamında faydalıdır. Tablo 2, farklı çalışmalarda kullanılmış olan melez üretim sistemlerini özetlemektedir.

Tablo 2. Literatürde melez sistemler ile ilgili yer alan farklı çalışmalarda ele alınan özellikler

Kaynak No.	Katmanlı İmalat Yöntemi	Talaşlı İmalat Yöntemi	Malzeme	Ürün / Uygulama Alanı
[16]	Ergiterek yığma	Frezeleme	Muhtelif (Silikon, alümina, poliüretan)	Muhtelif (arter modeli, minyatür türbinler)
[17]	Lazer kaynağı	Frezeleme	Çelik (AWS:ER70S-6)	Dikdörtgenler prizması
[18]	Lazer yığma	Frezeleme	SS41	Kalıp
[19]	Lazer yığma	Frezeleme	Metal malzemeler	Deneme geometrisi
[20]	Ergiterek yığma	Frezeleme	Muhtelif (Alüminyum oksit, bakır)	Muhtelif (hatve milleri, kalıp ekleri)
[21]	Gaz-metal ark kaynağı ile yığma	Frezeleme	Metal malzemeler	Kalıp
[22]	Lazer yığma	Frezeleme	Metal malzemeler	Muhtelif (boru geometrisi, serbest yüzeyler)
[23]	Lazer yığma	Frezeleme	Metal malzemeler	Deneme geometrisi
[24]	Ergiterek yığma	Frezeleme	Polimer	Tutucu (ing. grasper)
[25]	Lazer yığma	Frezeleme	Kalıp çeliği / Ti-6Al-4V	Deneme geometrisi
[26]	Gaz-metal ark kaynağı ile yığma	Frezeleme	Kalıp çeliği	Kalıp
[27]	Ergiterek yığma	Frezeleme	Polimer	Biyolojik uyumlu yapılar
[28]	Gaz-metal ark kaynağı ile yığma	Frezeleme	Kalıp çeliği	Kalıp
[29]	Plazma yığma	Frezeleme	Nikel esaslı süper alaşım	Kompresör çarkı
[30]	Lazer yığma	Frezeleme	Kobalt esaslı alaşım	Kalıp
[38]	Ekstrüzyon	Frezeleme	Polimer	Muhtelif (profil, prizmatik parçalar)

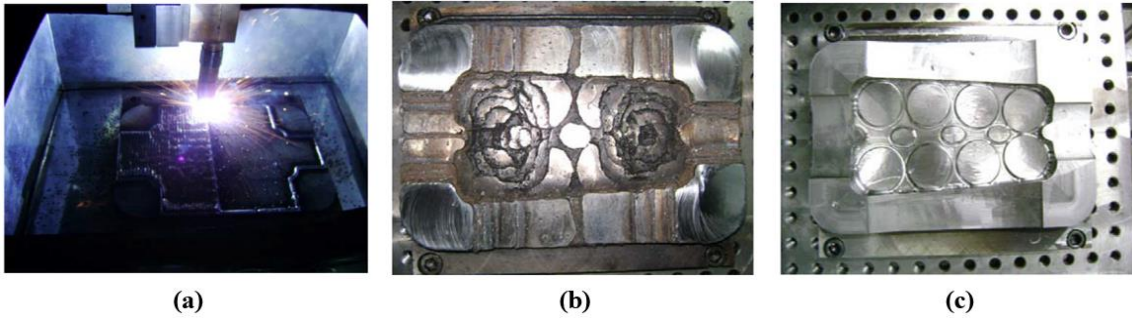
6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Tablo 2’de aktarıldığı üzere, melez üretim sistemleri içerisinde, katmanlı imalat yöntemi olarak lazer yığma yönteminin sıklıkla tercih edildiği görülmektedir. Bunun en önemli sebebi lazerle yığma sistemleri için kullanılan kafaların aksel bir CNC freze tezgâhına kolay uygulanabilirliğidir. Şekil 1’de mevcut CNC freze tezgâhlarını melez üretime adapte etmek için kullanılan lazer yığma kafalarına ait örnekler verilmektedir. Şekil 1 (a)’da gösterilen lazer yığma kafası Hermle C20U tezgâhına adapte edilmiştir.



Şekil 1. Lazer yığma kafaları [30] (a), [37] (b)

Yapılan sınıflandırmada melez üretim sistemleri için katmanlı imalat aşamasında tercih edilen diğer seçeneklerin ark [21][26], [28] ve plazma [29] kaynağı ile yığma sistemleri olduğu görülmektedir. Bu sistemlerin lazer sistemlerine kıyasla bazı dezavantajları bulunmaktadır. Dikkat edilmesi gereken hususların başında CNC ve kaynak ünitelerinin elektriksel ve fiziksel açıdan yalıtılması gelmektedir. CNC ünitesi ile kaynak yığma kafasının elektriksel açıdan yalıtılması sayesinde kıvılcıkların CNC ünitesine atlamaması sağlanır. Bununla birlikte fiziksel yalıtım kaynak yığma sırasında ortaya çıkan yüksek ısının tezgâh tablasına, kızaklarına veya diğer parçalara zarar vermemesi için uygulanır. Son olarak tezgâh parçalarını kaynak yığma sırasında ortaya çıkan ergimiş haldeki metalden de korumak gerekmektedir. Şekil 2 (a)’da gaz metal ark kaynağı ile yığma prosesi ve çevresinde saclar vasıtası ile yapılmış yalıtım, Şekil 2 (b)’de yığma sonucunda erkek kalıp ve Şekil 2 (c)’de frezeleme ile nihai işlenmiş erkek kalıp görülmektedir [28].



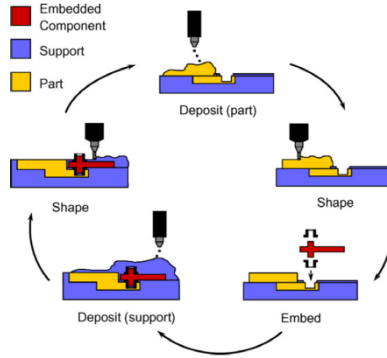
Şekil 2. Ark kaynağı yığma prosesi (a), yığılmış kalıp (b), işlenmiş kalıp (c) [28].

Melez üretim sistemlerinin, seri imalat için uygunluğunun değerlendirilmesinde rol oynayan en önemli faktörler arasında sistemin maliyet etkin olup olmamasıdır. Karunakaran ve diğerleri, bu kapsamda, gaz metal ark kaynağı kullanılan bir melez üretim sistemi ile talaşlı imalat maliyetlerini karşılaştırmıştır [26]. Tablo 3’te maliyet ve üretim süresi için elde edilen sonuçlara yer verilmektedir. Bu çalışmada melez üretim sisteminin kullanımı ile üretim zamanlarında yaklaşık olarak 40% düşüş sağlandığı ortaya koyulmuştur. Bunun yanında, kullanılan kaynak telinin kalıp çeliği blok fiyatına kıyasla yüksek olmasından ötürü ham malzeme maliyeti etkisi ile toplamda ekonomik avantaj 30% oranına dahi ulaşamamıştır.

Tablo 3. Talaşlı imalat ve melez üretimin süre-maliyet açısından karşılaştırılması [26].

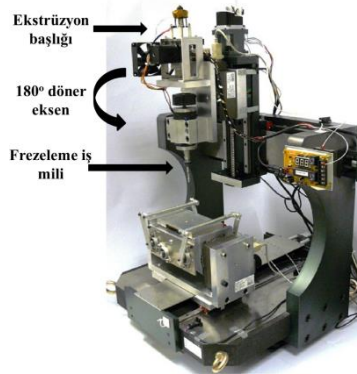
Talaşlı İmalat		Melez Üretim	
İşlem Adımı	Süre (dak.)	İşlem Adımı	Süre (dak.)
NC Programlama	480	Veri İşleme	15
Kaba Frezeleme	960	Ark Kaynağı ile Yığıma	405
Hassas Frezeleme	1020	Hassas Frezeleme	1020
Toplam Süre	2460	Toplam Süre	1440
Toplam Maliyet	433 \$	Toplam Maliyet	314 \$

Yığıma ilkesini kullanan sistemlerin bazılarında, yığıma ve talaşlı imalat adımları arasında gömülü komponentler kullanılarak onların üzerinde yığıma ve talaşlı imalat işlemlerine devam edilmektedir [27]. Şekil 3'te gömülü komponentler kullanan bir sisteme ait akış şeması verilmektedir.



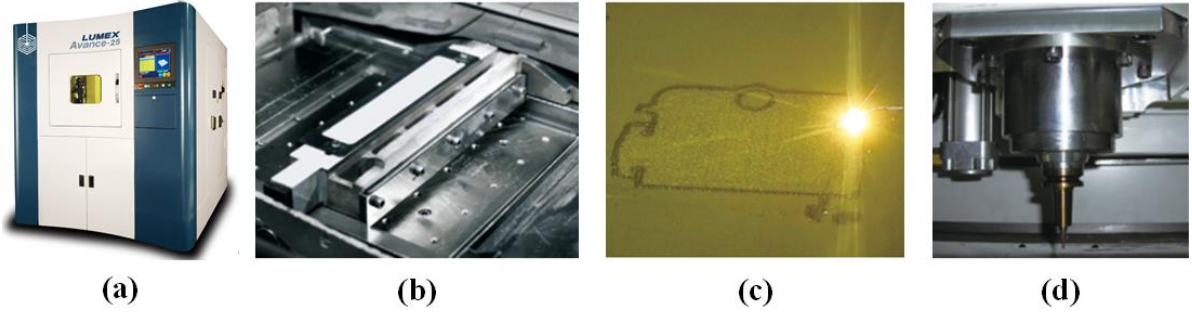
Şekil 3. Gömülü komponentlerin kullanıldığı melez üretim sistemine ait akış şeması [27].

Yığıma ilkesini kullanan sistemler dışında ekstrüzyon ile biriktirme yöntemini kullanan sistemler de mevcuttur. Daha çok polimer esaslı malzemeler için seçilen yöntemde, malzeme besleyen ünitenin CNC iş miline direk entegrasyonunun zor olması sebebi ile iş millerinin çift taraflı ve 180° döner bir eksen ile tasarlanması uygulanan yöntemler arasındadır [38]. Şekil 4'te 180° döner eksene sahip bir melez üretim sistemi görülmektedir.



Şekil 4. Ekstrüzyon ve frezelemenin birlikte kullanıldığı melez üretim sistemi [38].

Toz yatağında lazerle metal toz ergitme ve frezelemenin birleştiği melez sistemler de metal malzemelerin üretilmesi için kullanılmaya başlanmıştır [42]. Şekil 5'te lazerle metal toz ergitme ile katmanlı imalat gerçekleştiren bir melez üretim sistemine ait detaylar görülmektedir.



Şekil 5. Melez üretim sistemi (a), toz serici (b), ergitme süreci (c), frezeleme kafası (d) [42].

Katman kalınlığını daha fazla kullanmak ve bu sayede üretim sürelerini azaltmak için farklı tekniklerin denenmesine devam edilmektedir. Bu tekniklerin kullanıldığı çalışmalardan bir tanesinde ham malzemenin arka yüzeyinin talaşlı imalatını takiben parça ters çevrilmekte, birleştirilmekte ve sonrasında üstte kalan ön yüzeyi talaşlı işlenerek üretim döngüsü devam etmektedir [33].

2.2. Ticari Olarak Temin Edilebilen Melez Üretim Sistemleri

Son kullanıcılar açısından katmanlı imalat ve talaşlı imalat sistemlerinin entegrasyonu, sağlıklı, güvenli ve maliyet-etkin bir biçimde çalıştırılması kolay değildir. Bu sebeple kullanıcılar açısından tercih edilen ve günden güne kullanımı artan melez üretim sistemleri son 5 yılda ticari olarak temin edilebilir hale gelmiştir. Menşei farklı ülkeler olan, farklı katmanlı imalat prensipleri kullanan ve 3-5 eksen frezeleme kabiliyetleri ile donatılmış makineler bulunmaktadır. Bu sistemlere ait makine, modüler kafa ve yazılımları içeren bir özet Tablo 4'te verilmektedir.

Tablo 4'te görüleceği üzere ticari olarak temin edilebilen ürünlerin kullandığı katmanlı imalat sistemleri akademik çalışmalarla benzerlik göstermektedir ve lazer yığıma sistemlerinin kullanım oranı dikkat çekmektedir. Makineler arasında toz yatağı kullanan katmanlı imalat sistemleri ise en düşük orana sahiptir. Bunlarla beraber melez üretim sistemlerinin programlanmasında kullanılan yazılımlar henüz yeni ticarileşmektedir ve tabloda verilmeyen diğer bir yazılım [44] da geliştirilme aşamasındadır.

Tablo 4. Ticari olarak temin edilebilen melez üretim sistemleri

Kaynak No.	Ürün	Marka	Model	Katmanlı İmalat Yöntemi	Talaşlı İmalat Yöntemi	Malzeme	Parça Boyutları
[39]	Makine	HERMLE	MPA (C40 platformunda)	Ergiterek Yığıma	5-Eksen Frezeleme	H13, 316L, Titanyum, Alüminyum, Bronz, Bakır	520 x 520 x 140 mm
[40]	Makine	DMG-MORI	Lasertec 65 3D	Lazer Yığıma	5-Eksen Frezeleme	Metal alaşımları	Ø 600 x 400 mm
[41]	Makine	MAZAK	INTEGREX i-400AM	Lazer Yığıma	5-Eksen Frezeleme - Torna	Belirtilmemiş	Ø 400 mm
[42]	Makine	LUMEX-MATSUURA	Lumex Avance-25	Lazer sinterleme	3-Eksen Frezeleme	Çelik, Kalıp Çeliği, Titanyum	Ø 250 x 250 mm
[43]	Makine	FABRISONIC	Sonic-Layer 4000	Kaynak ergitme	3-Eksen Frezeleme	Metal alaşımlar, Ti-Al, SiC	600 x 900mm
[37]	Modüler Kafa	HMT	AMBIT	Lazer Yığıma	3-5 Eksen Frezeleme	Metal alaşımları	-

[39]	Yazılım	HERMLE	MPA Studio	Lazer Yığma	5-Eksen Frezeleme / Ölçme	-	-
[40]	Yazılım	DMG-MORI	Lasersoft	Lazer Yığma	5-Eksen Frezeleme	-	-

2.3. İşleme Parametreleri

Katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte uygulandığı melez üretim sistemleri için gerekli olan çalışmalar arasında süreç parametrelerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Katmanlı imalat ve talaşlı imalat yöntemlerinin ayrı ayrı parametreleri bahsi geçen konularla ilgili çalışmalarda mevcuttur.

Bununla beraber katmanlı imal edilmiş parçaların talaşlı imalat ile işlenmesi ve bu işlemde yöntem, parça malzemesi, takım malzemesi ve kesme parametrelerinin etkilerini inceleyen çalışmalar, kalite ve verimliliği artırmak açısından gereklidir. Bu konu ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır [45]-[47] ve bu çalışmalar yapılması için ihtiyaç devam etmektedir. Bu ihtiyacı temel sebebi benzer özelliğe sahip alaşımlar için katmanlı imal edilmiş malzemeler ile alışlagelmiş yöntemlerle (dövme, döküm, ...vb.) imal edilmiş malzemelerin işlenebilirliğinin ve işleme parametrelerinin farklılık göstermesidir. Tablo 5. ConceptLaser M2 ve Deckel-Maho 5-eksen freze ile oluşturulmuş bir melez üretim hücrelerinde yapılan karşılaştırma çalışmasını göstermektedir [46]. Çalışmada katmanlı imal edilmiş bir kalıp çeliği (Wnr. 1.2709) ile alışlagelmiş yöntemlerle imal edilmiş benzer özellikteki kalıp çeliklerinin (Orvar Supreme ve Marlok) işlenebilirlik özelliği farklı frezeleme yöntemleri açısından aynı parametreler kullanılarak değerlendirilmiştir. Tabloda katmanlı imal edilmiş malzemenin özellikle delik delme işlemlerinde muadil malzemelere kıyasla daha düşük işlenebilirliği olduğu dikkat çekmektedir.

Tablo 5. İşlenebilirlik karşılaştırması [46].

İşleme Yöntemi/ Unsuru	Orvar Supreme				Wnr. 1.2709				Marlok			
	Kötü	Orta	İyi	Çok İyi	Kötü	Orta	İyi	Çok İyi	Kötü	Orta	İyi	Çok İyi
Düzlemsel frezeleme				X		X						X
Pim delikleri			X			X					X	
Boşluklu civata geçme delikleri			X		X						X	
Bağlantı cepleri			X				X				X	
Havşa başları			X		X						X	
Konumlandırma cepleri			X				X				X	
Kontur frezeleme				X			X				X	

Buna ek olarak melez ürün imalatı yapıldığı takdirde alt tabaka ve üzerine yığılmış katmanların işlenebilirlik açısından değerlendirilmesi konusu da incelenmesi açısından faydalıdır. Özellikle kalıp imalatında tercih edilen melez ürünler, kalıpların içinde soğutma performansını artıran kanalların eklenmesi için kullanılmaktadır [48]. Yapılan çalışmalarda alt tabaka ve üstüne yığılan katmanların işlenebilirlik açısından farklı olduğu aktarılmaktadır. KMN çelik plakalar üzerine FeCr toz malzeme yığılarak oluşturulmuş bir parçada, her iki bölge için aynı işleme parametreleri kullanıldığında yığılmış bölgede ortaya çıkan kesme kuvvetleri ve titreşimlerin daha yüksek olduğu görülmüştür. Katmanlar kendi içinde değerlendirildiği takdirde katmanların orta bölgelerinde daha yüksek, katmanlar arası birleşim bölgelerinde ise daha düşük titreşim ortaya çıkmaktadır [47]. Tablo 6.'da KMN çelik plaka FeCr yığılmış katmanlar için yapılan 4 farklı deney sonucunda ulaşılan kesme kuvvetleri görülmektedir. Tablodan görüleceği üzere eksenel kesme derinliğinin artırılmasının kesme kuvvetinde yol açtığı artış yığılmış bölgelerde plakaya kıyasla daha fazladır.

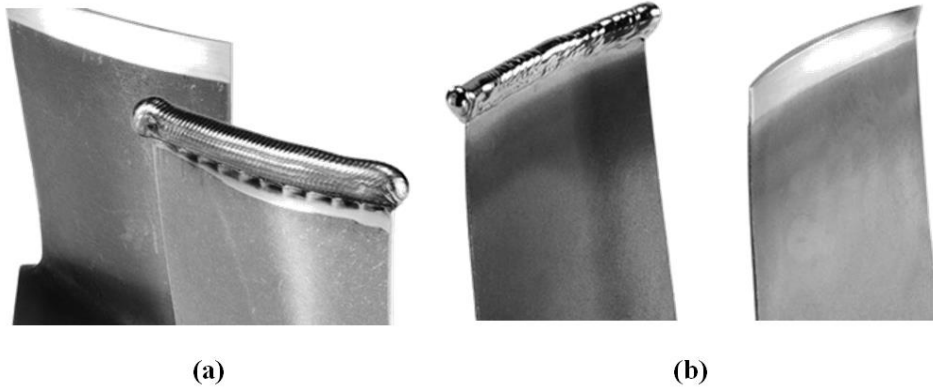
Tablo 6. Plaka ve yığılmış malzemeler için işleme parametreleri ve kesme kuvvetleri [47].

Deney No	KMN Plaka				FeCr Yığılmış Malzeme			
	Vc (m/dak).	ap (mm)	ae (mm)	Kesme Kuvveti (N)	Vc (m/dak).	ap (mm)	ae (mm)	Kesme Kuvveti (N)
1	150	0.3	3	275	150	0.3	3	300
2	150	0.6	2.5	350	150	0.6	2.5	450
3	150	1.2	2	775	150	1.2	2	925
4	150	2.0	1.5	775	150	2.0	1.5	925

Son olarak lazer enerjisi kullanan melez üretim sistemlerinde, işleme parametrelerini iyileştirmek için sistemin lazer destekli işlemeye yönelik geliştirilmesi ilerletilebilir çalışmalar açısından değerlendirilmesi gereken bir konudur. Lazer destekli işleme sayesinde gerek imalat süreleri, gerek takım ömrü iyileşmekte ve imalat maliyetleri toplamda 30%-40% arasında azalmaktadır [11].

2.4. Tamir Uygulamaları

Özellikle havacılık alanında kullanılan gaz türbinli motorlar içerisindeki parçalar sıcaklık, merkez kaç kuvvetleri ve yüksek basınç gibi olumsuz çalışma şartları altında faaliyet gösterirler ve güvenlik sebepleri ile kullanıldıkları uçuşu arıza yapmadan tamamlamak zorundadırlar. Bu şartları sağlayabilecek malzemeler yüksek oranda nikel içeren süper alaşımlardır ve maliyetleri yüksektir. Binlerce saatlik uçuş süreleri sonucunda aşınmaya uğrayan bu parçaların tamir edilerek tekrar kullanılması, yerine yenileri ile değiştirilmesine kıyasla maliyet etkin bir çözümdür. Söz konusu tamir uygulamalarında takip edilen genel geçer yöntemler aşınmış bölgeye malzeme yığılması ve sonrasında o bölgeden malzeme kaldırılması şeklindedir. Malzeme ekleme yöntemleri arasında kaynak ile ergitme ve lazer yığma yöntemleri kullanılmaktadır [49]. Malzeme kaldırma yöntemleri arasında ise frezeleme veya taşlama yöntemleri mevcuttur. Şekil 6'da kaynak ergitme yöntemi ile malzeme eklenmiş ve sonrasında hassas işlenmiş kompresör palelerine ait görüntüler verilmektedir [50]. Bu imalatlar her zaman aynı üretim istasyonu içerisinde yapılsa da izlenen yöntem melez üretim sistemlerinde izlenen yöntemlerle büyük benzerlikler göstermektedir.



Şekil 6. Malzeme yığılmış ve işlenmiş pale, konveks taraf (a), konkav taraf (b) [50].

Bununla birlikte melez üretim sistemlerinin tamir uygulamalarında kullanılması için eklemeler yapılması gerekmektedir. Bu eklemeler çoğunlukla ölçüm için donanım, yeniden yüzey oluşturma ve frezeleme takım yollarının yeni yüzeye göre güncellenmesini sağlama için yazılım eklemeleridir. Bunların temel sebebi tamire gelen kullanılmış parçaların ideal geometriden uzaklaşmış olması ve her bir durumun diğerinden farklı olmasıdır. Ölçüm sistemleri kontak ile çalışan sistemler olabileceği gibi optik sistemler de olabilir. Ölçüm verileri üzerinden yeniden yüzey oluşturma konusu ise çalışılmaya devam eden bir konudur [51].

2.5. Yüzey Kalitesinin İyileştirilmesi için Kullanılan Diğer Teknikler

Bu çalışmada aktarılan melez üretim sistemleri, özellikle katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte kullanıldığı sistemlerdir ve bu sistemlerde yüzey kalitesinin iyileştirilmesi talaşlı imalat vasıtası ile gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için farklı sistemler de kullanılmaktadır ve bu farklı sistemlerle ulaşılabilen yüzey kalitesinin karşılaştırılması, uygun yöntemin seçimi açısından faydalıdır. Yapılan karşılaştırmalarda seçilen bir katmanlı imalat yöntemi farklı ikincil işlemler ile birlikte uygulanmakta ve ulaşılan yüzey kaliteleri kıyaslanmaktadır. Ulaşılan yüzey kalitesi ile birlikte ikincil işlem süreleri de değerlendirilmektedir. Literatürde uygulama alanı bulmuş ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için kullanılan ikincil işlemler arasında mikro işleme (ing. Micro Machining Process), titreşimli yüzey işleme (ing. Vibratory Finishing), aşındırıcı akışkanla yüzey işleme (ing. Abrasive Flow Machining), aşındırıcı kumlama (ing. Abrasive Blasting) [9], bilyalı dövme (ing. Shot Peening), el ile parlatma (ing. Hand Polishing) [60], lazer ile parlatma (ing. Laser Polishing) [61], elektro parlatma (ing. Electropolishing) [62] ve kimyasal parlatma (ing. Chemical Finishing) [63] yöntemleri mevcuttur.

Mekanik olarak yüzey iyileştirme yapan yöntemler daha fazla malzeme serbestliği sunarken, kimyasal parlatma gibi yöntemler çoğunlukla plastik malzemelere uygulanmaktadır [63]. Yüzey işleme yönteminin seçilmesi aşamasında malzeme kısıtına ek olarak parça geometrisi de değerlendirilmektedir. Katmanlı imalatın doğası gereği sunduğu tasarım serbestliği sayesinde iç unsurlar oluşturulabilmekte ve fakat bunların yüzeylerinin iyileştirilmesi için çoğunlukla akışkan kullanan teknikler tercih edilmektedir. Aşındırıcı akışkanla yüzey işleme yönteminde parça iç yüzeylerine erişim ve ilgili yüzeylerin yüzey kalitesinin iyileştirilmesi mümkündür [64]. Bunun dışında yüzey kalitesi iyileştirme yönteminin seçilmesinde iyileştirme öncesi yüzey sertliği dikkate alınabilir. Parça malzemesi ve katmanlı imalat yöntemine göre değişkenlik gösteren yüzey sertliği değerine bağlı olarak, mekanik yüzey iyileştirme yöntemlerinin uygulanması etkin olmayabilir veya bu işlemler uzun imalat süreleri gerektirebilir. Bu gibi durumlarda, yüzey üzerinde malzeme ergitme ilkesine dayanan lazer ile parlatma yönteminin uygulanması değerlendirilmektedir. [61]. Yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ile birlikte yorulma ömrünün de artırılması gereksinimi olduğunda uygulanabilecek yöntem bilyalı dövme yöntemidir. Bilyalı dövme süreci, ilk bakışta aşındırıcı kumlama yöntemine benzerlik gösterse de, temelinde aşındırma yerine yüzeyde plastik deformasyon oluşturmaya dayanmaktadır. Yorulma dayanımı açısından avantajlı olması da yüzeyde oluşturduğu basma yönündeki gerilmenin, yüzeyin içerisinde bulunan çekme yönündeki artık gerilmeleri dengelemesi ile mümkündür. Bunun yanında kumlamaya kıyasla daha geniş olan bilyaların oluşturduğu çukurlar sebebi ile yüzey pürüzlülüğü daha belirgindir [65].

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada katmanlı imalat ve talaşlı imalatın birlikte uygulandığı melez üretim sistemleri üzerine yapılan yayınlar, akademik alanda yürütülen araştırmalar ve ticari olarak kullanıma sunulan ürünler değerlendirilmiştir. Yapılan derlemede öncelikle melez üretim sistemleri dâhilinde kullanılan, hedef ürün ve parça malzemesine göre farklı katmanlı imalat ve talaşlı imalat yöntemleri sınıflandırılmıştır. Bu bölümde aktarılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere yığma yöntemleri üzerine olan çalışmalar diğerlerine kıyasla daha fazladır ve toz yatağı gibi sistemler için araştırmalara ihtiyaç vardır. Daha sonra, farklı üretim çeşitlerinin kullanıldığı durumlar ile melez üretim sistemleri, imalat süreleri ve maliyetler açısından karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma ile birlikte ticari olarak temin edilebilen veya geliştirilme sürecinde olan makineler aktarılmış ve bu makinelerin kullandığı sistemler ve varsa yazılımlar belirtilmiştir. Özellikle bu konudaki yazılımların makinelere kıyasla daha az olmasının, melez sistemlerin tam verimle kullanılması açısından problem teşkil edip etmediği araştırılması gereken diğer bir konudur. Katmanlı olarak imal edilen parçaların işlenmesi hakkındaki çalışmalar belirli temel parametreler ile örneklendirilmiştir. Katmanlı imal edilmiş ürünlerin diğer yöntemlerle imal edilmiş ürünlerle aynı parametreler kullanılarak işlendiğinde farklı sonuçlar verdiği görülmüştür ve fakat çok farklı malzemeler için benzer çalışmalar mevcut değildir. Bu konu da araştırılabilecek konular arasındadır. Tamir uygulamaları için melez sistemlerin kullanım potansiyeline dikkat çekilmiş ve bahsi geçen melez sistemlerin tamir için kullanımı öncesinde gereken eklemeler özetlenmiştir. Son olarak yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için kullanılan farklı teknikler hakkında başlıca konular aktarılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] ASTM F2792 – 12a “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies”, DOI: 10.1520/F2792-12A.
- [2] VDI 3404, 2014 “Additive Manufacturing: Basics, Definitions, Processes”.
- [3] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. 2010. “Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, ISBN: 978-1-4419-1119-3, Springer Science & Business Media, New York.
- [4] Wohlers Report, 2013. “Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry”, ISBN 0-9754429-9-6.
- [5] Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., Evans, K. E., 2013. “Surface roughness analysis, modeling and prediction in selective laser melting”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, No. 4, pp. 589-597.
- [6] Vandenbroucke, B., Kruth, J. P. 2007. “Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts”, Rapid Prototyping Journal, 13(4), 196-203.
- [7] Kruth, J. P., Vandenbroucke, B., Vaerenbergh, V. J., Mercelis, P. 2005. “Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques”, Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI), Gent, Belgium.
- [8] Mahesh, M., Wong, Y. S., Fuh, J. Y. H., Loh, H. T. 2004. “Benchmarking for comparative evaluation of RP systems and processes”, Rapid Prototyping Journal, 10(2), 123-135.
- [9] Such, A. 2015. “Increase of productivity by adaptive selective laser melting”, International Conference on Turbomachinery Manufacturing, Aachen.
- [10] http://www.mmptechnology.com/mmp_gb.php, Son erişim tarihi 02.05.2015.
- [11] Dandekar, C.R., Shin, Y.C. and Barnes, J., 2010. “Machinability improvement of titanium alloy (ti-6al-4v) via LAM and hybrid machining”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 50(2), pp.174-182.
- [12] Araghi, B.T., Manco, G.L., Bambach, M., Hirt, G., 2009. “Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming”, Cirp Annals-Manufacturing Technology, 58(1), pp.225-228.
- [13] Karaguzel, U., Bakkal, M., Budak, E. 2012. “Process modeling of turn-milling using analytical approach”Procedia CIRP,4, 131-139.
- [14] Yasa, E., Kruth, J.P., Deckers, J., 2011. “Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting”, Cirp Annals-Manufacturing Technology, 60(2), pp.263-266.
- [15] Holtkamp, J., Roesner, A. and Gillner, A., 2010. “Advances in hybrid laser joining”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 47(9-12), pp.923-930.
- [16] Cooper, A.G., Kang, S., Kietzman, J.W., Prinz, F.B., Lombardi, J.L. and Weiss, L.E., 1999. “Automated fabrication of complex molded parts using mold shape deposition manufacturing”, Materials & Design, 20(2-3), pp.83-89.
- [17] Choi, D.S., Lee, S.H., Shin, B.S., Whang, K.H., Song, Y.A., Park, S.H. and Jee, H.S., 2001. “Development of a direct metal freeform fabrication technique using CO₂ laser welding and milling technology”, Journal of Materials Processing Technology, 113(1-3), pp.273-279.
- [18] Jeng, J.Y. and Lin, M.C., 2001. “Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling”, Journal of Materials Processing Technology, 110(1), pp.98-103.
- [19] Liou, F. W., Choi, J., Landers, R. G., Janardhan, V., Balakrishnan, S. N., Agarwal, S. 2001. “Research and development of a hybrid rapid manufacturing process”, In Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 138-145.
- [20] Pinilla, J.M. and Prinz, F.B., 2003. “Lead-time reduction through flexible routing: Application to shape deposition manufacturing”, International Journal of Production Research, 41(13), pp.2957-2973.
- [21] Karunakaran, K.P., Sreenathbabu, A. and Pushpa, V., 2004. “Hybrid layered manufacturing: Direct rapid metal tool-making process”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 218(12), pp.1657-1665.
- [22] Zhang, J., Liou, F., 2004. “Adaptive slicing for a multi-axis laser aided manufacturing process”, Journal of Mechanical Design, 126(2), pp.254-261.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [23] Ruan, J., Eiamsa-ard, K., Liou, F., 2005. "Automatic process planning and toolpath generation of a multi-axis hybrid manufacturing system", *Journal of manufacturing processes*, 7(1), pp.57-68.
- [24] Dollar, A.M. and Howe, R.D., 2006. "A robust compliant grasper via shape deposition manufacturing", *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics*, 11(2), pp.154-161.
- [25] Liou, F., Slattery, K., Kinsella, M., Newkirk, J., Chou, H.N., Landers, R., 2007. "Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures", *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), pp.236-244.
- [26] Karunakaran, K., Pushpa, V., Akula, S., Suryakumar, S., 2005. "Techno-economic analysis of hybrid layered manufacturing", *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, 4(1), pp.161-176.
- [27] Lanzetta, M., Cutkosky, M.R., 2008. "Shape deposition manufacturing of biologically inspired hierarchical microstructures", *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 57(1), pp.231-234.
- [28] Karunakaran, K.P., Suryakumar, S., Pushpa, V., Akula, S., 2009. "Retrofitment of a CNC machine for hybrid layered manufacturing", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(7-8), pp.690-703.
- [29] Xiong, X., Haiou, Z., Guilan, W., Guoxian, W., 2009. "Hybrid plasma deposition and milling for an aeroengine double helix integral impeller made of superalloy", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(2010), pp.291-295.
- [30] Nowotny, S., Muenster, R., Scharek, S., Beyer, E., 2010. "Integrated laser cell for combined laser cladding and milling", *Assembly Automation*, 30(1), pp.36-38.
- [31] Suryakumar, S., Karunakaran, K.P., Bernard, A., Chandrasekhar, U., Raghavender, N., Sharma, D., 2011. "Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing", *Computer-Aided Design*, 43(4), pp.331-344.
- [32] Kelkar, A., Koc, B., 2008. "Geometric planning and analysis for hybrid re-configurable molding and machining process", *Rapid Prototyping Journal*, 14(1), pp.23-34.
- [33] Hur, J.H., Lee, J., Zhu, h. and Kim, J., 2002. "Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition", *Computer-Aided Design*, 34(10), pp.741-754.
- [34] Kelkar, A., Nagi, R., Koc, B., 2005. "Geometric algorithms for rapidly reconfigurable mold manufacturing of free-form objects", *Computer-Aided Design*, 37(1), pp.1-16.
- [35] Bank, H.S., Lazoglu, I., 2012. "Development of a New Hybrid Laser Workstation for Additive Manufacturing and Laser Machining", 15th International Conference on Machine Design and Production, Denizli, Turkey.
- [36] Kerbrat, O., Mognol, P., Hascoet, J., 2010. "Manufacturing complexity evaluation at the design stage for both machining and layered manufacturing", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 59(2), pp.208-215.
- [37] <http://www.hybridmanutech.com/technology.html>, Son erişim tarihi 14.05.2015.
- [38] Lee, W. C., Wei, C. C., Chung, S. C., 2014. "Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2366-2374.
- [39] <http://www.hermle-generativ-fertigen.de/cms/en/technology/>, Son erişim tarihi 25.05.2015.
- [40] <http://us.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d>, Son erişim tarihi 25.05.2015.
- [41] <https://www.mazakusa.com/news-events/press-releases/mazak-introduces-new-hybrid-multi-tasking-technology/>, Son erişim tarihi 25.05.2015.
- [42] <http://www.lumex-matsuura.com/english/contents/lumex01.html>, Son erişim tarihi 25.05.2015.
- [43] <http://fabrisonic.com/ultrasonic-additive-manufacturing-overview/>, Son erişim tarihi 25.05.2015.
- [44] https://www.delcam.com/news/press_article.asp?releaseId=1739, Son erişim tarihi 01.06.2015.
- [45] Twardowski, P., Wojciechowski, S. 2012. "Machining Characteristics of Direct Laser Deposited Tungsten Carbide", INTECH Open Access Publisher.
- [46] Boivie, K., Sørby, K., Brøtan, V., Ystgaard, P., 2011. "Development of a Hybrid Manufacturing Cell; Integration of Additive Manufacturing with CNC Machining", In Twenty-Second Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference, The University of Texas, Austin, TX, USA (pp. 153-163).

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [47] Zhao, Y., Sun, J., Li, J. 2014. "Study on chip morphology and milling characteristics of laser cladding layer", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-14.
- [48] Xu, X., Sachs, E., Allen, S., Cima, M., 1998. "Designing conformal cooling channels for tooling", In *Solid Freeform Fabrication Proceedings* 131-146.
- [49] Eckart, D., 2011. "Adaptive Technologies in Repair Processes for Aero Engines", Teknik rapor, MTU Aero Engines, Aachen.
- [50] <http://www.ttl-solutions.com/en-GB/our-services/adaptive-machining/compressor-turbine-aerofoils/>, Son erişim tarihi 01.06.2015.
- [51] Yilmaz, O., Gindy, N., Gao, J. 2010. "A repair and overhaul methodology for aeroengine components", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(2), 190-201.
- [52] Vetterli, M., Schmid, M., Wegener, K. 2014. "Comprehensive Investigation of Surface Characterization Methods for Laser Sintered Parts", *Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference*, Berlin.
- [53] Subramanian, K. 1994. "Surface Engineering", *ASM Handbook*, Vol. 5, Ohio, ABD.
- [54] Larsen-Basse, J. 1992. "Friction, Lubrication, and Wear Technology", *ASM Handbook*, Vol. 18, Ohio, ABD.
- [55] Whitehouse, D. J. 2004. "Surfaces and their Measurement". Elsevier.
- [56] Ganesh, P., Kaul, R., Paul, C. P., Tiwari, P., Rai, S. K., Prasad, R. C., & Kukreja, L. M. 2010. "Fatigue and fracture toughness characteristics of laser rapid manufactured Inconel 625 structures". *Materials Science and Engineering: A*, 527(29), 7490-7497.
- [57] Wang, F. 2012. "Mechanical property study on rapid additive layer manufacture Hastelloy® X alloy by selective laser melting technology". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5-8), 545-551.
- [58] Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., & Maier, H. J. 2013. "On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance". *International Journal of Fatigue*, 48, 300-307.
- [59] Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., & Buchbinder, D. 2012. "Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behaviour". *Materials & Design*, 34, 159-169.
- [60] Majewski, C., & Hopkinson, N. 2003. "Effect of tool finishing on ejection forces for injection moulded parts made using direct metal laser sintered tools". *International journal of production research*, 41(3), 581-592.
- [61] Rosa, B., Mognol, P., & Hascoët, J. Y. 2015. "Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces". *Journal of Laser Applications*, 27(S2), S29102.
- [62] Yang, L., Gu, H., & Lassell, A. 2014 "Surface treatment of Ti6Al4V parts made by powder bed fusion additive manufacturing processes using electropolishing." In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Texas, ABD.
- [63] Galantucci, L. M., Lavecchia, F., & Percoco, G. 2009. "Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(1), 189-192.
- [64] Williams, R.E., & Melton, V.L. 1998. "Abrasive flow finishing of stereolithography prototypes". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 4 Iss 2 pp. 56 – 67.
- [65] Duleba, B. 2011. "Materials & Finishing Methods of DMLS Manufactured Parts". *Transfer Inovácií*, 21.

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DELİNMESİNDE TAKIM TEZGAHI FAKTÖRÜNÜN YÜZEY KALİTESİNE ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Aysegül Cakır^a, Nergizhan Kavak^b ve Ulvi Şeker^c

a, TUSAŞ/TAI-Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., Ankara/TÜRKİYE, aycagir@tai.com.tr

b, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak/TÜRKİYE, nergizhan.kavak@beun.edu.tr

c, Gazi Üniversitesi, Ankara/TÜRKİYE, useker@gazi.edu.tr

Özet

Talaşlı imalat işlemlerinin performansı, kesici takım ile iş parçası, kesme parametreleri ve soğutma şartları gibi birçok faktörle değişebilmektedir. Bunların yanı sıra tercih edilen takım tezgahlarının sahip olduğu özellikler de işlemin performansını büyük oranda etkilemektedir. Bu çalışmadaki deneyler, AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımları üç farklı kesme hızı ve ilerleme değerleri kullanılarak üç ayrı tezgahta delinmesi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sayede; delik delme işleminde işlenen malzeme, kesme parametresi ve kullanılan takım tezgahlarının yüzey pürüzlüğüne (R_a) etkileri incelenmiştir. Deneyler sonunda ilerlemelerdeki artışın yüzey pürüzlüğünde artışa neden olduğu; kesme hızlarındaki artışın ise yüzey pürüzlüğü üzerinde daha kararsız bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. En iyi iş parçası yüzey kalitesi AA7075 alaşımının PMM (Portal Milling Machine) tezgahında işlendiği deneylerde görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Delik kalitesi, alüminyum, kesme parametreleri, takım tezgahı

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF MACHINE TOOL FACTOR ON SURFACE QUALITY IN DRILLING ALUMINUM ALLOYS

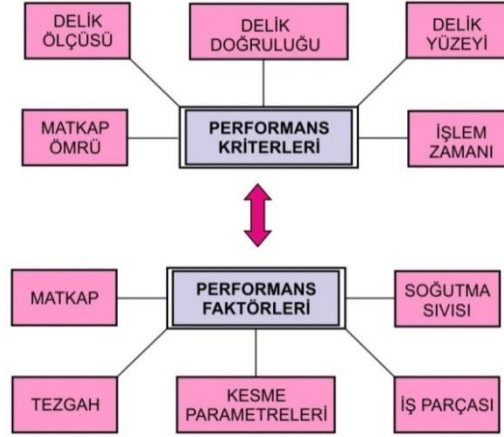
Abstract

The performance of the machining process can vary depending on many factors such as cutting tool and the work piece, cutting parameters and cooling conditions. As well as these, the features of the preferred machine tools also have major effects on the process performance. The experiments in this study have been performed by drilling the AA7075 and AA2024 aluminum alloys at three different machine tools by using three different cutting speeds and feed rate. By this way, during the drilling process, the processed material, cutting parameter and the existing machine tools effects on the surface roughness (R_a) have been investigated. From the results of the experiments it has been observed that the increase at feed rates cause increase in surface roughness, and the increase in cutting speeds has mostly uncertain effects on the surface roughness. It has been observed that the best surface quality of the work piece obtained in experiments with the AA7075 alloy processed on the PMM (Portal Milling Machine) machine tool.

Keywords: Hole quality, aluminium, cutting parameters, machine tool

1. GİRİŞ

Talaşlı imalatta işleme performansını etkileyen faktörler kesme parametreleri, takım malzemesi ile geometrisi, işlenen malzemenin metalurjik yapısı, işlemin yapıldığı tezgah özellikleri, soğutma şartları, vb. olarak sayılabilir. Bu faktörler diğer işleme türlerinde olduğu gibi delik delme performansında da etkilidirler [1, 2]. Delik delme işlemindeki performans değerlendirmesi için kriterler; kesici takım ömrü, delik kalitesi (yüzey kalitesi, ölçü tamlığı ve geometrik tamlık) ve talaş kaldırma verimliliği olarak sayılabilir. Bu kriterleri etkileyen faktörler Şekil 1.1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Delik delme performans kriterlerini etkileyen faktörler [3]

Delik delme işlemiyle diğer talaşlı imalat işlemleri arasında bir kıyas yapıldığında, delik delme işleminin yaklaşık % 33'lük uygulanma oranı ile en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biri olduğu söylenebilir [4]. Delme işleminde talaş oluşumu kapalı alanda oluşur ve çıplak gözle izlenemez. Çıkan talaşın tahliyesi ve kesme sıvısının işlem bölgesine verilmesinin çok daha zor olduğu, talaş ile helis kanallarının ve matkap ile işlenen yüzeyler arasında sürtünmenin çok daha büyük olduğu, talaş açısının kesici ağız boyunca değiştiği ve bundan dolayı farklı kesme şartlarının olduğu göz önünde tutulursa, matkapla talaş kaldırmanın tek ağızlı takıma göre çok daha karmaşık ve ağır koşullarda meydana geldiği açıktır [5]. Talaşlı imalat işlemleri arasında delik delme sürecindeki zorluklara karşın uygulama sıklığının fazla olması, delik delme sürecinde karşılaşılan problemlerin çözümüyle ilgili yapılacak çalışmaların önemini de arttırmaktadır. Bundan dolayı delik delme işlemiyle ilgili günümüze kadar bir çok araştırma yapılmıştır. Bunlardan biri olan Sanjay ve arkadaşları yaptıkları çalışmada delik yüzey pürüzlülüğünün matematiksel analizinde yapay sinir ağlarını kullanmışlardır. Kesici çapı, kesme hızı, ilerleme, işleme zamanı yapay sinir ağlarına girdi olarak verilerek yüzey pürüzlülüğünü değerlendirmişlerdir. Deneysel çalışmada çelik malzeme kullanılıp çap sabit tutularak 3 kesme hızı ve 3 ilerleme ile 30 mm delik derinliği ile çalışılmışlardır. Yapay sinir ağı analizi ile tüm kesme hızı ilerleme kombinasyonları için gerçekçi ve doğrulanabilir yüzey pürüzlülüğü sonuçları elde etmişlerdir [6]. Pirtini ve Lazoğlu, delme işleminde delik kalitesini ve kuvveti araştırmışlardır. Çalışmada teorik modellemeye ilave olarak deneysel çalışma da yapmışlardır. Deneylerde alüminyum AA7039 malzeme, sabit kesme hızında 5 farklı ilerleme ile işlenmiştir. Yaptıkları teorik modelde tanımlanan her farklı şart için kesme kuvvetlerini tahmin etmişlerdir. Deneylerde CMM ile ölçtükleri delik kalitesinin teorik modelle hesapladıkları değerlerle uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu şekilde deney sayısı en az seviyede tutularak, matematiksel modeller ile ilgili şartlar için deney sonuçları ile uyumlu çıktılar elde etmişlerdir [7]. Thangaraj ve Wright, AISI 1045 çelik malzemeye 8 mm çapında HSS kesici takım ile delik delme işleminde ilerleme kuvvetini ölçerek bilgisayar yardımı ile takımdaki aşınmanın tahmini üzerinde inceleme yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada değişen ilerleme kuvvetlerini titreşim durumuna göre hesaplamışlardır. Takım kırılmalarından birkaç saniye önce keskin artışlar görmüşlerdir [8]. Yuzo ve arkadaşları, delme işleminde kullandıkları alüminyum (AA1100-0) alaşımında artan talaş kalınlığı ve talaş şekli yönünden 4 farklı çap ve 6 farklı delik boyunda kesme kuvvetini incelemişlerdir. Deneyler sonunda kesme hızı ve ilerlemelerdeki artışın kesme kuvvetleri artırdığını gözlemişlerdir. En düşük kesme kuvvetleri ile en yüksek kesme kuvvetleri arasındaki farkın yüksek ilerlemelerde daha fazla olduğunu görmüşlerdir [9].

Delik delme işleminde uygulanan kesme parametrelerinin yanında kullanılan takım tezgahlarının özellikleri de işleme performansını etkiler. Kullanılan tezgahlardaki fener mili, takım tutucu ve matkap sisteminin tamamında maksimum rijitlik esastır. Ayrıca tezgahın bulunduğu zemine doğru montajı ve sabitlenmesi de rijitliğini etkileyen şartlardandır. Rijitliğin olmaması tüm takım sisteminin rijitliğinin üzerinde ağır bir yük oluşturmaktadır. Bu da kesici takımın ömrünü ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli bir faktördür. Tezgah gücünün işlenen malzeme ve kullanılan kesme parametrelerine uygun olması gereklidir. [2, 5]. Her talaş kaldırma operasyonunda olduğu gibi delik delme işleminde de amaç en kısa zamanda, toleranslar dahilinde, en çok sayıda deliği elde edebilmektir. Bir tezgahın verimli kullanımında dikkat edilmesi gereken husus; ürün sayısı, işlem zamanı ve ürün kalitesini ihtiyaç doğrultusunda belirleyerek optimum işleme performansına ulaşabilmektir. Dolayısıyla tezgahın gücü ve hızıyla birlikte doğruluğu ve tekrarlanabilirliği de çok önemlidir. [10-12]. Doğruluk, tezgahın hareket sınırları içerisinde komut olarak verilen pozisyona gitme kabiliyetidir. Pozisyon ve/veya hız değerleri genel olarak tezgah eksen boyunca ölçülür. Pozisyon doğruluğu, belirtilen pozisyona tezgahın hareket ettirilmesi sırasında komut olarak verilen pozisyon ile tezgahın gerçekte gittiği pozisyon arasındaki farktır. Tekrarlanabilirliğin iyi olması demek, aynı pozisyona bir kaç kez belirtilen tolerans aralığında ulaşabilmesi demektir. [10, 13]. Doğruluğunun olumsuz etkileyen faktörlerden biri ise ısıdır. Motorun yanında mekanik bileşenlerin tamamı (rulmanlar, bilyalı vidalar, kızaklar vb.) birbirleri ile sürtünmektedir ve ısı üretmektedir. Ayrıca kesme işlemi sırasında da ısı üretilmektedir. Ortaya çıkan bu ısı, tezgah mekanik bileşenlerinin olumsuz etkileyerek doğruluğun düşmesine sebep olabilir [10, 11]. Tezgah doğruluğunu olumsuz etkileyen şartlar dikkate alındığında, tezgah faktörünün işleme performansına etkilerinin de incelenmesi gerektiği görülmektedir. Bu gereklilikten yola çıkarak ve literatürdeki konuyla ilgili çalışmaların yetersizliği de dikkate alınarak bu çalışma yapılmıştır. Ayrıca iş parçası malzemesi olarak AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının seçilmesi ile, son yıllarda endüstriyel alanda kullanımı hızla artan bu alaşımların işleme sürecindeki zorluklara çözüm aranması amaçlanmaktadır.

2. MALZEME VE METOT

Yapılan deneysel çalışmada AA7075 ve AA2024 olmak üzere iki farklı alüminyum alaşımının delinmesinde farklı kesme parametreleri ve takım tezgahlarında deneyler yapılmıştır. Böylece delik delme işleminde işlenen malzeme, kesme parametresi ve takım tezgahı gibi faktörlerin delik kalitesine etkisi incelenmiştir. Delik kalitesini değerlendirmede yüzey pürüzlüğü, çaptan sapma, dairesellikten sapma (ovalite) ve silindiriklikten sapma (eksenel kaçıklık) inceleme kriterleri (çıktılar) olarak seçilmiştir. Çizelge 2.1’de deneylerde kullanılan tüm girdi ve çıktı parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Deneylerde kullanılan girdi ve çıktı parametreleri

Girdi Parametreleri					
Kesici tipi	İşleme tipi	İşlenen malzeme	Kesme hızı (V_c)	İlerleme (f)	Soğutma tipi
8mm çapta kaplamasız karbür matkap	Delik delme (25mm, boydan boya, kuru kesme)	AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımları	V_{c1} (100 m/dk)	f 1 (0,10 mm/dev)	ECOSPEED 2600 (HSM) yüksek hızlı CNC işleme merkezi (ES)
			V_{c2} (125 m/dk)	f 2 (0,15 mm/dev)	DS Droop+Rein yüksek hızlı CNC işleme merkezi (PMM)
			V_{c3} (150 m/dk)	f 3 (0,20 mm/dev)	Mori Seiki VS80 üç eksenli CNC dik işlem merkezi (MS)
1	1	2	3	3	3

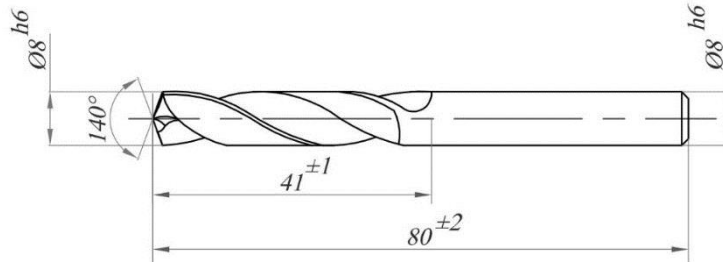
6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Taguchi deney tasarımına göre yapılan deneyler için en uygun tasarım olarak üç seviyeli (3x3x3) L9 ortogonal dizin seçilmiştir. Bu şekilde 27 adet deney sayısı 9'a düşürülmüştür. Aynı tasarım her iki malzeme (AA7075 ve AA2024) için de tekrarlandığı için toplam deney sayısı 54 adetten 18 adede düşürülmüştür. Çizelge 2.2'da Minitab istatistik yazılımı yardımı ile belirlenen L9 deney tasarımı görülmektedir.

Çizelge 2.2. Taguchi L9 ortogonal deney tasarımı

Deney No	Değişkenler	(A) Tezgah Türü	(B) Kesme hızı-Vc (m/dak)	(C) İlerleme-f (mm/dev)
1	A1B1C1	ES	100	0,10
2	A1B2C2	ES	125	0,15
3	A1B3C3	ES	150	0,20
4	A2B1C2	PMM	100	0,15
5	A2B2C3	PMM	125	0,20
6	A2B3C1	PMM	150	0,10
7	A3B1C3	MS	100	0,20
8	A3B2C1	MS	125	0,10
9	A3B3C2	MS	150	0,15

Her farklı şart için ayrı takım kullanılan deneylerde iki ağızlı, helisel, 8mm çaplı, Gühring marka kaplamasız karbür matkaplar kullanılmıştır. Kullanılan kesici takım boyutları Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Deneylerde kullanılan karbür matkaplar

İş parçası malzemesi olarak seçilen AA 7075 ve AA 2024 alüminyum alaşımlarının kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.3. AA2024 ve AA7075 alaşımlarının kimyasal özellikleri

	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
AA 2024	0,50	4,50	0,60	1,50	0,10	0,20
AA 7075	0,40	1,60	0,30	2,50	0,30	5,6

Çizelge 2.4. AA2024 ve AA7075 alaşımlarının mekanik özellikleri [99-100]

	Isıl İşlem	Elastik Modül (GPa)	Akma Gerilimi.. (MPa)	Çekme Gerilimi.. (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Brinell)
AA 2024	T4	73,1	315 -330	440 -465	20,0	120
AA 7075	T6	72	460 -505	530 -570	10,0	150

Deneyler TUSAŞ-TAI Türk Havacılık ve Uzay Sanayi bünyesinde mevcut olan ECOSPEED 2600 (HSM) yüksek hızlı CNC işleme merkezi (ES), DS Droop+Rein yüksek hızlı CNC işleme merkezi (Portal Milling Machine-PMM) ve Mori Seiki VS80 üç eksenli CNC dik işlem merkezi (MS) olmak üzere üç ayrı tezgahta yapılmıştır. Tezgahlara ait teknik özellikler sırasıyla Çizelge 2.5, Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.5. ECOSPEED 2600 CNC tezgahının teknik özellikleri

Tezgah Adı	ECOSPEED 2600 yüksek hızlı CNC işleme merkezi
Kontrol Ünitesi	SIEMENS 840D

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Maksimum Devir Sayısı	30 000	dev/dk
İşleme Tablası	2500x7000	mm
Eksenlerde İlerleme	X:65 000, Y ve Z:50.000	mm/dk
Eksenel Hareket	X: 6800, Y: 2600, Z: 670 A:±40°, B: ±40°	mm

Çizelge 2.6. DS Droop+Rein CNC tezgahının teknik özellikleri

Tezgah Adı	DS Droop+Rein yüksek hızlı CNC işleme merkezi (Portal Milling Machine-PMM)	
Kontrol Ünitesi	CNC SIEMENS Sinumerik 840D (5 eksenli için)	
Maksimum Devir Sayısı	24.000	dev/dk
Eksenlerde İlerleme	X ,Y:40.000; Z:30.000; B,C: 4.320°/dk	mm/dk
Eksenel Hareket	X: 6800, Y: 4500, Z: 1700 B: ±120°, C: n x 360°	mm

Çizelge 2.7. Mori Seiki VS 80 CNC tezgahının teknik özellikleri

Tezgah Adı	Mori Seiki VS80 üç eksenli CNC dik işlem merkezi	
Kontrol Ünitesi	SEICOS FANUC 18	
Maksimum Devir Sayısı	20 000	dev/dk
İşleme Tablası	2250x850	mm
İlerleme	20 000	mm/dk
Eksenel Hareket	X: 2050, Y: 860, Z: 600	mm

Numunelere açılan delik yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü (R_a) ölçümleri için Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bünyesinde mevcut olan “Mahr” marka Perthometer M1 tipi, masa üstü ve yazılı çıktı alınabilen yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerin güvenilirliği için ölçülen her delik için ayrı noktalardan dört ölçüm yapılmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak her delik için ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri belirlenmiştir. Kullanılan yüzey pürüzlülük ölçme cihazının teknik özellikleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Yüzey pürüzlülük ölçme cihazının teknik özellikleri

MODEL	Mahr Perthometer M1
Ölçme prensibi	Sylus metodu
Tarama hızı (mm/sn)	0,5
Ölçüm aralıkları	100-150
Profil çözünürlüğü	12
Filtre	Gaussian
Cut off'lar (mm)	0,08 – 0,25 -0,8 – 2,5
Tarama uzunlukları (mm)	1,75 – 5,6 – 17,5
Örnekleme uzunluğu sayısı	1-5 arası seçilebilir
Dil	Seçilebilir, 10 Avrupa 3 Asya dili
Güç kaynağı	Entegre NiCd şarj edilebilir pil.
Boyutlar (mm)	190x170x75
Yaklaşık ağırlık (gr)	900

İşlem parametreleri ile işlem parametrelerine ait ikili etkileşimlerinin kalite karakteristiği üzerindeki etkisini ölçmek için elde edilen verilere ANOVA testi uygulanmıştır. Bu çalışmada kalite karakteristiği olarak yüzey pürüzlülüğü; işlem parametreleri olarak ise tezgah türü, kesme hızı ve ilerleme oranı seçilmiştir. ANOVA’da söz konusu işlem parametresinin anlamlılığı ona ait varyans değerinin hatanın varyansına oranı ile belirlenmektedir. P anlamlılık değeri, yapılan test sonucunda hata oranı olan α değerinden küçük ise veri seti anlamlı olarak kabul edilir. Sayısal analizlerde %95 güven aralığı yeterli olduğu için bu çalışmada da hata oranı (α) 0,05 olarak alınmıştır. Ayrıca optimum şartları tesbit edebilmek için “en küçük en iyidir” yaklaşımı kullanılarak verilere Sinyal/Gürültü (S/N) testi de uygulanmıştır.

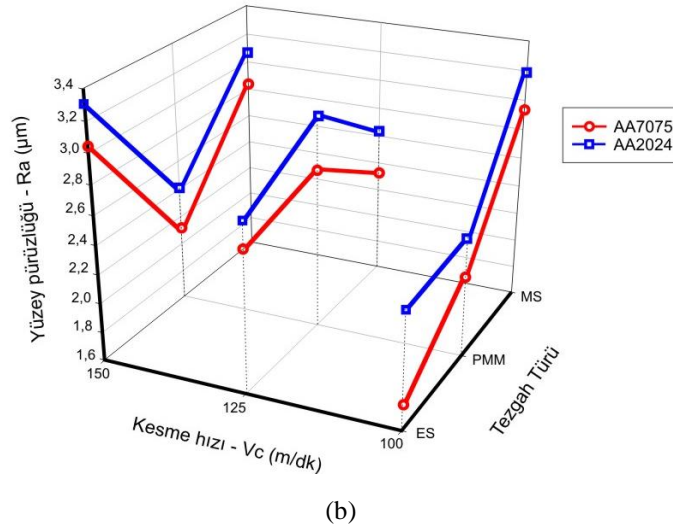
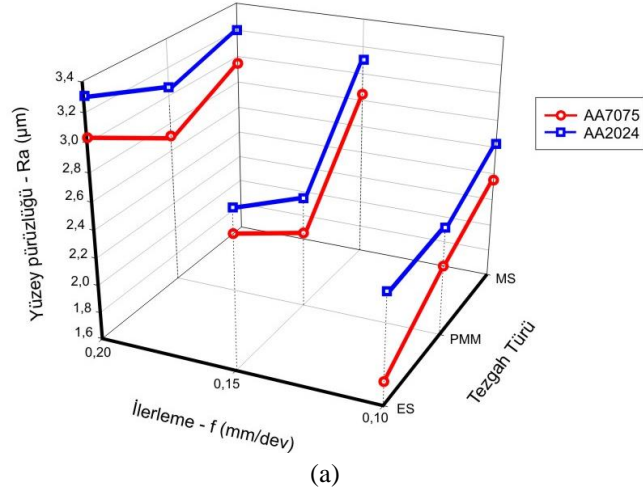
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneyler için Taguchi L9 metodu kullanılarak takım tezgahı (A:T_g), kesme hızı (B:V_c) ve ilerleme (C:f) olmak üzere üç seviyeli üç kontrol faktörü ile oluşturulan deney tasarımı iki farklı alüminyum alaşımı için (AA7075 ve AA2024) ayrı ayrı tatbik edilmiştir. Çizelge 3.1’de deneyler sonunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlüğü değerleri (R_a) ve “en küçük en iyidir” yaklaşımına göre hesaplanan Sinyal/Gürültü (S/N) oranları gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımların delinmesinde elde edilen R_a ve S/N oranları

AA7075 Deney No	Değişken	R _a - Yüzey Pürüzlüğü (μm)	S/N Oranı (dB)	AA2024 Deney No	Değişken	R _a - Yüzey Pürüzlüğü (μm)	S/N Oranı (dB)
1	A1B1C1	1,759	-4,907	10	A1B1C1	2,394	-7,581
2	A1B2C2	2,572	-8,204	11	A1B2C2	2,743	-8,765
3	A1B3C3	3,034	-9,640	12	A1B3C3	3,304	-10,382
4	A2B1C2	2,161	-6,691	13	A2B1C2	2,419	-7,674
5	A2B2C3	2,711	-8,661	14	A2B2C3	3,059	-9,710
6	A2B3C1	2,113	-6,498	15	A2B3C1	2,389	-7,565
7	A3B1C3	2,932	-9,342	16	A3B1C3	3,194	-10,087
8	A3B2C1	2,342	-7,391	17	A3B2C1	2,628	-8,393
9	A3B3C2	2,856	-9,115	18	A3B3C2	3,104	-9,837

AA7075 ve AA2024 alaşımlarına delik delme işleminde tezgah türüyle birlikte ilerlemenin (a) ve kesme hızının (b) R_a üzerindeki etkisi Şekil 3.1’deki üç boyutlu grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 3.1. R_a değerinin ilerleme (a) ve kesme hızı (b) olmak üzere kesme parametreleri ile takım tezgahlarına göre değişimi

Grafiklere bakıldığında en düşük yüzey pürüzlüğü PMM tezgahında ölçüldüğü görülmektedir. PMM tezgahını sırasıyla EcoSpeed (ES) ve Mori Seiki (MS) tezgahları takip etmektedir. AA7075 alaşımı için MS tezgahında ölçülen R_a değerlerine göre, ES ölçülen R_a değerlerinde % 10; PMM tezgahlarında ölçülen R_a değerlerinde ise % 13 civarında düşüş görülmüştür. AA2024 alaşımı için ise MS tezgahında ölçülen R_a değerlerine göre ES ve PMM tezgahlarında ölçülen R_a değerlerinde sırasıyla % 6 ve % 12 civarında düşüş görülmüştür.

Malzeme faktörünün R_a üzerindeki etkisine bakıldığında, kuru işleme şartlarında yapılan deneylerde AA2024 alaşımında ölçülen R_a değerleri, aynı şartlarda AA7075 alaşımında ölçülen değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Kesme/Soğutma sıvısı kullanılmadığı için takım-talaş ara yüzeyinde sürtünmeyi ve yapışmayı engelleyecek bir film tabakası olmamasına bağlı olarak, takım kesici kenarında oluşan sıvanmanın engellenemediği ve bozulan takım geometrisinin de yüzey kalitesini olumsuz etkilediği söylenebilir [14, 15]. Bu şartlar dikkate alındığında kuru kesme şartlarında yapılan delme işleminde AA7075 alaşımına göre daha sünek olan AA2024 alaşımında yüzey kalitesinin daha kötü çıkması beklenen bir durumdur.

Şekil 3.1 (a) grafiğine bakıldığında ilerlemedeki artışın ortalama yüzey pürüzlüğünde de artışa sebep olduğu görülmektedir. İlerleme oranının 0,1 mm/dev'den 0,20 mm/dev'e çıkarak % 100 artması, ortalama yüzey pürüzlüğünde % 25-50 oranında artışa sebep olduğu görülmüştür. Kesme hızındaki artışın genelde yüzey pürüzlüğünü düşürmesi beklenirken Şekil 3.1 (b) grafiğinde kesme hızının R_a üzerinde daha kararsız bir etkisinin olduğu görülmektedir. Artan kesme hızının kesme bölgesindeki sıcaklığı artırarak kesmeyi kolaylaştırmaktadır. Fakat yine kesme hızının artmasıyla birlikte birim zamanda oluşan talaş hacminin de artmasıyla, kapalı alanda gerçekleşen delik delme işlemindeki talaş tahliyesinin de zorlaştığı bilinmektedir [16, 17]. Bu iki durum Şekil 3.1 b'de gözlenen kararsız

Tüm kuru kesme şartlarına bakıldığında elde edilen en düşük yüzey pürüzlüğü değeri 1,759 μm ' dir. Bu değer, en düşük ilerleme olan 0,10 mm/dev ve en düşük kesme hızı olan 100 m/dk'da AA7075 alaşımında ölçülmüştür. Elde edilen en yüksek yüzey pürüzlüğü değeri ise 3,304 μm ' dir. Bu değer, en yüksek ilerleme olan 0,20 mm/dev ve en yüksek kesme hızı olan 150 m/dk' da AA2024 alaşımında ölçülmüştür. Bu sonuçlara bakılarak malzeme türü, ilerleme ve kesme hızının yüzey pürüzlüğünü etkileyen unsurlar olduğu görülmektedir [17].

3.1. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) için varyans analizi

Çizelge 3.2'de ilerleme, kesme hızı, tezgah türü ve malzeme türü olmak üzere işlem parametrelerinin, kalite karakteristiği olarak belirlenen R_a 'ya etkisini açıklayan ANOVA sonuçları toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 3.2. AA7075 ve AA2024 için yüzey pürüzlüğü ile ilgili ANOVA sonuçları

Kaynak	SD	KT'	KT	KO	F	P	YD(%)
Malzeme türü (m)	1	0,42197	0,42197	0,42197	60,94	0,000	25,2
Tezgah türü (T_g)	2	0,40721	0,40721	0,20361	29,40	0,000	12,1
Kesme hızı (V_c)	2	0,31959	0,31959	0,15980	23,08	0,000	9,6
İlerleme (f)	2	1,77042	1,77042	0,88521	127,83	0,000	52,6
Hata	10	0,06925	0,06925	0,00692	-	-	0,5
Toplam	17	2,98845	-	-	-	-	100,0

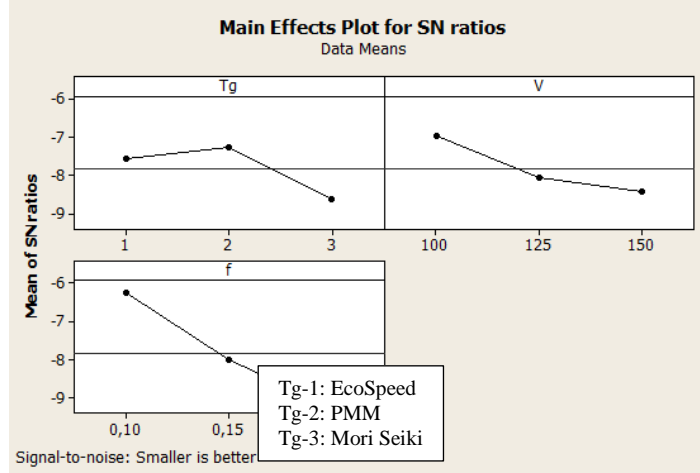
SD : Serbeslik derecesi, KT' : Saf kareler toplamı, KT : Kareler toplamı,
KO : Kareler ortalaması, YD : Yüzde dağılım F: Test istatistiği,
P : Anlamlılık değeri

Yapılan varyans analizi sonunda elde edilen malzeme türü (m), takım tezgahı (T_g), kesme hızı (V_c) ve ilerleme (f) olmak üzere işlem parametrelerine ait P değerleri α olarak belirlenen 0,05'den küçük çıkmıştır. $P < \alpha$ olduğu için bu işlem parametreleri kalite karakteristiği olan yüzey pürüzlüğü üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir. D sütunundan işlem parametrelerinin etki derecelerine bakılacak olursa; yüzey pürüzlüğünü; % 52,6 ile en çok ilerlemenin etkilediği görülmektedir. İlerleme faktörünü sırasıyla % 25,2 ile malzeme türü, % 12,1 ile tezgah türü ve % 9,6 ile kesme hızı faktörünün takip ettiği görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında işleme performansını etkileyen unsurların incelendiği deneysel çalışmalarda çoğunlukla göz ardı edilen tezgah faktörünün, sonuçlar

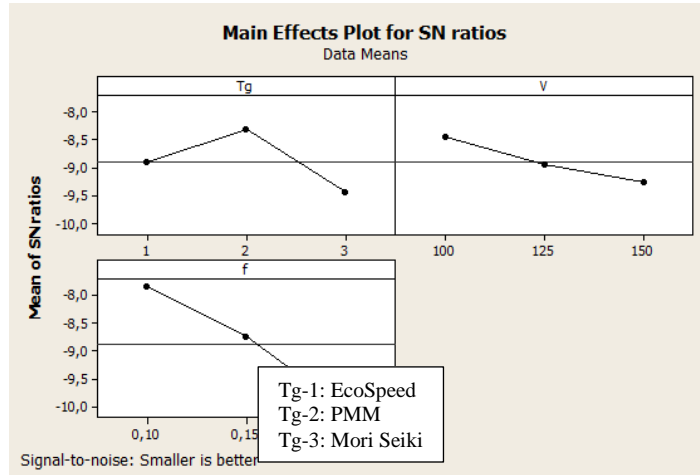
üzerindeki etkisinin kesme hızından daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuç dikkate alındığında yapılan deneysel çalışmalarda tezgah faktörünün etkisinin de incelenmesi gerektiği söylenebilir.

3.2. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) için Sinyal/Gürültü (S/N) analizi

“En küçük en iyidir” yaklaşımına göre yapılan Taguchi Sinyal-Gürültü (S/N) analizinde AA7075 ve AA2024 alüminyum alaşımları için optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri; tezgah türünün ikinci seviyesinde (A2), kesme hızının birinci seviyesinde (B1) ve ilerlemenin birinci seviyesinde (C1) elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.2. Elde edilen R_a sonuçlarına göre kontrol faktörlerinin S/N oranları

Buna göre her iki malzeme için de yüzey pürüzlülüğü ilerlemenin artışıyla belirgin bir şekilde artarken, kesme hızı artışıyla da artmış, PMM tezgahı kullanımında ise azalmıştır. Şekil 3.2’deki grafiklerde en yüksek S/N oranlarının işaret ettiği optimum seviyeler açık bir şekilde görülmektedir. Elde edilen optimum seviyeler ise Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yüzey pürüzlülüğü (R_a) için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri

Kontrol faktörleri	Simge	Birim	Optimum seviye	Optimum değer
Tezgah türü (A)	T_g		2	PMM
Kesme hızı (B)	V_c	m/dk	1	100
İlerleme (C)	f	mm/dev	1	0,10

4. SONUÇ

AA7075 ve AA2024 olmak üzere iki farklı alüminyum alaşımına farklı takım tezgahları ve farklı kesme parametreleri kullanılarak, kuru kesme şartlarında delik delinmesi suretiyle yapılan deneyler sonunda ölçülen yüzey pürüzlüğü (R_a) verilerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Her üç takım tezgahı ve iki malzeme için yüzey pürüzlüğünün (R_a) ilerlemenin artmasıyla arttığı gözlenmiştir. Artış miktarının, ilerlemelerde %100 artışa karşılık yüzey pürüzlüğünde %25-50 civarında olduğu görülmüştür.
- Her kesme şartında kesme hızı parametresinin ilerleme parametresine göre yüzey pürüzlüğü üzerinde daha kararsız bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- En iyi yüzey kalitesi PMM tezgahında yapılan deneylerde ölçüldüğü ve PMM tezgahını sırasıyla EcoSpeed (ES) ve Mori Seiki (MS) tezgahlarının takip ettiği görülmüştür. MS tezgahında ölçülen R_a değerlerine göre ES tezgahında ölçülen R_a değerlerinde %6-10; PMM tezgahında ölçülen R_a değerlerinde %12-13 düşüş gözlenmiştir.
- Malzeme faktörünün R_a üzerindeki etkisine bakıldığında, kuru işleme şartlarında yapılan deneylerde AA2024 alaşımında ölçülen R_a değerleri, aynı şartlarda AA7075 alaşımında ölçülen değerlerden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Yapılan ANOVA analiziyle işlem parametrelerinin R_a üzerindeki etkisine bakıldığında ilerlemenin %52,6 oranla yüzey kalitesini en çok etkileyen işlem parametresi olduğu görülmüştür. İlerleme parametresini sırasıyla %25,2 ile malzeme türü, %12,1 ile tezgah türü ve %9,6 ile kesme hızı faktörlerinin takip ettiği görülmüştür. İşleme performansını etkileyen unsurların incelendiği deneysel çalışmalarda çoğunlukla göz ardı edilen tezgah faktörünün sonuçlar üzerindeki etkisinin bu çalışmada kesme hızından daha fazla olduğu görülmektedir.
- Optimum seviyelerin belirlenmesi için en küçük en iyidir yaklaşımıyla yapılan Taguchi Sinyal /Gürültü (S/N) testlerinden elde edilen sonuçlara göre optimum şartlar; PMM tezgahında yapılan deneylerde, ilerlemenin 0,1mm/dev, kesme hızının 100m/dk olduğu kesme şartlarıdır.

KAYNAKÇA

- [1] Taşgetiren, S., Aslantaş, K., (2000). Tornada kesme için yeni bir sert metal uç tutucusu tasarımı, 3. GAP Mühendislik Kongresi, Şanlıurfa,150-157.
- [2] Mendi, F., (1996). Takım tezgahları teori ve hesapları, ISBN: 975-96008, Ankara.
- [3] Çakır, A., (2009). “AA7075 ve AA6013 Alüminyum Alaşımlarının Delme Operasyonları Esnasındaki Kesme Parametrelerinin İncelenmesi”, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [4] Tonshoff, H.L., Spintig, W., Konig, W., Neises, A., (1994). “Machining of Holes Developments in Drilling Techonolgy”, Annals of the CIRP, 43 (2): 551-560.
- [5] Akkurt, M., (1998). “Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları”, Birsan Yayınevi, Ankara, Türkiye, 23-90, 117-181.
- [6] Sanjay, C., Jyothi, C., (2006). “A study of surface roughness in drilling using mathematical analysis and neural networks”, Int. J. Adv. Manufacturing Technology, 29:846-852.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [7] Pirtini M., Lazoglu I., (2005). “Forces and hole quality in drilling”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45: 1271-1281.
- [8] Thangaraj, A., Wright P.K., (1988). “Computer-assisted predicted of drill-failure using in-process measurements of thrust force”, Journal of Engineering for Industry, 110(4).
- [9] Yuzo, S., Kinji, S., Makota, O., (1973). “Tsuneo, S., “Drilling machinibity of wrought pure aluminium for industrial use”, J. Jap. Inst. Light Met., 23(2):72-77.
- [10] Doğramacı, T., (2005). “CNC İşleme Merkezlerinin Seçimi İçin Bir Uzman Sistemin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [11] İç, Y.T., (2006). “İşleme Merkezi Seçiminde Kullanılacak Bir Karar Destek Sisteminin Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [12] Mc Irath, M., Romero, A., (2005). “Advanced Bearing for High-speed Machining”, The Timkon Co. Coventry, U.K. www.machinedesign.com/articles, son erişim tarihi: 23 Mayıs 2015.
- [13] Kalpakjian, S., (1991). “Manufacturing Process for Engineering Materials”, Addison-Wesley, New York, A.B.D.
- [14] Erdoğan, M., (2000). “Demir Dışı Alaşımlar”, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Nobel yayınevi, Cilt1
- [15] Liao, Y.S., Lin, H.M., Chen, Y.C., (2007). “Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool”, International Journal of Machine tools & Manufacture, Vol.47, No.1667–1676.
- [16] Trent, E.M., (1989). “Metal cutting”, Butterworths Press, London, 1-171.
- [17] Çakır, A., (2015). “AA7075 ve AA2024 Alüminyum Malzemelerine Delik Delinmesinde Soğutma Yöntemlerinin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

FREZELEME ESNASINDAKİ TEZGÂH DİNAMİĞİNİN BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

Orkun Özşahin^a, Erhan Budak^b ve H. Nevzat Özgüven^c

a, Atılım Üniversitesi, İmalat Mühendisliği, Ankara/TÜRKİYE, orkun.ozsahin@atilim.edu.tr

b, Sabancı Üniversitesi, Üretim Araştırma Laboratuvarı, İSTANBUL/ TÜRKİYE, ebudak@sabanciuniv.edu.tr

c, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara/TÜRKİYE, ozguven@metu.edu.tr

Özet

Tırlama tipi titreşimler talaşlı imalat sırasında üretim verimliliğini etkileyen önemli bir sorundur. Kendinden kaynaklı bu titreşimler işlenen yüzeyin kalitesini etkilemekte, takım aşınmasında artışa ve hatta tezgâhta önemli zararlara sebep olmaktadır. Tırlamanın olmadığı kesme koşulları ise kararlılık diyagramları kullanılarak belirlenebilir ve üretim verimliliğinde önemli artışlar sağlanabilir. Kararlılık diyagramlarının elde edilebilmesi için tezgâhın kesici takım ucundaki frekans tepki fonksiyonunun (FTF) belirlenmesi gerekmektedir. Takım uç nokta FTF'si genellikle tezgâhın çalışmadığı duran konumunda ölçülerek elde edilmektedir. Ancak yüksek hızda gerçekleşen kesme işlemlerinde jiroskopik momentten, merkezkaç kuvvetlerinden, ısıl genleşmeden dolayı tezgâh dinamiğinde değişimler olmaktadır. Dolayısı ile tezgâhın çalışmadığı durum için elde edilen takım uç nokta FTF'si hatalı tırlama kararlılığı tahminlerine neden olabilmektedir. Bu çalışmada, kesme koşullarının iş mili dinamiği ve işlem kararlılığına etkileri farklı tutucu-takım kombinasyonları için incelenmiştir. Ayrıca kesme koşulları altında rulman dinamiğinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Elde edilen hıza bağlı rulman özellikleri geliştirilen analitik modelde kullanılarak farklı tutucu-takım kombinasyonları için takım uç nokta FTF'leri ve kararlılık diyagramları hesaplanmıştır. Elde edilen kararlılık diyagramlarının doğruluğu tırlama testleri ile yapılmış ve deney yapmaya gerek olmadan yüksek hızlarda kesme işlemleri için kararlılık diyagramlarını başarıyla tahmin edilebileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tırlama, Kararlılık diyagramları, Süreç Sırasındaki Tezgâh Dinamiği

IDENTIFICATION AND MODELING OF MACHINE TOOL DYNAMICS DURING MILLING

Abstract

Chatter is a major problem effecting productivity in metal cutting operations. Self excited vibrations cause poor surface finish, increased tool wear and even failure of the machine tool. Chatter free machining conditions can be obtained using stability diagrams and production efficiency can be significantly increased. In order to obtain stability diagrams, frequency response function (FRF) at tool tip should be determined. Generally tool point FRF is measured at idle state of machining centers. During high speed cutting operations, due to gyroscopic moments, centrifugal forces and thermal expansions machine tool dynamics change. Therefore tool point FRF obtained for idle state of machining centers may lead inaccurate chatter stability predictions. In this study, effects of operating conditions on spindle dynamics and process stability are investigated for different holder – tool combinations. Also changes in bearing dynamics under operational conditions are identified. Then tool point FRFs and stability diagrams are calculated using identified speed dependent bearing parameters in analytical model. Predicted stability diagrams are verified through chatter tests and it is shown that stability diagrams in high speed machining operations can be predicted accurately.

Keywords: Chatter, Stability diagrams, In process machine tool dynamics

1. GİRİŞ

Metal kesme sırasında ortaya çıkan tırlama türü titreşimlerin engellenebilmesi için kararlılık diyagramlarının elde edilmesi gerekmektedir [1-3]. Kararlılık diyagramlarının elde edilebilmesi için ise tezgâhın takım ucu Frekans Tepki Fonksiyonu'na (FTF) ihtiyaç vardır. Genellikle takım ucu FTF'si takım ucunda yapılan darbe testi ve biçim (modal) analiz yöntemi ile tezgâhın çalışmadığı durum için elde edilmektedir. Bu yöntem kullanılarak yüksek hızda dönen bir tezgâhta yapılan kesme işlemi için kararlılık diyagramları elde edildiğinde ve gerçek kesme işlemi ile karşılaştırıldığında, elde edilen kararlılık diyagramlarında bazı sapmalar gözlenmektedir. Bu sapmaların değişik nedenleri vardır. En önemli neden statik koşullardaki takım ucu FTF'sinin kullanılması ve yüksek hızlarda tezgâh dinamiğinde meydana gelen değişimlerin göz ardı edilmesidir. Bu nedenle kesme işlemi sırasında sistem dinamiğinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesi yüksek hızda kesme yapan takım tezgâhların verimliliği açısından büyük önem kazanmaktadır.

Kesme sırasında jiroskopik etkiler, sıcaklık değişimleri ve merkezkaç kuvvetlerinden dolayı iş milini destekleyen rulmanların dinamiğinde değişimler olmaktadır. Rulman dinamiğinde meydana gelen değişimlerin nedeni ise yüksek hızlarda oluşan jiroskopik moment ve merkezkaç kuvvetlerinin rulman içerisindeki parçaların dış yüzey ile olan temas açısını arttırması sonucu direngenlik değerlerinde oluşan azalmadır [4-6]. Ayrıca Ertürk ve diğerlerinin [7] yaptıkları çalışmalar rulman özelliklerinin esas olarak iş mili modlarını etkilediğini göstermiştir. Dolayısı ile kesme işlemi sırasında tezgâh FTF'sinde meydana gelecek değişimlerin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için rulman dinamiğindeki değişimlerin modelleme çalışmalarına doğru bir şekilde dahil edilmesi gerekmektedir. Kesme sırasındaki tezgâh dinamiğinin modellenmesine yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur [8-11]. Yapılan modelleme çalışmalarında karşılaşılan önemli bir sorun ise rulman dinamiğinde meydana gelen değişimlerin doğru bir şekilde hesaplanmasıdır. Rulman modellenmesinde ortaya çıkan zorluklar rulmanların tezgâh içinde kapalı bir konumda bulunması ve hıza bağlı dinamik özelliklerinin zaman içerisinde tezgâh kullanımından kaynaklı olarak değişmesidir. Dolayısı ile rulman geometrisi bilinse dahi hıza bağlı dinamik özellikleri doğru bir şekilde hesaplanamamaktadır ve bu özelliklerin deneysel olarak belirlenmesini zorunlu kılmaktadır. Literatürde yer alan deneysel çalışmalar ise takım uç nokta FTF'sinin iş mili hızına bağlı dinamiğinin belirlenmesine yönelik olup rulman dinamiğinin belirlenmesine yönelik henüz yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Yapılan deneysel çalışmaların ortak noktası karmaşık deney düzeneklerinin kurulması gerekliliği ve pahalı ölçüm aletlerine olan bağımlılıktır [12-14]. Mevcut çalışmaların ve geliştirilen deneysel yöntemlerin aksine, Orkun ve diğerlerinin [15] son dönemde geliştirdiği deneysel yöntem ise pahalı ölçüm sistemlerine olan bağımlılığı ortadan kaldırmış ve tezgâh dinamiğinde meydana gelen değişimlerin tırlama testleri vasıtası ile belirlenmesine olanak sağlamıştır. Deneysel olarak da doğrulaması yapılan yöntem kullanılarak yapılan çalışmalar özellikle iş mili dinamiğinin baskın olduğu iş mili-takım tutucu-takım kombinasyonlarında yüksek hızda yapılan kesme işlemlerinde önemli değişimler olduğunu göstermiştir ve takım uç nokta FTF'sinde meydana gelen değişimlerin deneysel olarak başarıyla belirlenebileceği gösterilmiştir.

Bu bildiride kesme sırasında iş mili dinamiğinde meydana gelen değişimlerin en önemli nedeni olan rulman dinamiğinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan çalışmalar verilmektedir. Bu kapsamda 5 eksen bir tezgâh için rulman dinamik özellikleri tezgâhın çalışmadığı ve çalıştığı durumlar için deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, farklı takım tutucu – takım kombinasyonlarının modellenmesinde kullanılmış ve kararlılık diyagramlarında yüksek hızlarda meydana gelen değişimlerin başarıyla tahmin edilebildiği gösterilmiştir. Deneysel olarak elde edilen hıza bağlı rulman özelliklerinin ve oluşturulan analitik modelin birleştirilmesi ile deneylere olan bağımlılık ortadan kaldırılmakta ve yüksek hızlarda tezgâh dinamiğinde meydana gelen sapmalar başarıyla hesaplanarak kararlılık diyagramları doğru bir şekilde tahmin edilebilmektedir.

2. İŞLEM SIRASINDAKİ TAKIM UÇ NOKTA FTF'SİNİN BELİRLENMESİ

2.1 Matematiksel Model

Budak ve Altıntaş [2] tarafından geliştirilen kararlılık teorisine göre aksel kesme derinliği ve turlama frekansı şu şekilde ifade edilebilir.

$$a_{\text{lim}} = -\frac{2\pi\Lambda_R}{NK_t} (1 + \kappa^2) \quad (1)$$

$$\omega_c T = \cos^{-1} \left(\frac{\kappa^2 - 1}{\kappa^2 + 1} \right) \quad (2)$$

Denklem 1 ve Denklem 2'de verilen ifadeler:

$$\Lambda = (\Lambda_R + \Lambda_I i) = -\frac{1}{2a_0} \left(a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0} \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= G_{xx} G_{yy} (\alpha_{xx} \alpha_{yy} - \alpha_{xy} \alpha_{yx}) \\ a_1 &= \alpha_{xx} G_{xx} + \alpha_{yy} G_{yy} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{xx} &= \frac{1}{2} [\cos 2\phi - 2r\phi + r \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \\ \alpha_{xy} &= \frac{1}{2} [-\sin 2\phi - \phi + r \cos 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \\ \alpha_{yx} &= \frac{1}{2} [-\sin 2\phi + 2\phi + r \cos 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \\ \alpha_{yy} &= \frac{1}{2} [-\cos 2\phi - 2r\phi - r \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} \quad (6)$$

G_{xx} ve G_{yy} takım uç nokta FTF'leri, N kesici uç sayısı, K_t teğet kesme katsayısı, r radyal ve teğet kesme katsayıları oranı, ϕ_{st} ve ϕ_{ex} kesici dışın giriş ve çıkış açılarını ifade etmektedir.

Ayrıca takım uç nokta FTF'leri şu şekilde ifade edilebilir [16]:

$$G_{xx} = \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{\omega_j^2 - \omega^2 + i2\xi_j\omega\omega_j} \quad (7)$$

ξ_j^j sönüm oranı, ω_j doğal frekans, A_j biçim sabiti and ω tahrik frekansı.

Denklem 1 –Denklem 7’den de görüleceği üzere aksel kesme derinliği ve tirlama frekansı analitik olarak ifade edilebilir. Elde edilecek ifade içerisinde takım uç nokta FTF’leri yani sistemin doğal frekansı, sönüm değeri ve biçim sabiti bilinmeyen olarak kalacaktır. Aynı zamanda kesme derinliği ve tirlama frekansı tirlama testleri vasıtası ile deneysel olarak bulunabilir. Tirlamanın gerçekleştiği kesme koşullarının deneysel olarak belirlenmesinde mikrofon ile yapılan gürültü ölçümü ve kesme sonrasında oluşan yüzey kalitesi belirleyici unsur olarak kullanılmaktadır. Kararlı bir kesme işleminde ölçülen gürültü spektrumu takım geçiş frekansı ve yüksek harmoniklerinden oluşmaktadır. Ancak kararsız bir kesme işleminde ise bu frekans değerleri dışında bir frekans (tirlama frekansı) baskın olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca kararsız bir kesme sonrasında yüzeyde tirlama izleri oluşmaktadır. Dolayısı ile hem yüzey kalitesinin hem de gürültü spektrumunun birlikte incelenmesi ile tirlamanın gerçekleştiği kesme koşulları belirlenebilir. Son olarak bilinmeyen sistem parametrelerini içeren analitik ifadelerin deneysel olarak elde edilen ifadelerle eşitlenmesiyle sistem parametreleri hesaplanabilir.

$$a_{lim}^{analitik} = a_{lim}^{deneysel} \quad (8)$$

$$\omega_c^{analitik} = \omega_c^{deneysel} \quad (9)$$

Takım uç nokta FTF’inde meydana gelen değişimlerin belirlenmesinde karşılaşılan önemli bir sorun, birden fazla mod içeren FTF’lerin analizinde ortaya çıkan bilinmeyen sayısındaki artıştır. Bu sorun sadece baskın modun bilinmeyen olarak kabul edilmesi ve kesme işleminin kararlılığına etki etmeyen modların ise çalışmaz durumdaki değerler ile aynı olarak kabul edilmesi ile aşılabılır.

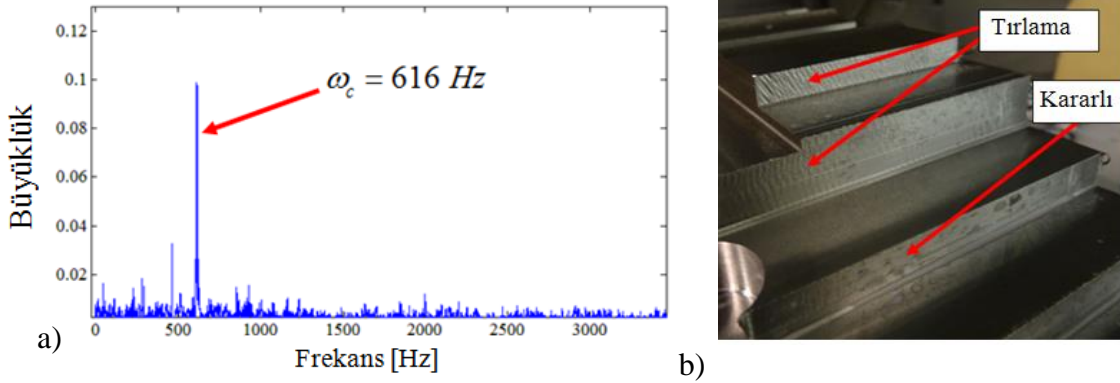
2.2 Deneysel Uygulama

Tezgâh dinamiğinde meydana gelen değişimlerin belirlenebilmesi amacıyla Şekil 1’de gösterilen takım tutucu ve takım Deckel Maho 5-eksen tezgâha takılmış ve alüminyum bir iş parçası üzerinde tirlama testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde tirlamanın gerçekleştiği kesme koşullarının belirlenmesi amacıyla oluşan gürültü mikrofon ile ölçülmüş ve gürültü spektrumunda yer alan frekanslar incelenmiştir. Ayrıca kesme işlemi sonrasında yüzey kalitesi incelenmiş ve her iki veri kullanılarak tirlamanın olduğu kesme koşulları belirlenmiştir.



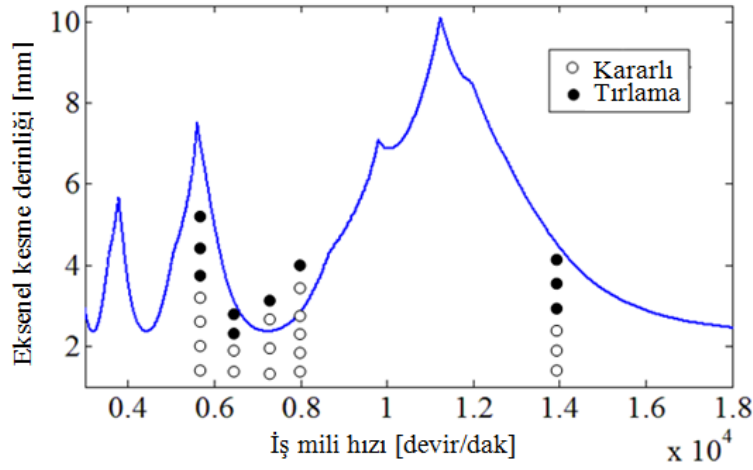
Şekil 1 İş mili – takım tutucu – takım kombinasyonu.

14000 devir/dak iş mili hızında yapılan deneylerde elde edilen yüzey sonuçları ve kararsız bir kesme işleminin gürültü spektrumu Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2a’da görüleceği gibi kesme işlemi sırasında yapılan gürültü ölçümünde baskın frekans 616 Hz’dir ve 616 Hz takım geçiş frekansına ya da yüksek bir harmoniğine denk gelmemektedir. Ayrıca aynı kesme testinde elde edilen yüzeyde tırlama izleri kolayca görülebilmektedir. Dolayısı ile yapılan kesme koşullarında tırlamanın olduğu sonucu çıkartılabilir ve tırlama frekansı 616 Hz olarak belirlenebilir.



Şekil 2 a) 14000 devir/dak iş mili hızında kararsız kesme için elde edilen mikrofön ölçümü spektrumu b) 14000 devir/dak iş mili hızında gerçekleşen kararlı ve kararsız kesmeye ait yüzey sonuçları.

Yapılan tırlama testleri ve tezgâhın çalışmaz durumda ölçülen takım uç nokta FTF’si kullanılarak hesaplanan kararlılık diyagramı Şekil 3’te gösterilmiştir. Ayrıca çalışmaz durumdaki takım uç noktası kullanılarak yapılan kararlılık tahminleri ve deneyler sonucunda elde edilen gerçek kararlılık değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Şekil 3’ten ve Tablo 1’den görülebileceği gibi yüksek hızda yapılan kesme işlemlerinde kararlılık diyagramlarında önemli sapmalar gerçekleşmektedir. Bu sapmaların başlıca nedeni tezgâh dinamiğinde meydana gelen değişimlerdir.



Şekil 3 Tezgâhın çalışmaz durumda ölçülen takım uç nokta FTF'si kullanılarak hesaplanan kararlılık diyagramı ve tirlama testleri.

Tablo 1

Tahmin edilen ve gerçekleşen tirlama parametreleri

İş mili hızı (devir/dak)	Tahmin edilen	Tahmini tirlama	Gerçekleşen	Gerçekleşen tirlama
	a_{lim} (mm)	frekansı ω_c (Hz)	a_{lim} (mm)	frekansı ω_c (Hz)
6200	4	727.5	2.65	694
6300	3.6	732	2.6	697
7400	2.39	762	2.8	727
7500	2.42	764.4	3.1	728
14000	4.45	722.8	3	616

Ayrıca takım uç nokta FTF'sindeki baskın modda meydana gelen değişimler Bölüm 2.1'de detayları verilen yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2'de gösterilmiştir. Tablo 2'de verilen sonuçlar incelendiğinde, takım uç nokta FTF'si baskın modunda meydana gelen değişimlerin iş mili hızına bağlı olduğu ve artan hız ile birlikte değişimlerin de arttığı görülmektedir. Örneğin 14000 devir/da iş mili hızında tezgâhın x yönündeki doğal frekansında 2.25% değişim olurken, y yönündeki doğal frekansında 17.8% değişim gözlenmiştir.

Tablo 2

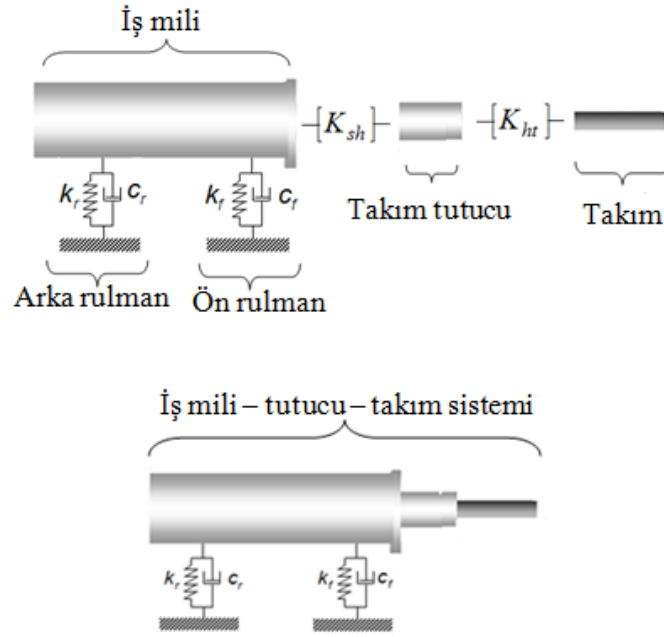
Farklı iş mili hızlarında belirlenen biçim parametreleri

	İş mili hızı 0 devir/dak	İş mili hızı 6200 devir/dak - 6300 devir/dak	İş mili hızı 7400 devir/dak - 7500 devir/dak	İş mili hızı 13900 devir/dak - 14000 devir/dak
x doğrultusu				
Doğal frekans (Hz)	800	797	793	782
Sönüm (%)	7.79	5.1	8	8.8
y doğrultusu				
Doğal frekans (Hz)	744	672	642	611
Sönüm (%)	4.11	6.7	3.9	5.7

3. RULMAN DİNAMİĞİNİN BELİRLENMESİ

3.1 Analitik Model ve Çalışmaz Durumdaki Rulman Özellikleri

Bölüm 2’de detayları verilen yöntem kullanılarak tezgâh dinamiğinde meydana gelen değişimler belirlenebilmektedir. Ancak, yüksek hızda kesme işlemi yapan üretim merkezlerinde oldukça fazla sayıda farklı takım tutucu – takım kombinasyonu kullanılmaktadır ve her kombinasyon için deney yapmak oldukça zordur. Dolayısı ile deneylere olan bağımlılığı ortadan kaldırmak yüksek hızda yapılan kesme işlemlerinin verimliliği açısından büyük bir önem arz etmektedir. Deneylere olan bağımlılığı ortadan kaldırmak için Orkun ve diğerleri [17] tarafından geliştirilen ve yüksek hızdaki jiroskopik etkilerin dahil edilebildiği modelleme yaklaşımı kullanılabilir. Bu yöntemde tezgâh Şekil 4’te gösterildiği gibi alt bileşenlere ayrılmakta ve her alt bileşen Timoshenko çubuk modeli kullanılarak modellenmektedir. Rulman dinamiği ise yapısal değişiklik yöntemi [18] uygulanarak modele dahil edilmektedir. Bu yöntemde rulman dinamiği doğrusal direngenlik, açısız direngenlik, doğrusal sönüm ve açısız sönüm özellikleri kullanılarak tanımlanmaktadır.



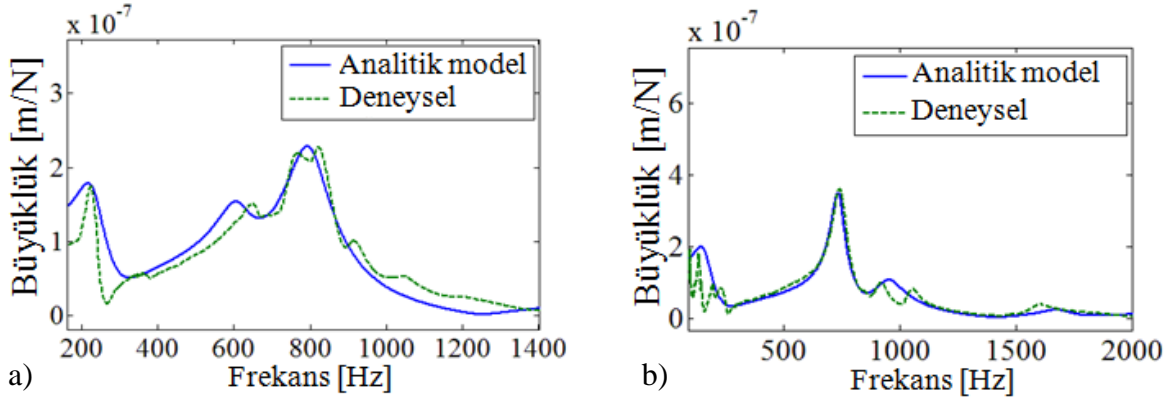
Şekil 4. İş mili – takım tutucu – takım sistemi modellenmesi.

İlk olarak takım uç nokta FTF'si tezgâhın durağan durumunda ölçülmüş ve aynı sistemin takım uç nokta FTF'si analitik model kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen analitik model sonucu ve deneysel FTF arasındaki hatayı minimize edecek şekilde rulman dinamik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te gösterilmiştir. Ayrıca analitik model vasıtası ile hesaplanan takım uç nokta FTF'leri x ve y doğrultusu için deneysel olarak elde edilen FTF'ler ile birlikte Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 3

Çalışmaz durumdaki rulman dinamik özellikleri

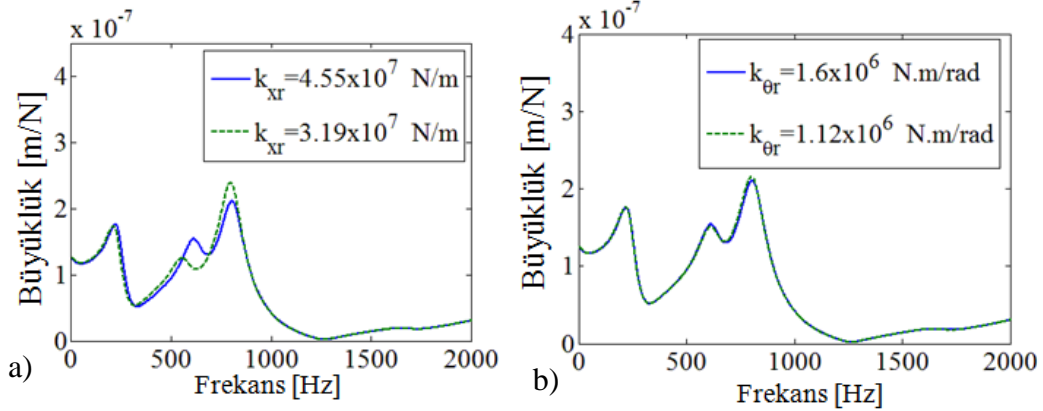
	Doğrusal direngelik (N/m)	Açısal direngelik (N.m/rad)	Doğrusal sönüm (N.s/m)	Açısal sönüm (N.m.s/rad)
x doğrultusu				
Ön rulman	9.6×10^6	7.6×10^6	3500	10
Arka rulman	4.55×10^7	1.6×10^6	2600	40
y doğrultusu				
Ön rulman	1.45×10^6	3.83×10^6	3500	10
Arka rulman	1.02×10^8	1.5×10^6	1000	10



Şekil 5 Tezgâhın çalışmaz durumu için analitik model kullanılarak ve deneysel olarak elde edilen takım uç nokta FTF'leri a) x doğrultusu b) y doğrultusu.

3.2 Rulman dinamik özelliklerinin etki analizi

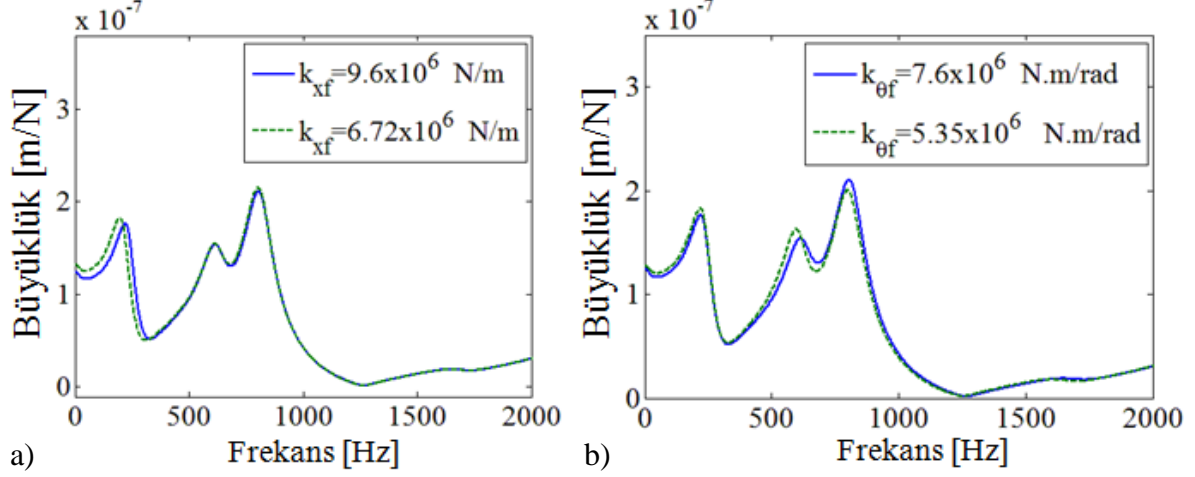
İlk olarak x yönündeki takım uç nokta FTF'si tezgâhın durağan durumu için modellenmiş ve modelleme sırasında rulman değerleri Tablo 3'te verilen haliyle alınmıştır. Ayrıca rulman etkisini incelemek amacıyla arka rulman doğrusal direngenlik değeri 30% oranında azaltılırken diğer rulman parametreleri Tablo 3'te verilen şekliyle kullanılmıştır. Elde edilen takım uç nokta FTF'leri Şekil 6a'da gösterilmiştir. Benzer biçimde arka rulman açısallık direngenlik değeri 30% oranında azaltılırken diğer rulman değerleri Tablo 3'te verilen şekliyle alınmıştır. Elde edilen takım uç nokta FTF'leri Şekil 6b'de gösterilmiştir.



Şekil 6 a) Arka rulman doğrusal direngenlik etkisi b) arka rulman açısallık direngenlik etkisi.

Şekil 6'da görüleceği üzere arka rulman doğrusal direngenliğindeki değişimler takım uç nokta FTF'sinde değişime neden olurken arka rulman açısallık direngenliğindeki değişimler herhangi bir değişime neden olmamaktadır.

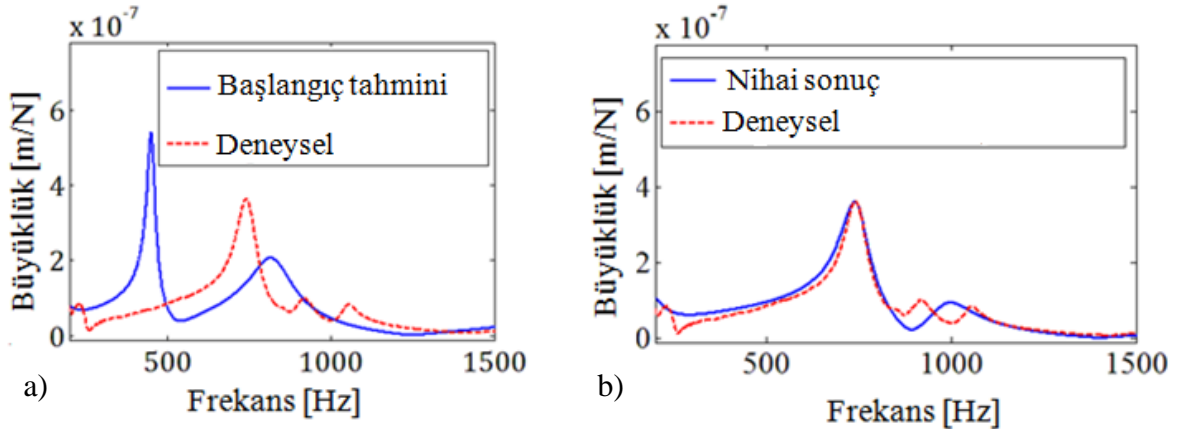
Benzer bir biçimde ön rulmanların doğrusal ve açılal dirençlik değęerlerinin takım uç nokta FTF'si üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'de verilen sonuçlar arka rulmanların aksine ön rulman açılal dirençlik değęerindeki değışimlerin takım uç nokta FTF'sini etkilediğini göstermektedir. Ön rulman doğrusal dirençliğinde meydana gelen değışimler takım uç nokta FTF'sinde bir değışime neden olmamaktadır.



Şekil 7 a) Ön rulman doğrusal dirençlik etkisi b) ön rulman açılal dirençlik etkisi.

3.3 Rulman dinamik özelliklerinin belirlenmesi

Rulman dinamiğinin belirlenmesi amacıyla ilk olarak takım uç nokta FTF'si tezgâhın çalışmadığı ve yüksek hızda kestiği durumlar için deneysel olarak elde edilmiştir. Bu noktada çalışmaz durumdaki takım uç nokta FTF'si darbe çekici test ile ölçülürken yüksek hızlarda yapılan kesme işlemi sırasındaki FTF'ler ise detayları 2. Bölümde verilen yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Sonrasında analitik model kullanılarak rulman değęerleri her hız için belirlenmiştir. Rulman değęerlerinin belirlenmesi işleminde ilk olarak başlangıç tahminleri kullanılmış ve hesaplanan ile deneysel olarak elde edilen takım uç nokta FTF'leri arasındaki hata miktarı dikkate alınarak rulman değęerleri belirlenmiştir. Başlangıç ve nihai rulman değęerlerinin kullanılması ile elde edilen takım uç nokta FTF'leri deneysel sonuçlar ile birlikte Şekil 8'de gösterilmiştir.



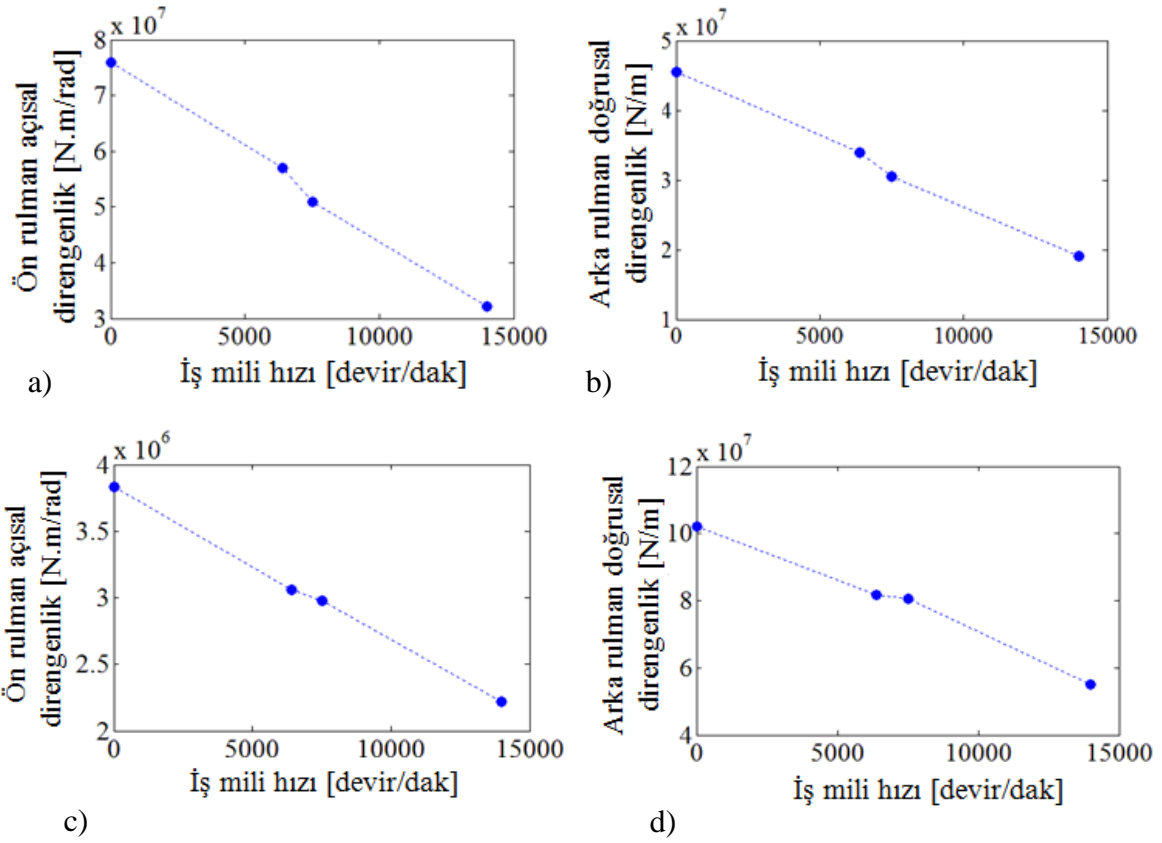
Şekil 8. Takım uç nokta FTF'si a) başlangıç tahmini b) nihai sonuç.

Rulman direngenlik değerlerinin iş mili hızına göre değişimi Tablo 4 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9'da verilen sonuçlar iş mili hızına bağlı olarak rulman dinamiğinde önemli değişimlerin olduğunu göstermektedir. Rulman direngenlik değerleri iş mili hızı ile ters bir korelasyon sergilemekte ve hız arttıkça direngenlik değerleri azalmaktadır. Ayrıca rulman sönüm değerlerinin iş mili hızına bağlı değişimi Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 5'te verilen sonuçlardan görüleceği üzere, rulman sönüm özelliği direngenliğin aksine iş mili hızına paralel olarak artmaktadır.

Tablo 4

Hıza bağlı rulman direngenlik değerleri

	Çalışmaz durum	İş mili hızı: 6200 devir/dak- 6300 devir/dak	İş mili hızı: 7400 devir/dak - 7500 devir/dak	İş mili hızı: 13900 devir/dak - 14000 devir/dak
x doğrultusu				
Ön rulman açısai direngenlik (N.m/rad)	7.6×10^7	5.7×10^7	5.1×10^7	3.21×10^7
Arka rulman doğrusal direngenlik (N/m)	4.55×10^7	3.4×10^7	3.05×10^7	1.91×10^7
y doğrultusu				
Ön rulman açısai direngenlik (N.m/rad)	3.83×10^6	3.06×10^6	2.98×10^6	2.22×10^6
Arka rulman doğrusal direngenlik (N/m)	1.02×10^8	0.816×10^8	0.805×10^8	0.55×10^8



Şekil 9. Rulman direngenlik değerlerinin iş mili hızına göre değişimi a)ön rulman açısal direngenliği (x yönünde) b) arka rulman doğrusal direngenli (x yönünde) c)ön rulman açısal direngenliği (y yönünde) d) arka rulman doğrusal direngenli (y yönünde)

Tablo 5

Farklı iş mili hızlarında belirlenen rulman sönüm değerleri

	İş mili hızı:	İş mili hızı:	İş mili hızı:
Çalışmaz durum	6200 devir/dak - 6300 devir/dak	7400 devir/dak - 7500 devir/dak	13900 devir/dak - 14000 devir/dak
x doğrultusu			
Ön rulman doğrusal sönüm (N.s/m)	3500	4200	4550 5900
y doğrultusu			
Ön rulman doğrusal sönüm (N.s/m)	3500	4500	4500 6400

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Rulman dinamiğini dolayısı ile tezgâh dinamiğini etkileyen bir başka faktör de kesme sırasında oluşan kuvvetlerdir. Kesme kuvvetlerinin tezgâh dinamiği üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla tirlama testleri 7500 devir/dak iş mili hızında farklı diş başına ilerleme değerlerinde yapılmış ve kararlılık diyagramlarını belirleyen baskın modun değişimi deneysel olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da verilen sonuçlar incelendiğinde tezgâh dinamiğinin artan diş başına ilerleme için değiştiği görülmektedir. Baskın modun doğal frekansı artan ilerleme ile birlikte azalmakta, sönüm değerleri ise belirli bir eğilim göstermemektedir.

Tablo 6

Farklı ilerleme değerleri için 7500 devir/dak iş mili hızında belirlenen modal parametreler

	Çalışmaz durum	0.08 mm/diş	0.1 mm/diş	0.16 mm/diş	0.2 mm/diş
<u>x doğrultusu</u>					
Doğal frekans (Hz)	800	726	726	716	699
Sönüm (%)	7.79	6.8	6.9	8	9
<u>y doğrultusu</u>					
Doğal frekans (Hz)	744	668	667	663	651
Sönüm (%)	7.79	8.5	8	7.4	7

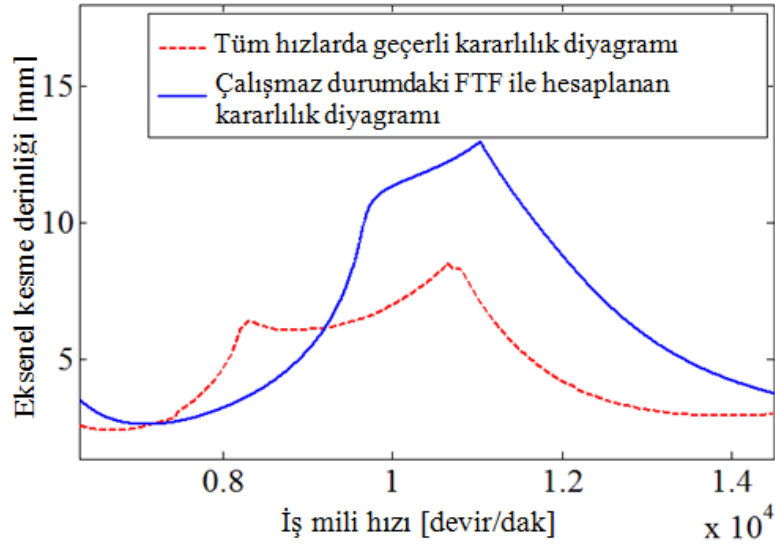
Ayrıca, Tablo 6'da verilen sonuçlar kullanılarak rulman dinamik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen ilerlemeye bağlı rulman özellikleri Tablo 7'de verilmiştir. Tablo 7'de verilen sonuçlarda görüleceği üzere, rulman direngenlik değerleri ilerleme değerleri arttıkça azalmaktadır. Dolayısı ile yüksek hızda yapılan kesme işlemlerinde hem iş mili hızının hem de kuvvet etkisinin geliştirilen modele dahil edilmesi gerekmektedir.

Tablo 7

Farklı ilerleme değerleri için 7500 devir/dak iş mili hızında belirlenen rulman direngenlik değerleri

	0.1 mm/diş	0.16 mm/diş	0.2 mm/diş
x doğrultusu			
Ön rulman açısasal direngenlik (N.m/rad)	5.12×10^6	4.44×10^6	4.21×10^6
Arka rulman doğrusal direngenlik (N.m/rad)	3.05×10^7	2.78×10^7	2.55×10^7
y doğrultusu			
Ön rulman açısasal direngenlik (N.m/rad)	2.98×10^6	2.72×10^6	2.6×10^6
Arka rulman doğrusal direngenlik (N.m/rad)	8.05×10^7	7.75×10^7	7.24×10^7

Son olarak takım uç nokta FTF'si 6500 devir/dak – 14000 devir/dak iş mili hız aralığı için elde edilen rulman dinamik özellikleri kullanılarak hesaplanmış ve alüminyum iş parçasının 100% radyal kesme derinliğindeki kesme işlemi için kararlılık diyagramı hesaplanmıştır. Hesaplanan kararlılık diyagramı, tezgâhın çalışmaz durumu için elde edilen kararlılık diyagramı ile birlikte Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 10'dan görülebileceği gibi operasyon şartları altında tezgâh dinamiğindeki değişimler işlemin kararlılık diyagramında önemli değişimlere neden olmaktadır.



Şekil 10. Tüm hızlarda geçerli kararlılık diyagramı ve çalışmaz durum için hesaplanan kararlılık diyagramı.

4. YÖNTEMİN DOĞRULANMASI

Bu bölümde deneysel olarak belirlenen hıza bağlı rulman özelliklerinin doğrulamasına yönelik yapılan deneyler verilmektedir. Bu doğrultuda Bölüm 3'te yapılan deneylerde kullanılan takım tutucu ve takımdan farklı bir tutucu-takım kombinasyonu tezgâha takılmış ve takım uç nokta FTF'si farklı iş mili hızları için ilave deney yapılmadan hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar tırlama testleri vasıtası ile doğrulanmıştır.

Vaka 1:

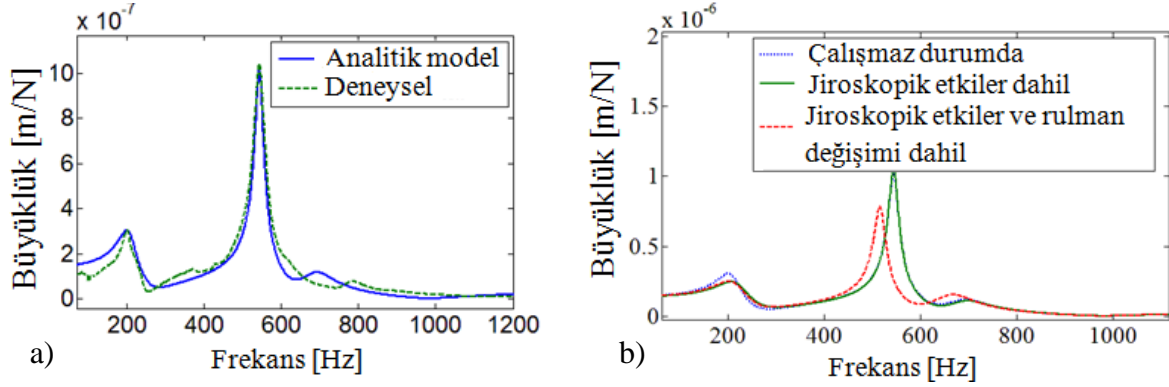
İlk olarak 25 mm çapında 4 adet kesici dişi olan karbür bir takım 3. Bölümde kullanılan tutucudan farklı bir tutucu ile tezgâha takılmıştır. Kullanılan takım tutucu ölçüleri Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8

Takım tutucu ölçüleri

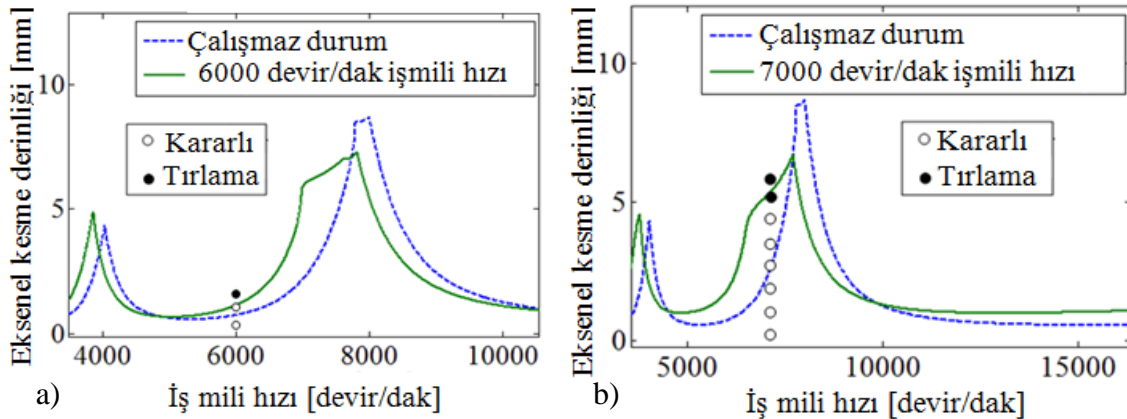
Kesit numarası	1	2	3	4	5	6
Uzunluk (mm)	25	10	90	16	6	10
Dış çap (mm)	63.5	50	63	48	64	55
İç çap (mm)	25	25	10	10	10	10

Takım uç nokta FTF'si tezgâhın çalışmaz durumu ve iş mili hızı 6000 devir/dak değeri için hesaplanmıştır. Çalışmaz durum için hesaplanan takım uç nokta FTF'si deneysel olarak elde edilen takım uç nokta FTF'si ile birlikte Şekil 11a'da gösterilmiştir. Ayrıca takım uç nokta FTF'si 6000 devir/dak iş mili hızı için hesaplanmıştır. Yapılan hızla bağlı hesaplamada jiroskopik momentin ve rulman dinamiği değişiminin etkisi modele aşamalı olarak eklenmiş ve her iki etkinin sonuçları Şekil 11b'de gösterilmiştir. Şekil 11a'dan da görülebileceği gibi model takım uç nokta FTF'sini çalışmaz durum için doğru bir şekilde hesaplayabilmektedir. Ayrıca Şekil 11b'de gösterildiği üzere, jiroskopik moment takım uç nokta FTF'sinde bir değişime neden olmazken rulman dinamiğinde meydana gelen değişimler takım uç nokta FTF'sinde önemli sapmalara sebep olmaktadır.



Şekil 11 a) Çalışmaz durum için hesaplanan ve ölçülen takım uç nokta FTF'leri b) 6000 devir/dak iş mili hızı için hesaplanan takım uç nokta FTF'leri.

Kararlılık diyagramları hızla bağlı olarak hesaplanan takım uç nokta FTF'leri kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen kararlılık diyagramlarının doğruluğunu ölçmek için tırlama testleri yapılmıştır. Hesaplanan kararlılık diyagramları tırlama testi sonuçları ile birlikte Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekil 12'den de görülebileceği üzere, iş mili hızına bağlı olarak işlemin kararlılık diyagramında önemli sapmalar olmakta ve önerilen yöntem kullanılarak bu sapmalar oldukça doğru bir şekilde kesme işlemi öncesinde belirlenebilmektedir.



Şekil 12. Çalışmaz durum, 6000 devir/dak ve 7000 devir/dak iş mili hızları için hesaplanan kararlılık diyagramları ve tırlama testi sonuçları.

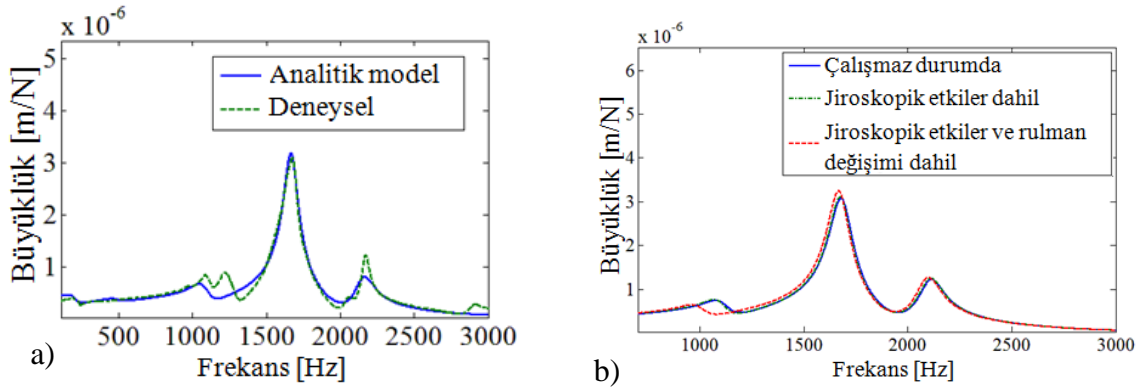
Vaka 2:

Bu vaka çalışmasında vaka 1’de incelenen sistemden farklı olarak 12 mm çapında tutucu dışındaki uzunluğu 72 mm olan 4 dişli karbür takım tezgâha bağlanmıştır. Kullanılan takım tutucunun ölçüleri Tablo 9’da verilmiştir. Çalışmaz durum ve 12500 devir/dak iş mili için hesaplanan takım uç nokta FTF’si deneysel olarak elde edilen takım uç nokta FTF’si ile birlikte Şekil 13’te gösterilmiştir.

Tablo 9

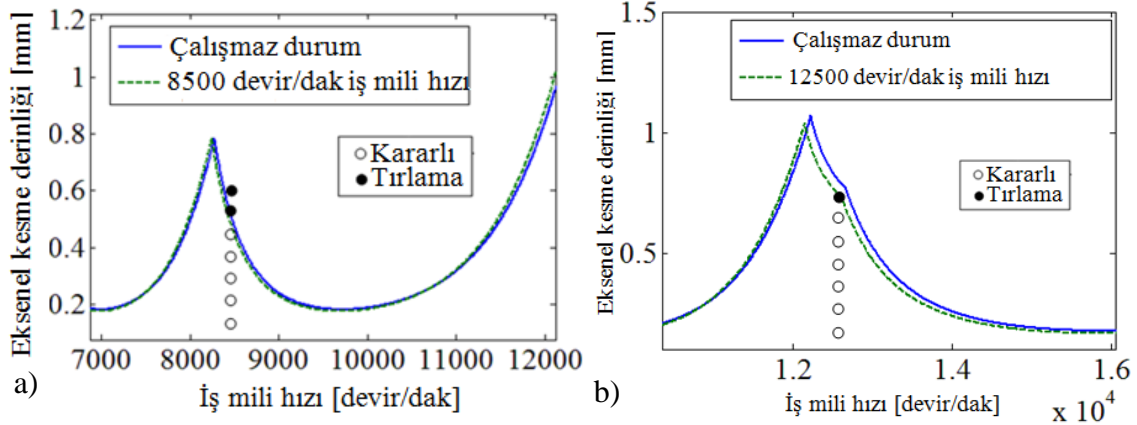
Takım tutucu ölçüleri

Kesit numarası	1	2	3	4	5
Uzunluk (mm)	25	18	16	6	10
Dış çap (mm)	63.5	50	44	64	55
İç çap (mm)	12	12	15	15	15



Şekil 13. a) Çalışmaz durum için hesaplanan ve ölçülen takım uç nokta FTF’leri b) 12500 devir/dak iş mili hızı için hesaplanan takım uç nokta FTF’leri.

Şekil 13’te verilen FTF’ler incelendiğinde, Vaka 1’den farklı olarak takım uç nokta FTF’sinin iş mili hızı ve rulman dinamiğinde meydana gelen değişimlerden etkilenmediği görülecektir. Bunun nedeni, baskın modun kesici takıma ait olması ve rulman dinamiğindeki değişimlerin esas olarak iş mili modlarını etkilerken takım modları üzerindeki etkisinin kısıtlı olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca hesaplanan takım uç nokta FTF’leri kullanılarak kararlılık diyagramları hesaplanmış ve tırlama testleri ile doğrulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 14’de gösterilmiştir.



Şekil 14. Çalışmaz durum, 8500 devir/dak ve 12500 devir/dak iş mili hızları için hesaplanan kararlılık diyagramları ve tırlama testi sonuçları.

Şekil 14'te görüleceği üzere, esnek takım modunun baskın olduğu tezgâhlarda sistem dinamiği, kesme şartlarından etkilenmemekte ve çalışmaz durumdaki takım uç nokta FTF'lerinin kullanımı hatalı sonuçlar vermemektedir. Ayrıca geliştirilen model kullanılarak elde edilen kararlılık diyagramları kesme işleminin kararlılığını oldukça doğru bir şekilde belirleyebilmektedir. Dolayısı ile geliştirilen model kullanılarak deneylere olan bağımlılık ortadan kaldırılmaktadır.

5. SONUÇ

Yüksek hızda yapılan metal kesme işlemlerinde kesme koşulları nedeniyle tezgâh dinamiğinde değişimler olmakta ve bu değişimler işlemin kararlılık diyagramlarında önemli sapmalara neden olmaktadır. Bu bildiri de sunulan yöntem yüksek hızda tezgâh dinamiğinde ve kararlılık diyagramlarında meydana gelen değişimlerin doğru bir şekilde belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Geliştirilen yöntem dahilinde rulman dinamiğinin iş mili hızına ve kesme kuvvetlerine bağlı olarak değişimi deneysel olarak belirlenmiştir ve elde edilen değerler farklı takım tutucu-takım kombinasyonlarının modellenmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen yöntem ile rulman dinamiği tezgâhın çalışır durumu için ilk defa belirlenmiştir ve bu açıdan literatürde bir ilk olma özelliği taşımaktadır. Ayrıca geliştirilen yöntemin önemli bir özelliği karmaşık deney düzeneklerine ve pahalı ölçüm cihazlarına olan bağımlılığı ortadan kaldırmasıdır.

Son olarak yapılan tırlama testleri geliştirilen yöntem vasıtası ile tezgâh dinamiğinde ve kararlılık diyagramlarında meydana gelecek değişimlerin başarıyla belirlenebileceğini göstermiştir. Bu yönüyle, yapılan çalışma yüksek hızda tezgâh dinamiğinde meydana gelen değişimleri tahmin edilebilir kılması nedeniyle de literatürde bir ilk olma özelliği taşımaktadır.

REFERANSLAR

- [1] Altintas Y., Budak E., 1995, "Analytical prediction of stability lobes in milling", Annals of the CIRP, Volume 44, Pages 357-362.
- [2] Budak E., Altintas Y., 1998, "Analytical prediction of chatter stability in milling – part I: general formulation; part II: application to common milling systems", Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Volume 120, Pages 22-36.

- [3] Insperger T., Stepan G., 2002, "Semi-discretization method for delayed systems", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Volume 55, Pages 503–518.
- [4] Stone B. J., 1982, "The state of the art in the measurement of the stiffness and damping of rolling element bearings", *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Volume 31, Pages 529-538.
- [5] Harris T. A., 2001, "Rolling Bearing Analysis", 4th ed., John Wiley and Sons, New York
- [6] Rivin E., 1999, "Stiffness and Damping in Mechanical Design", Marcel Dekker Inc
- [7] Ertürk A., Özgüven H.N., Budak E., 2007, "Effect analysis of bearing and interface dynamics on tool point FRF for chatter stability in machine tools by using a new analytical model for spindle–tool assemblies", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Pages 23-32.
- [8] Altintas Y., Cao Y., 2005, "Virtual design and optimization of machine tool spindles", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Volume 54, Pages 379-382.
- [9] Cao Y., Altintas Y., 2007, "Modeling of spindle-bearing and machine tool systems for virtual simulation of milling operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Pages 1342-1350.
- [10] Li H., Shin Y. C., 2004, "Analysis of bearing configuration effects on high speed spindles using an integrated dynamic thermo-mechanical spindle model", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 44, Pages 347-364.
- [11] Lin C. W., Tu J. F., Kamman J., 2003, "An integrated thermo-mechanical-dynamic model to characterize motorized machine tool spindles during very high speed rotation", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 43, Pages 1035-1050.
- [12] Tatar K., Gren P., 2007, "Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Pages 380-387.
- [13] Rantatalo M., Aidanpaa J.O., Göransson B., Norman P., 2007, "Milling machine spindle analysis using FEM and non-contact spindle excitation and response measurement", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Pages 1034-1045.
- [14] Zaghbani I., Songmene V., 2009, "Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation through operational modal analysis", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 49, Pages 947-957.
- [15] Özşahin O., Budak E., Özgüven H.N., 2015, "In-Process Tool Point FRF Identification under Operational Conditions Using Inverse Stability Solution", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 89, Pages 64-73.
- [16] Ewins D.J., 2000, "Modal testing: Theory, practice and application", Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, England,
- [17] Özşahin O., Özgüven H.N., Budak E., 2014, "Analytical modeling of asymmetric multi-segment rotor – bearing systems with Timoshenko beam model including gyroscopic moments", *Computers & Structures*, Volume 144, Pages 119-126.
- [18] Özgüven H.N., 1990, "Structural modifications using frequency response functions" *Mechanical Systems and Signal Processing* Volume 4, Pages 53-63.

CETP KOMPOZİTLERİN DELİNMELEİNDEKİ İTME KUVVETİNİN ANFİS İLE MODELLENMESİ

Murat Koyunbakan^a, Ali Ünüvar^b, Okan Demir^b,

*a, Dumlupınar Üniversitesi, Simav Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, Simav/Kütahya/TÜRKİYE,
murat.koyunbakan@dpu.edu.tr*

*b, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Konya/TÜRKİYE,
aunuvar@selcuk.edu.tr, okandemir@selcuk.edu.tr*

Özet

Cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozit malzemeler metalik malzemelere göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve bu nedenle işlenebilirlik özellikleri metalik malzemelerden farklıdır. Çünkü çok sayıda farklı değişken tarafından etkilenmektedir. Günümüzde karmaşık sistemlerin modellenmelerinde bulanık mantık arayüz sistemleri etkin bir teknik olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, CETP kompozit malzemelerin delinmeleri esnasında meydana gelen itme kuvvetlerinin tahmin edilmesi için matkap geometrisi ve kesme parametrelerine dayalı bir adaptif ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi (ANFİS) modeli sunulmuştur. Sonuçlar ANFİS modelleme tekniğinin CETP kompozitlerin delinmelerinde meydana gelen itme kuvvetlerinin tahmin edilmesinde etkin bir yöntem olabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: CETP kompozit, ANFİS, işlenebilirlik, itme kuvveti.

ANFİS MODELING OF THRUST FORCE DURING DRILLING OF GFRP COMPOSITES

Abstract

The machinability of fiber reinforced polymers (FRPs) is a complicated process rather than metallic materials since numerous process parameters affect the process due to anisotropic nature of the composite. The major drawback is the drilling-induced damage, which mainly occurs due to the direct interaction between the tool and composite laminate. Recently, fuzzy logic interface systems are used to model complicated systems. Here, an adaptive network-based fuzzy inference system (ANFİS) model was performed to estimate thrust forces generated during drilling of the fabricated FRPs based on drill geometry and cutting parameters. The results indicate the purposed ANFİS model is an effective method to predict thrust forces during drilling of FRPs

Keywords: GFRP composite, ANFS, machinability, thrust force.

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme uygulamaları mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bunun sebebi olarak kompozit malzemelerin iyi derecede mukavemete, sertliğe ve yorulma sınırına sahip olmaları gösterilmektedir. Ayrıca hafif oluşları ve işleme, kalıplama teknikleri kullanılarak son şekline yakın olarak üretilmeleri kompozit malzemelerin en önemli özelliklerinden bazılarıdır [1]. Kompozit malzemelerin potansiyelleri ilk olarak havacılık ve savunma endüstrileri tarafından değerlendirilmiştir. Son yıllarda ise kompozit malzemeler otomotiv, deniz, spor, inşaat gibi farklı endüstriler arasında da yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle fiber takviyeli kompozit levhalar sahip oldukları üstün özellikleri ile malzemelerin en ilginç ve ilgi çekici gruplarından biri haline gelmiştir [2]. Boeing ve Airbus uçaklarının yeni modellerinde kompozit levhaların yaygın kullanımı örnek olarak görülebilir [2.] Boeing 767'nin dış yüzeyinin yaklaşık %30'u kompozit levhalardan oluşmaktadır [3]. Kompozit malzemeler son şekline yakın üretilse de montajları için gerekli toleranslara getirilmelerinde talaşlı imalatta sıklıkla kullanılmaktadır. Bu işleme operasyonlarından en önemlisi farklı parçaların montajı için delme işlemi olarak görülmektedir [4].

Kompozitlerin işlenebilirliği günümüzde halen zorluklar içermektedir. Kompozit malzemelerin anizotropik yapılarından dolayı işleme esnasında bir takım problemler ortaya çıkmaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemeler yumuşak matris ve sert fiberlerden meydana gelmektedir. Kompozit malzemelerin işlenmesinde kesme prosesinin anlaşılması büyük öneme sahiptir [5]. Cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmeleri esnasında, itme kuvvetinin düşük, delik yüzey kalitesinin iyi ve deformasyonun az olması için işleme parametrelerinin uygun olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Delme işleminin yüksek kalitede yapılabilmesi için işleme parametrelerinin uygun değerlerinin elde edilmesi önemli bir kriterdir [6-13]. İşleme parametrelerinin yanlış seçimi oldukça pahalı olan bu malzemelerin hurdaya ayrılmasına sebebiyet vermektedir. Khashaba [14], havacılık endüstrisinde delme işlemi uygulanan tabakalı polimer kompozitlerin yaklaşık %60'ının kalite açısından yetersiz bulunarak hurdaya ayrıldığını vurgulamaktadır.

Tabakalı kompozitlerin delinmelerinde meydana gelen en önemli problemin tabaka ayrılması hasarı olduğu ve bunun asıl nedeninin de itme kuvveti olduğu belirlenmiştir. Tabaka ayrılması hasarı üzerine pek çok araştırmacı tarafından deneysel ve analitik araştırma çalışmaları yapılmıştır [15-17].

Matkap ucunun geometrisindeki değişiklikler delme işlemi karmaşık hale getirir. Matkap ucu açılarındaki değişiklikler delme işlemi esnasında oluşan itme kuvvetinde büyük değişkenliklere sebep olmaktadır. Geleneksel yüksek hız çeliği ve karbür matkaplar polimerik kompozit malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel matkapların polimerik kompozitlerin delinmesinde bazı özel kenar hazırlıkları ile uygulanması konusunda yapılmış çalışmalarda bulunmaktadır. Takım geometrisinin tabaka ayrılması üzerine etkileri araştırıldığında, Piquet ve ark. [18] kesme kenar sayısının artışı ve çalışma parçası ile takım arasındaki temas uzunluğunun azaltılması ile tabaka ayrılması hasarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Enemuoh ve ark. [19] karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesi esnasında takım uç açısının tabaka ayrılması ve delik yüzey kalitesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Takım uç açısı 75° olduğunda itme kuvvetinin azalmasından dolayı tabakalar arası ayrılma hasarının en aza indirildiğini, bununla birlikte delik yüzey pürüzlülüğünün az bir miktar arttığını belirtmiştir. Chen [20] tarafından yapılan çalışmada HSS matkaplarla karbon fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin delinmesinde uç açısının, helis açısının ve uç kenar açısının itme kuvveti ve tork üzerine etkileri incelenmiştir. Araştırmacıya göre, uç açısı arttığında itme kuvveti artarken bununla birlikte tork azalmaktadır. Diğer taraftan, helis açısı ve uç kenar açısı arttığında hem itme kuvveti hem de tork azalmıştır. El Sonbaty ve ark. [21] cam fiber takviyeli tabakalı kompozitlerin delinmesinde geleneksel HSS matkap uçları kullanmış ve matkap çapının artması sonucu itme kuvvetinin arttığını belirtmiştir. Mathew ve ark. [22], cam fiber takviyeli kompozitlerin delinmesinde oyma takımının, geleneksel matkap ucu kullanımıyla karşılaştırıldığında itme kuvvetinin yaklaşık %50 oranında düştüğünü rapor etmiştir. Davim ve ark. [23], cam fiber takviyeli kompozitlerin işlenmesinde farklı geometriler ile iki sementit tungsten karbür matkabın tutumlarını çalışmışlardır. Sonuç olarak ilerleme ile itme kuvvetinin arttığını bununla birlikte en düşük değerlerin Brad&Spur matkapla elde ettiklerini belirtmişlerdir. Lin ve Chen [24], karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesinde helisel karbür matkabın çok kesme kenarlı karbür matkaplara göre daha az itme kuvveti ve tork sağladığını bulmuşlardır.

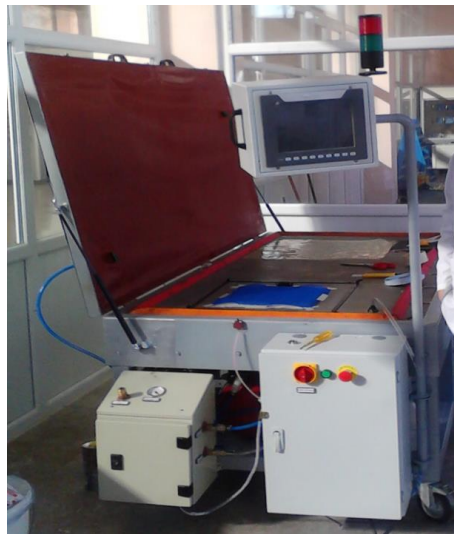
Talaşlı imalat üzerine yapılan çalışmalarda sistemin modellenmesi ile ilgili pek çok araştırma yapıldığı görülmektedir. Asiltürk [25], AISI 1040 çeliğinin CNC tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün tahmini için titreşime dayalı bir ANFIS modelinin oluşturulmasını sunmuştur. Modelin giriş parametreleri burun radyüsü, kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve titreşimdir. %97,52 doğrulukla model yüzey pürüzlülüğünü tahmin edebilmektedir. Cus ve ark. [26] tornalama proseslerindeki işleme parametrelerinin en uygun olanının belirlenmesi için arı kolonisi algoritmasına bağlı olarak bir çoklu nesne optimizasyon tekniği sunmuşlardır. Jerrah ve ark. [27] tek yönlü cam elyaf epoksi kompozit tabakalarının yorulma ömürlerinin tahmini için ağ tabanlı bulanık sistemin kullanıldığı bir model geliştirmişlerdir. Langella ve ark. [28] kompozit malzemelerin delinmelerinde meydana gelen itme kuvveti ve torkun tahmin edilmesinde matkap geometrisi ve kesme parametrelerinin etkileri üzerine odaklanan bir mekanik model geliştirmişlerdir. Palanikumar [29] cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin işlenmesinde deformasyon faktörü ve yüzey pürüzlülüğü modeli için cevap yüzey metodolojisini uygulamıştır. Geliştirilen modellerin yaklaşık olarak %95 güvenilirliğe sahip olduğu varyans analizi sonuçları ile gösterilmiştir. Abhishek ark. [30] cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmelerinde meydana gelen itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü açısından kesme hızı, ilerleme, parça kalınlığı ve matkap çapını dikkate alan bir çalışma yapmışlardır. CETP kompozitlerin delinmelerindeki proses davranışları ve performansının anlaşılması için genetik programlama ve ANFIS metotlarını incelemişlerdir.

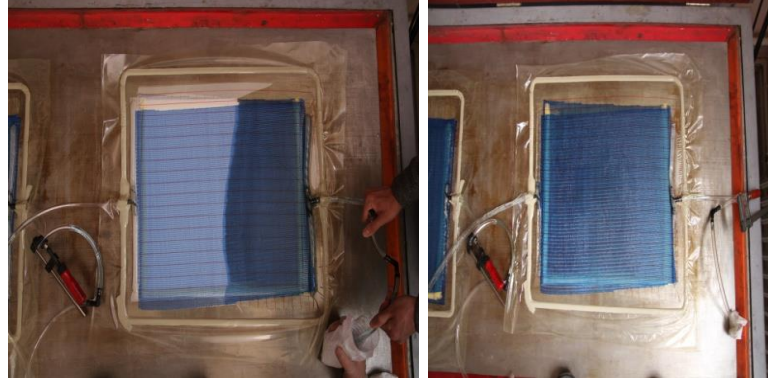
Bu çalışmada cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesinde meydana gelen itme kuvvetinin tahmin edilmesi için ANFIS ile bir model geliştirilmiştir. Modelin giriş parametreleri kesme hızı, ilerleme, matkap çapı ve matkap uç açıdır. Modelin çıktısı ise meydana gelen itme kuvvetidir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Kompozit Malzemelerin Üretilmesi

Deney numuneleri vakumla emdirme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Kompozit levhalar 12 tabaka örgü cam fiber kumaş kullanılarak üretilmiş ve kalınlıkları $2,5 \pm 0,25$ mm'dir. Bu çalışmada tercih edilen epoksi reçine MGS-L285 laminasyon reçinesidir. Örgü cam fiberlerin alana bağlı yoğunlukları 200 gr/m^2 'dir. Her bir lif 3000 adet fiberden meydana gelmiş olup tek bir fiber $7,5 \mu\text{m}$ 'dir. Malzeme üretimi ve kullanılan yöntem Şekil 1'de verilmiştir. Üretilen kompozit levhaların çekme deneyleri ASTM D 3039 standardı çerçevesinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen çekme dayanımı ve elastikiyet modülü değerleri Tablo 1'de verilmiştir.





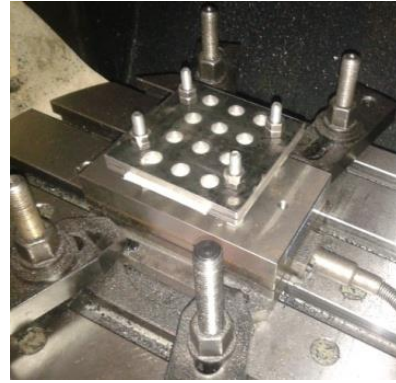
Şekil 1. Vakumla emdirme ünitesi ve malzeme üretimi

Tablo 1. Deney numunelerinin çekme deneyleri sonucunda elde edilen dayanım ve elastikiyet modülü değerleri.

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)
Cam Fiber/Epoksi	420	8

2.2. Delme Deneyleri

Deneyler Selçuk Üniversitesi İSOMER CNC laboratuvarında bulunan Mazak Variaxis 500 CNC işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Taegutech Türkiye firması tarafından üretilen iki kesme kenarlı HSS matkap uçları tercih edilmiştir. Deney numuneleri, üzerinde on iki adet delik bulunan iki adet çelik levha arasına alınmış ve bu düzenek dinamometre üzerine bağlanmıştır. Delme esnasında meydana gelen itme kuvvetlerinin ölçülmesi için KISTLER marka 9257B model dinamometre kullanılmıştır. Deney düzeneği ve kullanılan matkaplara ait görüntüler sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Deneyler farklı kesme hızı, ilerleme, matkap çapı ve matkap uç açısı değerleri ile kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Uygulanan kesme parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 2. CNC işleme merkezi ve deney düzeneği



Şekil 3. Kullanılan matkap uçları

Tablo 2. Deney parametreleri ve değerleri

Deney Parametreleri	Değerleri				
Kesme Hızı (m/dak)	37	50	67	90	121
İlerleme Oranı (mm/dev)	0,005	0,05	0,1	0,2	0,4
Matkap Çapı (mm)	4,7	6	7,8	10	12,9
Matkap Uç Açısı (derece)	84,5	100	118	140	164,5

İkinci derece matematiksel model oluşturulabilmesi için deneysel tasarım Tablo 3'te verilmiştir. Her bir matkap çapı için aynı deneysel plan uygulanmıştır. Toplam 75 deney gerçekleştirilmiş ve elde edilen itme kuvveti sonuçları sistemin modellenmesinde kullanılmıştır.

Tablo 3. Deneysel tasarım

Deney No	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev)	Uç Açısı (derece)
1	50	0,05	100
2	90	0,05	100
3	50	0,2	100
4	90	0,2	100
5	50	0,05	140
6	90	0,05	140
7	50	0,2	140
8	90	0,2	140
9	37	0,1	118
10	121	0,1	118
11	67	0,005	118
12	67	0,4	118
13	67	0,1	84,5
14	67	0,1	164,5
15	67	0,1	118

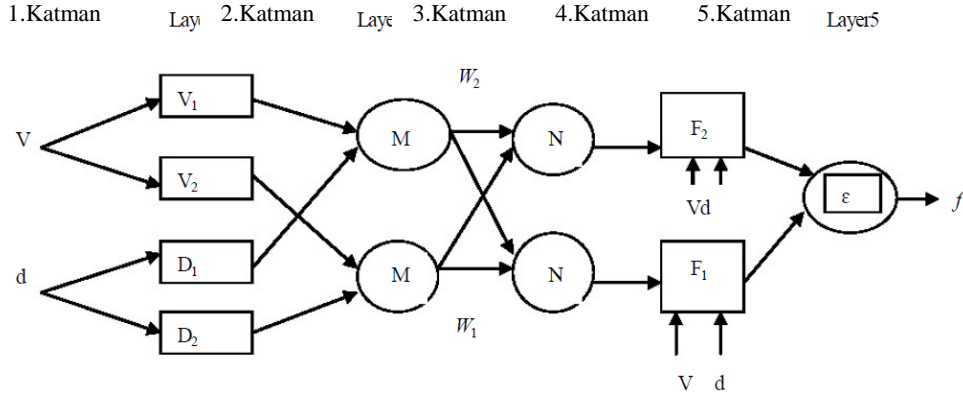
3. İTME KUVVETİNİN ANFİS İLE MODELLENMESİ

3.1. ANFİS'in Yapısı

Bulanık mantık sahası, endüstriyel proseslerin kontrolünde ve modellenmesinde pratik başarı ile büyük adımlar atılmasını teşvik etmektedir [31]. Bulanık sistemler modelleme araçları olarak kullanılabilmekte ve gerçek deneysel veri setlerine bağlı olarak yaklaşık sonuçları sağlamaktadırlar [25].

Adaptif ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi, yapay sinir ağlarının öğrenme yeteneği ve bulanık mantığın insan gibi karar verme ve uzman bilgisi sağlama kolaylığı gibi üstünlüklerinin birleştirilmesi fikrine dayanmaktadır. ANFİS, 1993 yılında Jang tarafından ortaya atılmıştır ve Jang'ın ANFİS modeli olarak adlandırılmaktadır. Jang'ın ANFİS modeli, insan gibi karar verme ve uzman bilgisi sağlama yeteneğini uygulamada "Sugeno Bulanık Mantık Çıkarım Sistemini" temel alırken, yapay sinir ağlarının öğrenme yeteneğini uygulamada ise "Geri Yayılmalı Öğrenme Algoritmasını (Backpropagation Learning Algorithm)" kullanmaktadır [32].

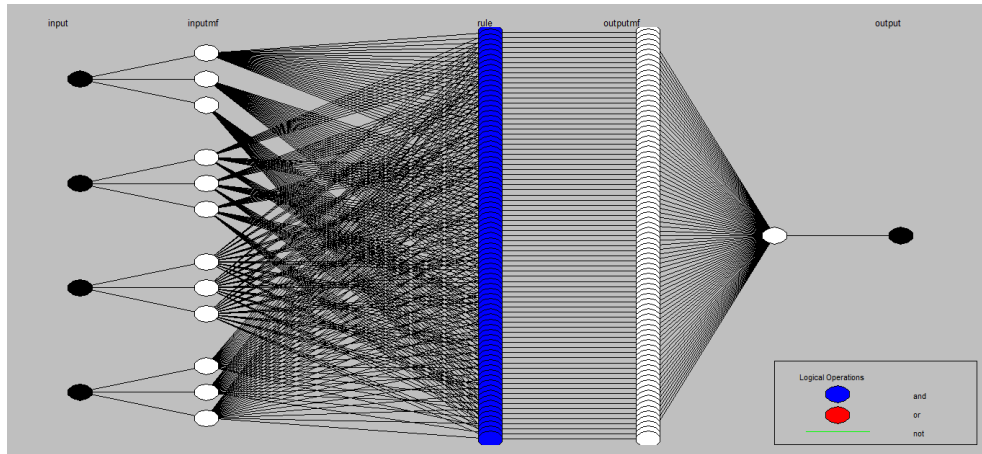
Bir uyarlamalı ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi (ANFIS), en uygun üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde giriş ve çıkış verisi arasındaki içsel ilişkileri veren bir ileri besleme tipidir. ANFIS'in yapısında bulanık mantık modeli ve yapay sinir ağı modelini birlikte kullanılmakta ve beş farklı katmandan oluşmakta ve her bir katman pek çok düğümlerden meydana gelmektedir. Giriş ve çıkış katmanlarındaki düğümlerin birbirleri arasında içsel ilişkiler bulunmaktadır. Şekil 4'te ANFIS yapısı gösterilmektedir. Burada V ve d farklı giriş faktörlerini, V_1, V_2, D_1, D_2 her biri için iki üyelik fonksiyonunu ve f bir çıkış fonksiyonunu göstermektedir. 1. Katman bulanıklaştırma, 2. Katman ürün, 3. Katman normalizasyon, 4. Katman durulaştırma ve 5. Katman sonuç şeklinde olmak üzere ANFIS yapısı beş farklı katmandan meydana gelmektedir.



Şekil 4. ANFIS yapısı [33].

3.1. Bulanık Sonuç Çıkarım Sistemi

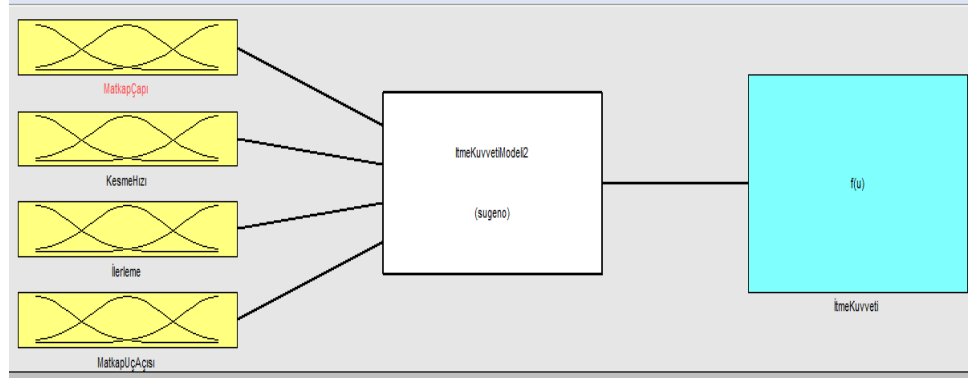
Bulanık mantık kontrolcileri/modelleyicilerinin asıl görünümü, eğer/sonra (if/then) kuralları şeklinde kontrol stratejisinden oluşmasıdır. Modelleme sisteminin ilk adımı bulanık mantık kontrolcünün giriş ve çıkış parametrelerinin tanımlanmasıdır. Sugeno tipi bulanık sonuç çıkarım sistemi çıkış fonksiyonunun doğrusal ya da sabit olduğu bir sistem modelini kullanmaktadır. Bulanık sonuç çıkarma sistemi çok girişli ve tek çıkışlı sistem için tasarlanmıştır. Bu çalışmada dört giriş ve tek çıkış verisi olacak şekilde modelleme yapılmıştır. Giriş faktörleri ve çıkış yanıtının ANFIS yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Giriş faktörleri ve çıkış yanıtı için ANFIS yapısı

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada uygulanan ANFIS modelinin temel yapısı Şekil 6’te gösterilmiştir. Deneme yanılma metodu yoluyla farklı üyelik fonksiyonları test edilmiş ve RMSE (ortalama hata kareleri karekökü) değerinin en düşük olduğu sonuç Gaussian üyelik fonksiyonu ile elde edilmiştir. Tablo 4’te farklı çevrim sayıları ve farklı üyelik fonksiyonları için elde edilen RMSE değerleri verilmiştir.



Şekil 6. Bu çalışma için ANFIS sonuç çıkarma sisteminin temel yapısı

Tablo 4. Farklı üyelik fonksiyonları ve çevrim için RMSE değerleri.

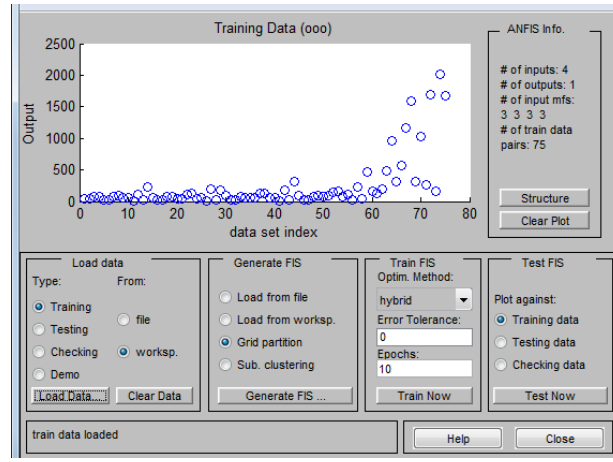
Eğitim Hatası	Tri MF	Trap MF	Gbell MF	<i>Gauss MF</i>
3 Çevrim	0,0428744	3,76711	0,0133183	0,0161952
5 Çevrim	0,0407736	3,58124	0,00844	0,00782
10 Çevrim	0,034863	3,10788	0,00426881	0,00366663

ANFIS modelinin oluşturulmasında 4 giriş değişkeni ve tek bir çıkış değişkeni kullanılmıştır. Giriş değişkenleri daha önceki bölümlerde de belirtilen faktörler olup çıkış değişkeni ise itme kuvveti değeridir. ANFIS araç kutusu kullanılarak modelleme yapılmıştır. Deneysel plana uygun olarak gerçekleştirilen 75 deney, modelin eğitiminde kullanılmıştır. Modelin eğitiminde kullanılan deneysel veri parametreleri Tablo 5’te verilmiştir.

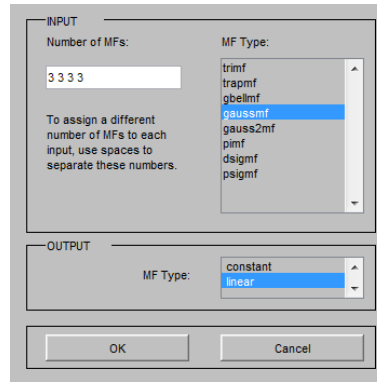
Tablo 5. Deneysel veri parametreleri

Tipi	Sugeno
Girişler/Çıkışlar	4/1
Giriş üyelik fonksiyonlarının sayısı	3
Çıkış üyelik fonksiyonlarının sayısı	81
Giriş üyelik fonksiyon tipi	gaussmf
Çıkış üyelik fonksiyon tipi	gaussmf
Bulanık kuralların sayısı	81
Çevrim sayısı	10

Deneysel tasarımdan elde edilen değişkenler ve itme kuvveti sonuçları ANFIS editörüne alındığında verilerin dağılımı Şekil 7’de verildiği gibidir. Bulanık sonuç çıkarım sistemini oluşturulması Şekil 8’de gösterilmiştir.

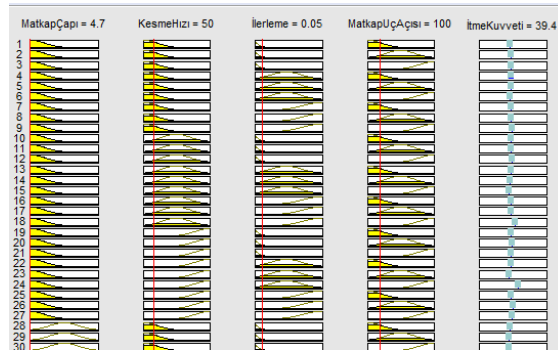


Şekil 7. Deneysel verilerin ANFIS editörüne yüklenmesi

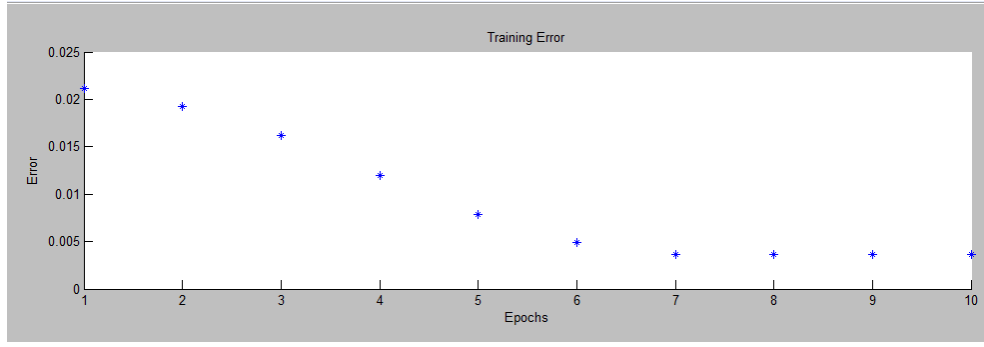


Şekil 8. Bulanık sonuç çıkarım sisteminin oluşturulması

ANFIS editörü kullanılarak giriş ve çıkış değişkenlerine ait 81 adet kural oluşturulmuştur. Oluşturulan kurallar Şekil 9'de gösterilmektedir. Deneme yanılma yoluyla farklı üyelik fonksiyonları denenmiş ve en düşük 0,00366663 RMSE değerine gaussmf üyelik fonksiyonu ile 10 çevrimde ulaşılmıştır. Eğitimde en iyileme tekniği olarak melez yaklaşım tercih edilmiştir. Şekil 10'da 10 çevrim sonucu ulaşılan görüntü verilmiştir.



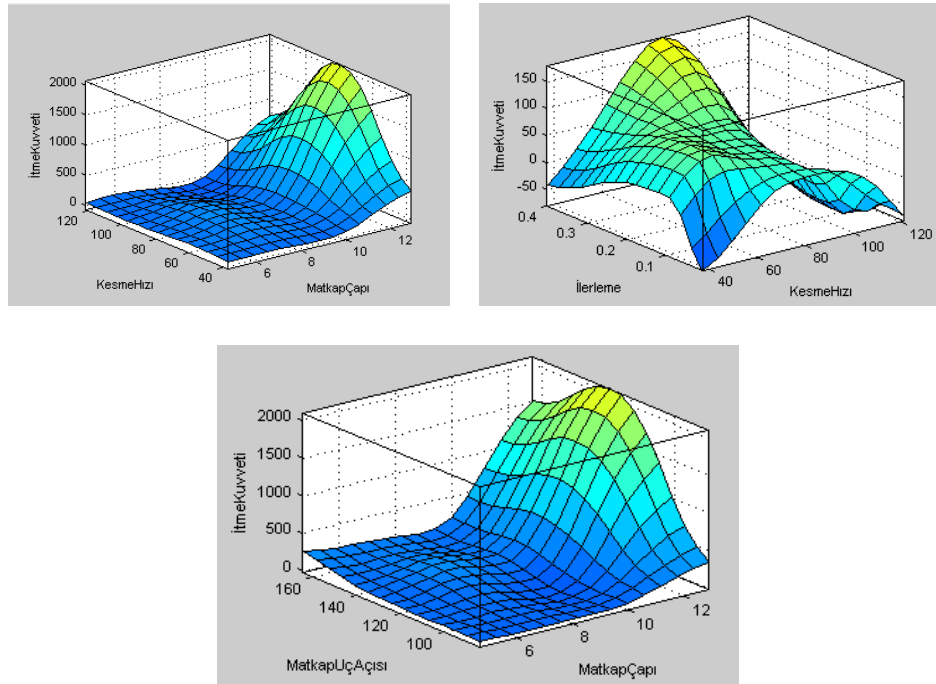
Şekil 9. ANFIS'de oluşturulan kurallar



Şekil 10. 10 çevrimde eğitimin yapılması

Elde edilen RMSE değerinin çok düşük olması eğitimin oldukça başarılı olduğunu ve ANFIS modelinin CETP kompozitlerin delinmelerinde meydana gelen itme kuvvetlerinin tahmin edilmesinde uygun olduğunu göstermektedir.

Şekil 11 farklı giriş parametrelerine göre itme kuvvetinin 3 boyutlu yüzey grafiklerini göstermektedir.



Şekil 11. Giriş parametrelerinin itme kuvveti üzerine olan etkileri

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Cam Elyaf Takviyeli Polimer (CETP) kompozit malzemelerin delinmelerinde meydana gelen itme kuvvetinin tahmininde kullanılması için bir ANFIS modeli yapılmıştır. İtme kuvveti üzerinde matkap geometrisinin oldukça önemli olduğu görülmüş, matkap çapı ve uç açısının artmasının itme kuvvetini arttırdığı, matkap geometrisine ilave olarak ilerlemenin de itme kuvveti üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Deneme yanılma yoluyla farklı üyelik fonksiyonları farklı çevrim sayılarında denenerek oldukça düşük eğitim hatası elde edilmiştir. En iyi sonuç için üyelik fonksiyonu olarak gaussmf seçilmiştir. Üyelik fonksiyonu tipi ise doğrusal olarak ayarlanmıştır. 10 çevrim ile yapılan eğitim sonucunda 0,00366663 gibi çok küçük eğitim hatasına ulaşılmıştır. Bundan dolayı ANFIS geleneksel modelleme teknikleri ile karşılaştırıldığında oldukça iyi bir modelleme aracı olarak kullanılabilir.

Literatürde benzer bir modelleme Prakash ve ark. tarafından (2014) yapılmıştır. MDF malzemelerin delinmeleri esnasında oluşan deformasyon üzerine yapılan modellemede en uygun üyelik fonksiyonunun Gbell MF ve RMSE değeri olarak $1.295e-6$ olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada yapılan, CETP kompozitlerin delinmeleri esnasında meydana gelen itme kuvvetleri için geliştirilen ANFIS modelinin literatüre uygun olduğu görülmüştür.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesindeki katkılarından dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK), Selçuk Üniversitesi İmalat Sistemleri Otomasyonu ve Bilgisayar Destekli Tasarım Üretim Araştırma ve Uygulama Merkezi (İSOMER)'e ve Selçuk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

- [1] Nagarajan V.A., Sundaram S., Thyagarajan K., Rajadurai J.S. ve Rajan T.P.D., 2011, “Measuring Delamination Severity of Glass Fiber-Reinforced Epoxy Composites During Drilling Process”, *Experimental Techniques*, 37, 66-73.
- [2] Isbilir O. Ve Ghassemieh E., 2013, “Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites” *Composite Structures*, 105, 126-133.
- [3] Shyha I, Soo SL, Aspinwall D, Bradley S., 2010, “Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites”, *J Mater Proc Technol*, 210(8), 1023–34.
- [4] Ravishankar SR, Murthy CRL., 1996, “Ultrasonic imaging for evaluation of drill induced delaminations in composite laminates”, In: 14th Conference on, nondestructive testing; p. 8–13.
- [5] Lubin G., 1982, *Hand Book of Composites*, Van Nostrand Reinhold.
- [6] Deng J.L., 1989, Introduction to grey system, *Journal of Grey System* 1 1–24.
- [7] Singh P. N., Raghukandan K., Pai P.C., 2004, “Optimization by grey relational analysis of edm parameters on machining al-10% Sicp composites”, *Journal of Materials Processing Technology* 155–156 1658–1661.
- [8] Tosun N., 2006, “Determination of optimum parameters for multiperformance characteristics in drilling by using grey relational analysis”, *The International Journal of Advanced Manufacturing* 28 450–455.
- [9] Huang J.T., Lin J.L., 2008, “Optimization of machining parameters setting of die-sinking EDM process based on the Grey relational analysis with L18 orthogonal array”, *Journal of Technology* 17 659–664.
- [10] Fung C.P., 2003, “Manufacturing process optimization for wear property of fiber-reinforced polbutylene terephthalate composites with grey relation analysis”, *Wear*, 254 298–306.
- [11] Yang Y.Y., Shie J.R., Huang C.H., 2006, “Optimization of dry machining parameters for high purity graphite in end-milling process”, *Materials and Manufacturing Processes*, 21 832–837.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [12] Chiang K.T., Chang F.P., 2006, "Optimization of WEDM process of particle reinforced material with multiply performance characteristics using grey relational analysis", *Journal of Materials Processing Technology* 180 96–101.
- [13] Tzeng C.-J., Lin Y.-H., Yang Y.-K., Jeng M.-C., 2009, "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis", *Journal of Materials Processing Technology* 209 2753–2759.
- [14] Khashaba UA., 2004, "Delamination in drilling GFR-thermoset composites". *Compos Struct* 63(3–4):313–27.
- [15] Hocheng H., Tsao C.C., 2003, "Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits", *Journal of Materials Processing Technology* 140 335–339.
- [16] Davim J. P., Reis P., Conceicao A.C., 2004, "Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382–05)", *Journal of Materials Processing Technology* 155–156 1828–1833.
- [17] Davim J. P., Reis P., Conceicao A.C., 2004, "Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up", *Composites Science and Technology*, 64 289–297.
- [18] Piquet R, Ferret F, Lachaud F, Swider P., 2000, Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills. *Compos Part A: Appl Sci Manufact* 31(10):1107–15.
- [19] Enemuoh EU, El-Gizawy AS, Okafor AC., 2001, "An approach for development of damage-free drilling of carbon fibre reinforced thermosets" *Int J Mach Tools Manufact* 41(12):1795–814.
- [20] Chen W., 1997, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates", *Int J Mach Tools Manufact* 37(8):1097–108.
- [21] El-Sonbaty I, Khashaba UA, Machaly T., 2004, "Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites", *Compos Struct* 63(3–4):329–38.
- [22] Mathew J, Ramakrishnan N, Naik NK., 1999, "Investigations into the effect of geometry of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites", *J Mater Process Technol* 91(1):1–11.
- [23] Davim JP, Reis P, Anto'nio CC., 2004, "Experimental study of drilling glass fibre reinforced plastics (GFRP), manufactured by hand lay-up", *Compos Sci Technol* 64(2):289–97.
- [24] Lin SC, Chen IK., 1996, "Drilling carbon fibre-reinforced composite material at high speed", *Wear* 194(1–2):156–62.
- [25] Asilturk, I., 2011, "On-line surface roughness recognition system by vibration monitoring in CNC turning using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)", *International Journal of the Physical Sciences*, 6(22), 5353-5360.
- [26] Cus F., Balic J., Zuperl U., 2009. "Hybrid ANFIS-Ants System based Optimisation of Turning Parameters", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 36, 79-86.
- [27] Jarrah M.A., Al-assaf Y., El kadi H., 2002. "Neuro-Fuzzy Modeling of Fatigue Life Prediction of Unidirectional Glass Fiber/Epoxy Composite Laminates", *Journal of Composite Materials* 36, 685-700.
- [28] Langella, Nele L., Maio A., 2005, "A Torque and Thrust Prediction Model for Drilling of Composite Materials", *Composites: Part A* 36, 83–93.

- [29] Palanikumar K., 2010, “Modeling and Analysis of Delamination Factor and Surface Roughness in Drilling GFRP Composites”, *Mater. Manuf. Proc.*, 25(10): 1059-1067.
- [30] Abhishek K., Panda B.N., Datta S. ve Mahapatra S.S, 2014, “Comparing Predictability of Genetic Programming and ANFIS on Drilling Performance Modeling for GFRP Composites”, *Procedia Materials Science*, 6, 544 – 550
- [31] Tinkir M, Önen U, Kalyoncu M., 2010, “Modeling of Neuro-Fuzzy Control of A Flexible Link, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*”, Part I. *J. Syst. Cont. Eng.*, 224(5): 529-543.
- [32] Şentürk S., 2010, “Faktöriyel Tasarıma Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi İle Farklı Bir Yaklaşım” *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 57-74.
- [33] Prakash S., Mercy J.L., Teja P.V.S. ve Vijayalakshmi P., 2014, “ANFIS modeling of delamination during drilling of Medium Density Fiber (MDF) board”, *Procedia Engineering*, 97, 258-266.

ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ

304 VE 430 PASLANMAZ ÇELİKLERİN KİMYASAL İŞLENMESİ

Orhan Çakır^a, Uğur Emiroğlu^a

^a Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul/TÜRKİYE,
orhanc@yildiz.edu.tr, emiroglu@yildiz.edu.tr

Özet

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden önemli bir tanesi olan kimyasal işleme, malzemelerin kontrollü korozyon bir ortamda şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Yöntem farklı endüstriler için hassas parçaların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, iki farklı paslanmaz çelik (304 ve 430) FeCl₃ kimyasal aşındırıcısı ile kimyasal olarak işlenmiştir. Deneysel çalışma için iki farklı sıcaklıkta üç farklı derişik değeri seçilmiştir. İşleme derinliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri deneysel çıktı olarak alınmıştır. 304 paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesi, işleme derinliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri dikkate alındığında 430 paslanmaz çeliğe göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kimyasal işleme, paslanmaz çelik, kimyasal aşındırıcı, işleme derinliği, yüzey pürüzlülüğü

CHEMICAL MACHINING OF 304 AND 430 STAINLESS STEELS

Abstract

Chemical machining, which is one of the major nontraditional machining processes, is applied to shape materials in controlled corrosion environment. The process is extensively used in production of precision parts for different industries. In this study, two different stainless steel materials (304 and 430) were chemically machined by FeCl₃ chemical etchant. Three different etchant concentrations at two different temperatures were selected for experimental study. The depth of etch and surface roughness parameters were taken as experimental outputs. It was observed that the chemical machining of 304 stainless steel is better than 430 stainless steel considering depth of etch and surface roughness values.

Keywords: Chemical machining, Stainless steel, Chemical etchant, Depth of etch, Surface roughness

1. GİRİŞ

Geleneksel olmayan imalat yöntemleri, imalat teknolojileri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bu yöntemler gittikçe önem kazanmakta ve özellikle hassas, karmaşık geometrilere sahip parçaların tekli veya çoklu işlenmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden bir tanesi olan kimyasal işleme yöntemi; işlenecek malzemeye göre seçilen kimyasal çözelti içerisinde, malzemenin kontrollü bir şekilde korozyona uğratarak şekillendirilmesi olarak tanımlanır. Yöntemin uygulama alanları çok geniştir ve son yıllarda mikro işleme tekniği olarak da geniş bir uygulama alanı bulmuştur. İnce ve karmaşık şekilli parçaların imalatında rahatlıkla kullanılmaktadır. Her türlü malzemenin işlenmesi mümkündür ve malzemelerin mekanik ve kimyasal özellikleri işlemede etken değildir [2-3].

Kimyasal işleme yönteminin geçmişi çok eskidir ve Eski Mısır'da mücevher imalatında kullanıldığı bilinmektedir [4]. Bu açıdan, kimyasal işleme yöntemi, geleneksel olmayan imalat yöntemleri içerisinde en eski imalat yöntemi olarak belirtilebilir. Tarihsel gelişimi açısından, özellikle elektronik endüstrisinin gelişimine paralel bir konuma sahiptir ve 1900'lü yılların başından itibaren önemli aşamalar kaydetmiştir. Yöntemin genel imalat yöntemi olarak kullanılmasında, 1956 yılında alınan bir patent önemlidir, The North American Aviation Inc. firması tarafından bu patent ile uçak üretiminde alüminyum kanatların şekillendirilmesi ve kanat kalınlıklarının inceltmesi gerçekleştirilmiştir [5]. "Kimyasal frezeleme" olarak tanımlanan bu imalat yönteminin kullanımı, bu tarihten sonra çok daha yaygın olarak görülmektedir.

Kimyasal işleme yönteminin uygulama alanlarının genişliği ve mikro işleme teknolojileri içerisindeki konumu açısından önemli avantajlara sahip olduğunu belirtmek gerekir. Kimyasal işleme yönteminin sunduğu avantajlar ve dezavantajlar Tablo 1.'de detaylı olarak sunulmuştur [2,3,6]. Kimyasal işleme konusunda ülkemizde yapılan çalışmalar sınırlıdır ve bu sınırlı çalışmaların artırılması gereklidir. Ayrıca, yöntemin mikro işleme teknolojisi kapsamında değerlendirilerek yapılacak çalışmalara öncülük etmesi sağlanmalıdır.

Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde genel olarak demir 3 klorür ($FeCl_3$) çözeltisi veya aşındırıcısı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kimyasal aşındırıcı, demir bazlı alaşımların kimyasal olarak işlenmesinde en yaygın kullanılan çözüldür. Kimyasal işlemede etken olan bir diğer faktör, kimyasal işleme yönteminin uygulandığı sıcaklıktır. Bu sıcaklık değerinin seçiminde, kullanılan ekipmanların sağlayabileceği en yüksek işleme sıcaklığının kullanılması önerilmektedir. Bu açıdan yapılan değerlendirme sonucunda, kimyasal işleme sıcaklığı olarak $50^{\circ}C$ olarak tercih edildiği görülmektedir [2,3,7-9].

Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde, malzemenin kimyasal bileşenlerinin korozyon direnci önemli bir faktördür. Bu çalışmada, iki farklı paslanmaz çelik grubundan yaygın olarak kullanılan iki değişik paslanmaz çelik malzemesi seçilmiş ve farklı özelliklerdeki paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde ortaya çıkacak sonuçların değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Östenitik paslanmaz çelik grubu içerisinde önemli bir yer tutan 304 paslanmaz çelik ve ferritik paslanmaz çelik grubu içinde en yaygın kullanılanlardan bir tanesi olan 430 paslanmaz çeliklerin seçimi bu doğrultuda yapılmıştır.

Tablo 1. Kimyasal işleme yönteminin avantaj ve dezavantajları [2,3,6]

Kimyasal İşleme Yönteminin Avantajları
1. Mikro işleme teknolojisi olarak önemli bir yere sahiptir.
2. Malzemenin mekanik özellikleri yöntem üzerinde etkili değildir.
3. Yaklaşık olarak tüm mühendislik malzemelerinin işlenmesi mümkündür.
4. Karmaşık geometrilere sahip parçaların imalatı mümkündür.
5. Malzemenin işlenmesi dinamik etkilerden uzaktır.
6. Çok ince parçaların işlenmesi mümkündür.
7. Çok dar toleranslarda parça işlenmesi mümkündür.
8. Çapak oluşumu söz konusu değildir.

9. Takım ve bakım maliyetleri düşüktür.
10. Düşük maliyette parça imalatı mümkündür.

Kimyasal İşleme Yönteminin Dezavantajları

1. İşlenen parçalarda keskin köşelerin elde edilmesi zordur veya tasarım açısından farklı uygulamalara ihtiyaç duyulur.
2. Çok kalın parçaların işlenmesi zordur veya mümkün değildir.
3. İşlenen parçalarda yüzey kalitesi, işlenen malzemeye bağlı olarak değişmektedir.
4. Kullanılan kimyasal aşındırıcılar çevreye ve çalışanlara zarar verebilir.
5. İşleme maliyeti, iş parçası hassasiyeti ile birlikte artar.
6. İş parçasının boyutları, kullanılan tezgahlarla sınırlıdır.

Bu çalışmada 304 ve 430 paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesi, seçilen $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısının üç farklı derişik değerinde ($28^\circ B\acute{e}$, $32^\circ B\acute{e}$ ve $36^\circ B\acute{e}$) ve iki farklı kimyasal işleme sıcaklığında ($30^\circ C$ ve $50^\circ C$) gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada işlenen parçanın kalınlık değerinin işlenmesi veya işleme kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri araştırılmıştır.

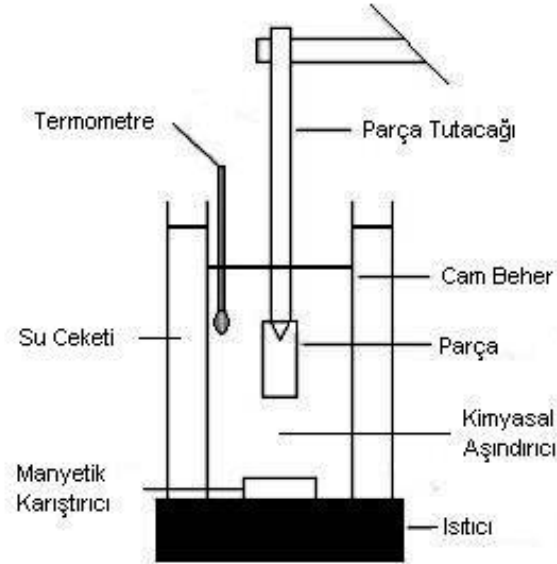
Deneysel Çalışma

Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesi, seçilen iki farklı paslanmaz çelik (304 ve 430) $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Seçilen malzemelere ait kimyasal içerikler Tablo 2’de verilmiştir. Deneysel çalışmanın başlangıcında, parçaların üzerindeki kir, pas ve diğer olumsuz etkilerden temizlenmesi amacıyla, %1 HCl çözeltisi kullanılarak, $40^\circ C$ sıcaklıkta ve 30 dakika temizleme süresinde ultrasonik temizleme işlemi uygulanmıştır.

Tablo 2. 304 ve 430 paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşenleri

304 paslanmaz çeliğin kimyasal içeriği (değerler maksimum % olarak verilmiştir)							
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N
0.08	2.00	0.045	0.03	0.75	18-20	8-10.5	0.10
430 paslanmaz çeliğin kimyasal içeriği (değerler maksimum % olarak verilmiştir)							
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	
0.12	1.00	0.040	0.03	1.00	16-18	0.75	

304 ve 430 paslanmaz çeliklerin kimyasal işleme yöntemi ile işlenmesinde daldırma metodu kullanılmış ve ısıtma cihazının sıcaklık kontrolü kimyasal aşındırıcının sıcaklık değerleri $\pm 2^\circ C$ olacak şekilde düzenlenmiştir. Kimyasal işleme yönteminin deneysel uygulaması Şekil 1.’de verilmiştir. Ultrasonik temizleme cihazı kullanılarak temizlenen 4 mm kalınlığında ve 15x 60 mm boyutlarındaki malzeme, cam beher içerisindeki 100 mL kimyasal aşındırıcının içine yerleştirilmiştir. Sıcaklık kaybının en az olması için, su ceketinin oluşturulması amacıyla, cam beher su dolu daha büyük bir cam kavanoz içerisine konulmuştur. Isıtıcının manyetik özelliği yardımıyla, cam beher içerisine yerleştirilen manyetik karıştırıcı yardımıyla kimyasal aşındırıcının homojen bir dağılım göstermesi sağlanmıştır.



Şekil 1. Daldırma yöntemi ile gerçekleştirilen kimyasal işleme yöntemi deneysel düzeneği
Deneysel çalışmada kullanılan $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısının Baumé ve derişik değerleri Tablo 3.'de belirtilmiştir. Seçilen üç farklı derişik veya Baumé değeri, paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde önerilen değerler aralığındadır. Baumé değeri ($^{\circ}Bé$) olarak tanımlanan parametre, kimyasal çözeltinin özgül yoğunluk değeri ile orantılıdır ve bu değerın hesaplanması tabloda gösterilmiştir.

Deneysel çalışmada işlem süresi toplam 30 dakika olarak belirlenmiş ve her 5 dakikada kalınlık ölçümü ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, her parçada üç defa olacak şekilde, üç farklı iş parçasının ölçümü ile gerçekleştirilmiştir. Kalınlık ölçümleri Mitutoyo mikrometresi (ölçüm hassasiyeti ± 0.001 mm) ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Taylor-Hobson Surtronic 3+ cihazı ile yapılmıştır.

Tablo 3. Deneysel çalışmada kullanılan $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısının Baumé, derişik ve özgül yoğunluk değerleri

Baumé ($^{\circ}Bé$)	Derişik değeri (Mol)	Özgül yoğunluk (ρ)
28 $^{\circ}Bé$	1.90	1.240
32 $^{\circ}Bé$	2.33	1.284
36 $^{\circ}Bé$	2.70	1.331
$^{\circ}Bé = 145 [(\rho - 1) / \rho]$		

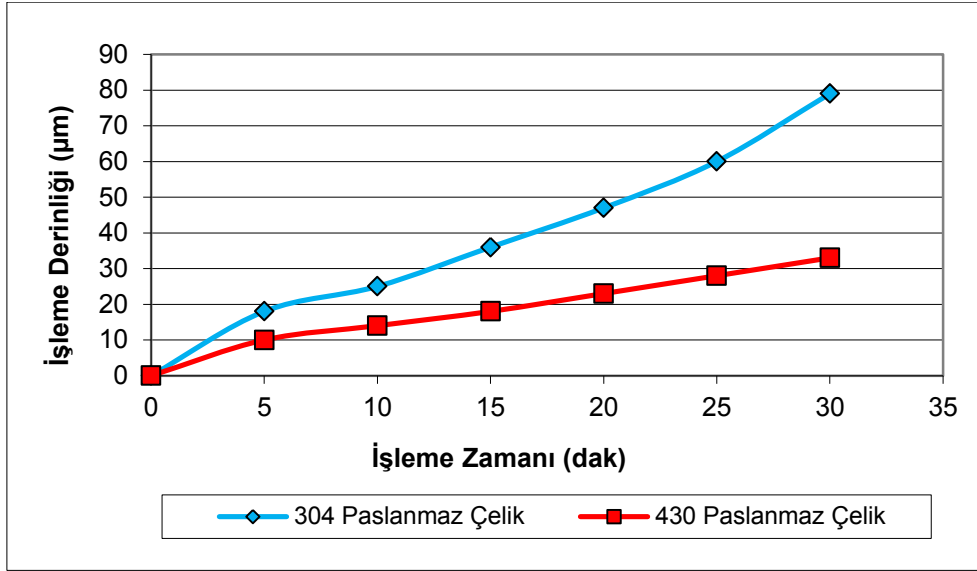
2. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Demir-bazlı malzemelerin kimyasal işlenmesinde yaygın olarak kullanılan ve üniversal kimyasal aşındırıcı olarak tanımlanan $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısı kullanılmıştır. Demir-bazlı bir malzemenin $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısı ile kimyasal işlenmesinde ortaya çıkan kimyasal reaksiyon aşağıda yazılmıştır:

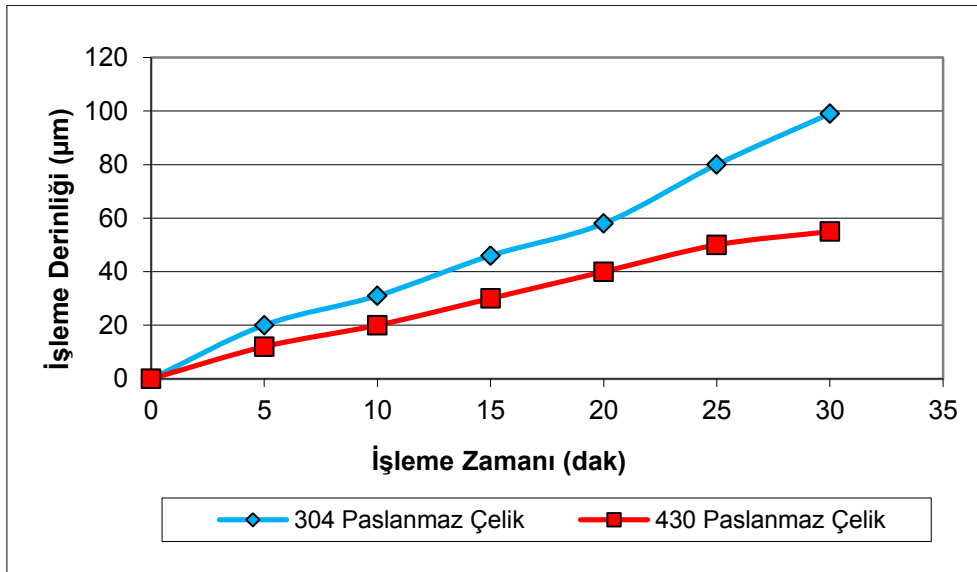


$FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısı demir ile reaksiyona girer ve temas ettiği yüzeyde elektron transferi gerçekleştirerek demirin çözelti içerisinde dağılmasına yol açar. +3 değerlikli $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısı +2 değerlikli duruma düşer ve kimyasal aşındırma özelliğini kaybeder.

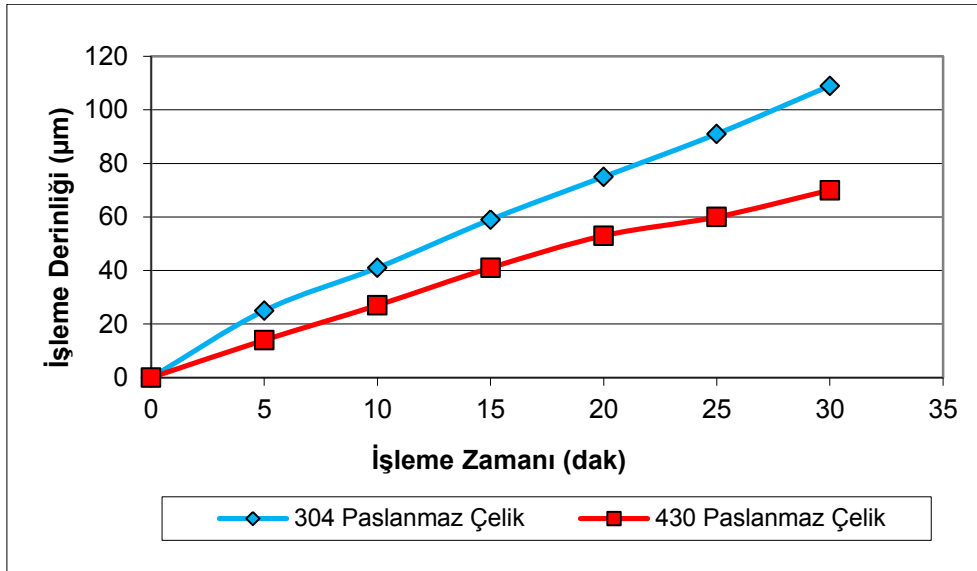
304 östenitik paslanmaz çelik ve 430 ferritik paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesinde, aşındırma derinliği olarak belirtilebilecek olan malzemenin işleme değeri, kalınlık azalmasında ortaya çıkan değişimin ölçümü ile elde edilmiştir. Üç farklı Bé değerindeki $FeCl_3$ kimyasal aşındırıcısının iki farklı paslanmaz çelik üzerindeki işleme miktarları Şekil 2-7.'de verilmiştir. Şekil 2-4 düşük işleme sıcaklığında ($30^{\circ}C$) işleme derinliği değerinin değişimin göstermektedir. Şekil 5-7 ise, yüksek işleme sıcaklığında ($50^{\circ}C$), işleme derinliğinin kimyasal aşındırıcının farklı Bé değerlerine göre değişimini belirtmektedir. Grafiklerin düzenlenmesinde, kimyasal aşındırıcının farklı derişik değerleri ve işlem sıcaklıklarında, paslanmaz çelik malzemeler üzerindeki etkilerini detaylı görebilmek için sade bir gösterim amaçlanmıştır.



Şekil 2. 304 ve 430 Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesi ($28^{\circ}Bé$ ve $30^{\circ}C$)



Şekil 3. 304 ve 430 Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde işleme derinliğinin değişimi ($32^{\circ}Bé$ ve $30^{\circ}C$)

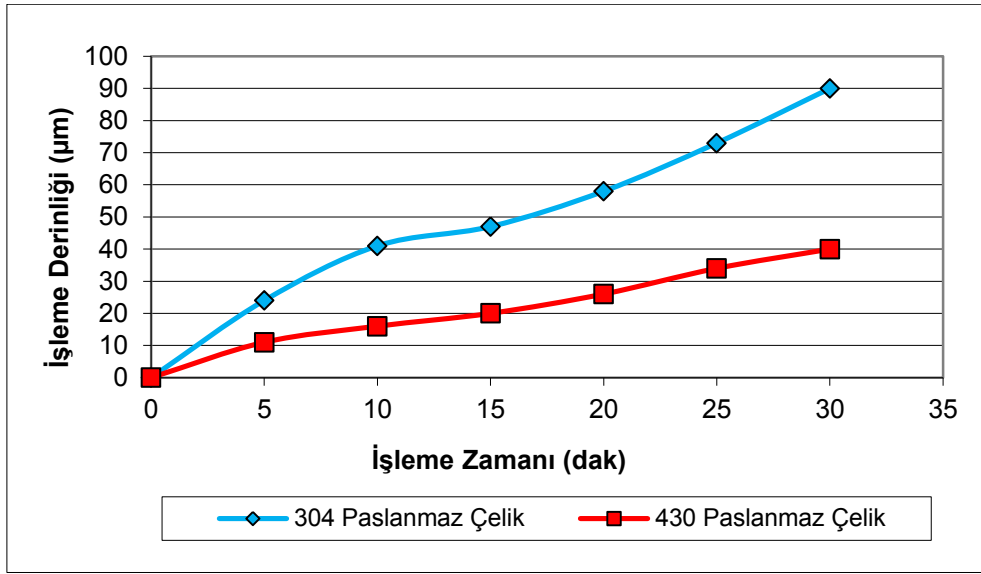


Şekil 4. 304 ve 430 Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde işleme derinliğinin değişimi (36°Bé ve 30°C)

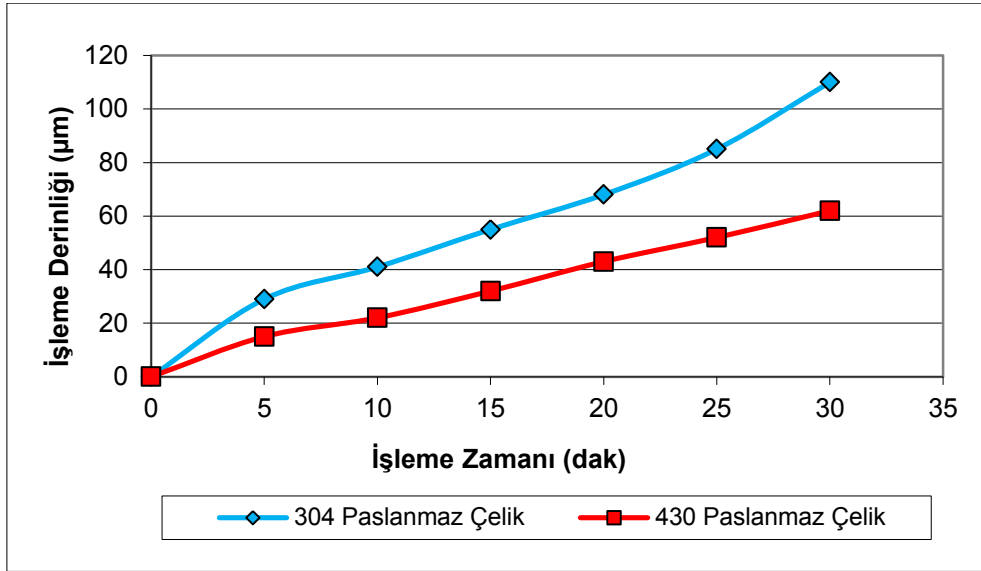
304 ve 430 paslanmaz çeliklerin $FeCl_3$ aşındırıcısı ile işlenmesinde, düşük sıcaklıkların işleme derinliği üzerinde gösterdiği etki (Şekil 2-4), yöntemin mikro işleme tekniği olarak kullanımı açısından önemlidir. İşleme hızları her üç kimyasal aşındırıcı derişik değeri için de sınırlıdır ve işleme derinliğinin kontrol edilmesi mümkündür. En küçük işleme derinliği 28°Bé değerinde elde edilmiş ve en yüksek işleme derinliği ise 36°Bé kimyasal aşındırıcı derişik değerinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, herhangi bir malzemenin kimyasal işlenmesinde, kullanılan kimyasal aşındırıcının derişik değerinin artması ile birlikte, işleme hızının artması yönündeki genel görüşe uygundur. Deneysel çalışmada, seçilen kimyasal aşındırıcının derişik değerlerinin, her iki paslanmaz çelik için de uygun olduğu görülmüştür. İşleme derinliği açısından her üç derişik değerinde de 304 paslanmaz çeliğin vermiş olduğu değerler 430 paslanmaz çeliğe göre daha yüksektir. Farklı kimyasal içerik ve özelliklere sahip olan iki farklı paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesinde, ferritik özellikli paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesinde elde edilen düşük işleme derinlik değerleri, kimyasal bileşendeki farklı kimyasal elementlerin genel olarak korozyona karşı gösterdikleri dirence bağlıdır. 430 paslanmaz çeliğin korozyon direncinin, 304 paslanmaz çeliğe göre daha iyi olduğu belirtilmektedir [10] ve bu durum bu çalışmada da benzer şekilde görülmüştür.

Kimyasal işleme yönteminin uygulanmasında, işlem sıcaklığının etkisi önemlidir ki bu etki, işleme hızının artması ile kendini gösterir. Yüksek işleme sıcaklıkları, kimyasal reaksiyonları hızlandırmakta ve malzemenin korozyon direncini azaltmaktadır. İki farklı paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesinde, seçilen yüksek sıcaklığın (50°C) olumlu etkisi görülmektedir (Şekil 5-7). Genel olarak, işleme sıcaklığının artması ile birlikte, işleme derinliği değerleri her üç derişik değerinde de artmaktadır. Yaklaşık olarak %20 civarında bir artış ile daha hızlı kimyasal işlemenin gerçekleştiği görülmüştür.

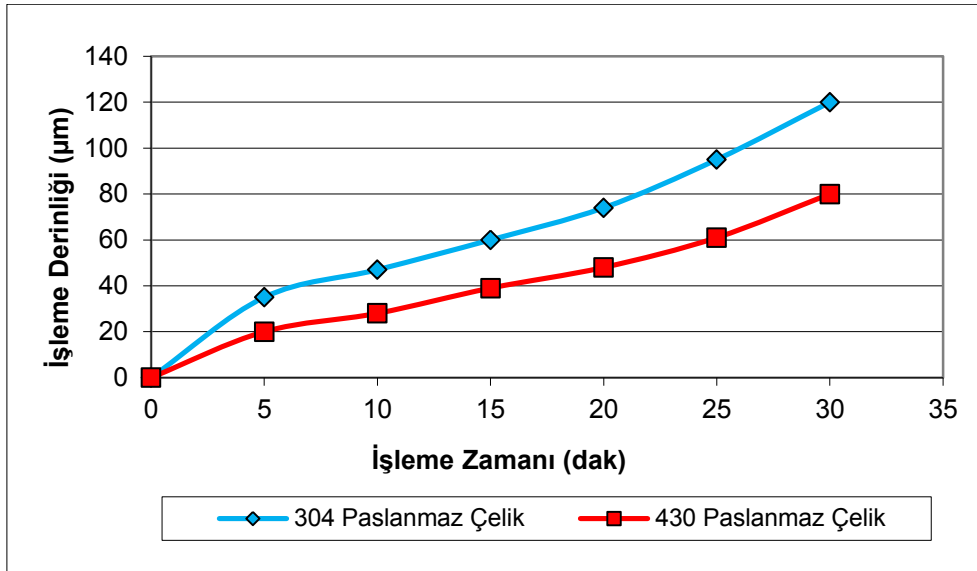
Kimyasal işleme yönteminin düşük sıcaklıkta uygulanması gibi, yüksek sıcaklıkta da uygulanmasında, 304 paslanmaz çeliğin daha yüksek işleme derinliği değerleri verdiği görülmüştür. Ferritik özellikli 430 paslanmaz çeliğin verdiği işleme derinliği değerleri düşüktür ve yüksek işleme sıcaklığının artmasına rağmen 304 paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 304 ve 430 Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde işleme derinliğinin değişimi (28°Bé ve 50°C)



Şekil 6. 304 ve 430 Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde işleme derinliğinin değişimi (32°Bé ve 50°C)

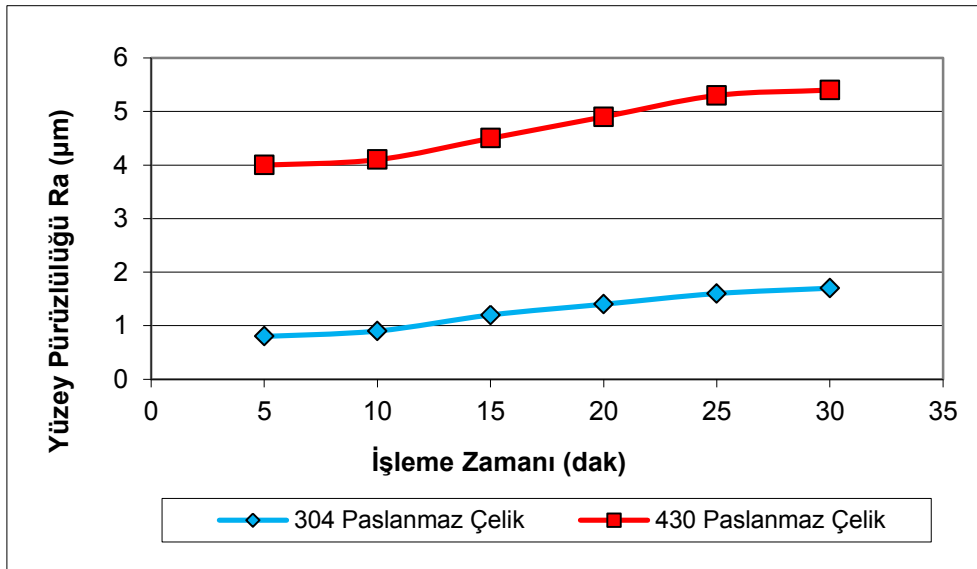


Şekil 7. 304 ve 430 Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde işleme derinliğinin değişimi (36°Bé ve 50°C)

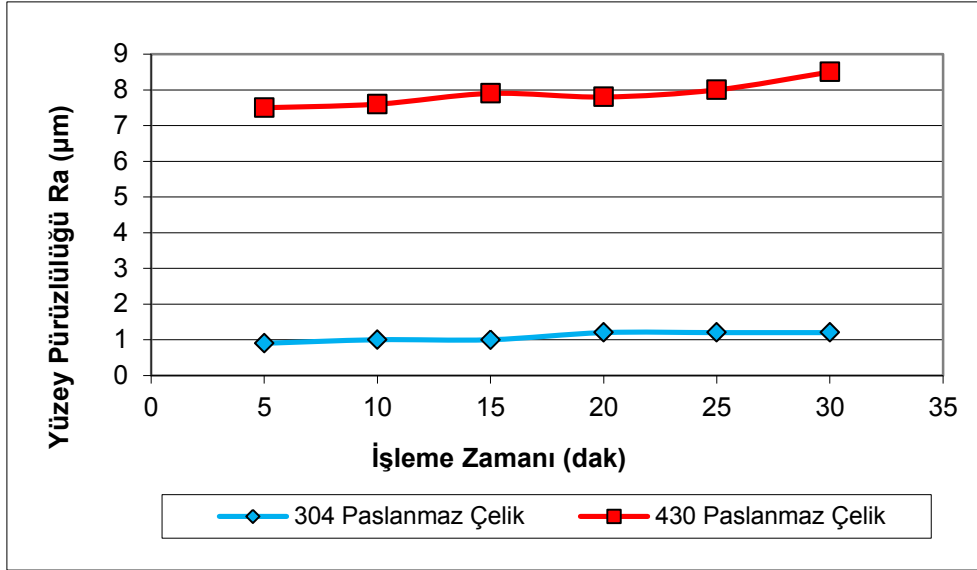
304 ve 430 paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde diğer önemli bir parametre, işlenen yüzeylerdeki yüzey pürüzlülüğü değerleridir. Yapılan deneysel çalışmada, genel olarak işleme hızının düşük olduğu 430 paslanmaz çeliğin yüzey kalitesinin çok kötü olduğu görülmüştür. Kullanılan üç değişik kimyasal aşındırıcı derişik değerinde de, 430 paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesi sonucu ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü sonuçları birbirine yakındır ve değerler $Ra= 6-9 \mu m$ arasındadır. Bu değerler, işlem sıcaklığının artması ile birlikte çok az değişmekte ve daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri vermektedir.

304 paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde ortaya çıkan yüzey pürüzlülük değerleri 430 paslanmaz çeliğe göre çok düşüktür ve bu değerler en fazla $Ra=1.8 \mu m$ değerindedir. 304 östenitik paslanmaz çeliğin ortaya koyduğu hızlı işleme değeri yanında, yüzey kalitesi açısından da kontrollü bir durumun olduğu görülmektedir.

Deneysel çalışmadan elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin benzerliği nedeniyle, Şekil 8.'de 32°Bé derişik değeri ve 30°C işleme sıcaklığında her iki paslanmaz çeliğin göstermiş olduğu yüzey pürüzlülüğü değişimi verilmiştir. Şekil 9 ise, aynı deneysel koşullarda fakat daha yüksek işleme sıcaklığında ortaya çıkan değişimi göstermektedir.



Şekil 8. 304 ve 430 Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün değişimi (32°Bé ve 30°C)



Şekil 9. 304 ve 430 Paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün değişimi (32°Bé ve 30°C)

3. GENEL DEĞERLENDİRME

Kimyasal işleme yöntemi kullanım özellikleri ve uygulamaları açısından önemli bir imalat metodudur. Yöntemin uygulanmasında işlenen malzeme için uygun kimyasal aşındırıcının seçimi ve olası yüksek işleme sıcaklığının belirlenmesi gerekir.

Bu çalışmada, iki farklı paslanmaz çelik malzemesinin kimyasal işlenmesi FeCl_3 kimyasal aşındırıcısı yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonrasında ortaya çıkan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Kimyasal işlemede, işlenen malzemelerin kimyasal içerikleri önemlidir ve malzemenin kimyasal olarak işlenmesi üzerinde etkilidir. İki farklı paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesinde, ferritik özellikli 430 malzemesinin işleme derinliği 304 malzemesine göre düşük çıkmıştır. Malzemelerdeki kimyasal bileşiklerin farklılığı burada önemli rol oynamaktadır.
2. Kimyasal işlemede kullanılan kimyasal aşındırıcının derişik değeri önemli bir faktördür. Genel olarak bilinen, kimyasal aşındırıcı derişik değerinin artması ile birlikte işlemenin hızlanacağıdır. Bu deneysel çalışmada benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Seçilen üç farklı kimyasal aşındırıcı derişik değerleri için, derişik değeri arttıkça her iki malzemenin kimyasal işlenmesinde işleme derinliği artmıştır.
3. Kimyasal işlemenin uygulandığı işleme sıcaklığı, deneysel çalışmada dikkate alınan bir parametredir. Kimyasal işlemede, yüksek işleme sıcaklığı, malzemenin kimyasal işlenmesini hızlandırmaktadır. Bununla birlikte, seçilebilecek işleme sıcaklığı değeri, kullanılan ekipman ve teçhizat ile ilgili olduğu için, kimyasal işlemenin endüstriyel uygulamalarında bu değer 50°C olarak alınmaktadır. Deneysel çalışmada da bu değer ve düşük işleme sıcaklık değeri olarak 30°C alınmıştır. Her iki paslanmaz çelik malzemesinin kimyasal işlenmesinde, düşük sıcaklıklarda işleme hızının yavaş olduğu, fakat yüksek sıcaklıklarda işleme hızının arttığı görülmüştür.
4. Yüzey pürüzlülüğü açısından yapılacak değerlendirmede, kimyasal olarak işlenen malzemelerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük olması beklenir. Kimyasal işleme yönteminin mikro işleme tekniği olarak kullanılması durumunda, işlenmiş yüzey kalitesinin yüksek olması beklenir. Yapılan deneysel çalışmada, özellikle ferritik yapıli 430 paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesinde yüzey kalitesi açısından ortaya çıkan sonuçlar östenitik yapıli 304 paslanmaz çeliğe göre çok farklıdır. 430 paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesinde ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü değerleri yüksektir ve 304 paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında yüzey kalitesi çok kötüdür. Burada etken olan, kimyasal işlenmesi yavaş olan paslanmaz

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

çelik malzemesi üzerinde ortaya çıkan pürüzlü yüzeyin, işlemin hızının yavaş olması ve malzemenin korozyon direncinin yüksek olmasından kaynaklandığı belirtilebilir.

Sonuç olarak, 304 ve 430 paslanmaz çeliklerin kimyasal işlenmesi konusunda yapılan bu deneysel çalışmada, endüstriyel kullanım açısından bu tip malzemelerin kimyasal işlenmesinde yüksek derişik değerkli kimyasal aşındırıcının yüksek işleme sıcaklıklarında kullanılmasının optimum çalışma şartları olabileceği belirtilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Çakır, O., 2015, “Alışılmamış talaşlı imalat ve ısı enerjili kesme işlemleri”, Bölüm 24, (Modern İmalatın Prensipleri, M.P. Groover), Nobel Yayınevi, Ankara
- [2] Çakır, O., 2001, “Kimyasal işleme yöntemi”, II. Makina Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 7-9 Kasım 2001, Manisa, s:813-819
- [3] Çakır, O., Yardımeden, A., Özben, T., 2007, “Chemical machining”, Archives of Materials Science and Engineering, Vol:28, No:8, s:499-502
- [4] Harris, W.T., 1976, Chemical Milling, Oxford University Press, UK
- [5] Sanz, M.C., 1956, “Process of chemically milling structural shapes and resultant article”, USA Patent No: 2739047
- [6] Zhang, P., 2005, Semiconductor Manufacturing Handbook, Chapter 11: Wet Etching, (Editör:Hwaiyu Geng), McGraw-Hill, USA
- [7] Çakır, O., 2008, “Study of etch rate and surface roughness in chemical machining of stainless steel”, Key Engineering Materials, Vol:364-366, s:837-842
- [8] Çakır, O., İlgin, N., Evsen, M., 2005, “Paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesi”, 3. Makina Tasarımı ve İmalat Teknolojileri Kongresi (MATİT 2005) Bildiriler Kitabı, 16-18 Eylül 2005, Konya, Türkiye, s:253-258
- [9] Çakır, O., Bal, M., Tüzün, E., Toprak, V., Direk, M., Arıgtekin, M., 2011, “X5CrNi18-8 Paslanmaz çeliğin kimyasal işlenmesi”, Mühendislik Dergisi (Dicle Üniversitesi), Cilt:2, Sayı:1, s:57-66
- [10] Fontana, M.G., 1987, Corrosion Engineering, McGraw-Hill, USA

ELEKTROEROZYON YÖNTEMİNDE ENERJİ YOĞUNLUĞU KAVRAMI VE İŞ PARÇASI İŞLEME HIZINA ETKİSİ

Sükrü Kocabaş^{1a}, Murat Kiyak^{2b} ve Erhan Altan^{3c}

Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul/TÜRKİYE^(1, 2, 3)

kocabassukru@gmail.com.tr^a

kiyak@yildiz.edu.tr^b

ealtan@yildiz.edu.tr^c

Özet

Bu çalışmada, elektroerozyon yönteminde, “enerji yoğunluğu” yeni bir kavram olarak ele alınmış ve enerji yoğunluğunun, iş parçası işleme hızına etkisi incelenmiştir. Deneylerde elektroerozyonla işlemeye ait boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi değişken işleme parametreleri olarak farklı değerlerde seçilmiştir. Deneylerde, iş parçası olarak soğuk iş takım çeliği (DIN1.2379) ve elektrod olarak 4 farklı çapta (8, 12, 16 ve 20 mm) ve % 99,99 saflıktaki elektrolitik bakır çubuklar kullanılmıştır. Farklı çaplardaki elektrotlar kullanılarak enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, iş parçası işleme hızı ile enerji yoğunluğu arasındaki ilişki deneysel olarak ortaya konulmuş, “enerji yoğunluğu” kavramının elektroerozyon yönteminde değişkenleri içeren bir parametre olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: EDM, Enerji yoğunluğu, İş parçası işleme hızı

ENERGY DENSITY AND ITS EFFECT ON MATERIAL REMOVAL RATE IN EDM

Abstract

In this study, a new concept “energy density” was considered in electrodischarge machining and the effect of energy density on material removal rate was investigated. In the experimental study, discharge current, pulse on time and pulse off time taken as process parameters within different values. The workpiece material was cold work die steel (DIN1.2379) and the electrodes were electrolytic copper bars with %99 purity having four different diameters (8, 12, 16 and 20mm). The effects of energy density on material removal rate were investigated by applying using electrodes with different diameters. As a result, the relation between material removal rate and energy density was determined experimentally and it has been seen that in electrodischarge machining, the concept of “energy density” can be used as a parameter including the process variables.

Keywords: EDM, Energy density, Material removal rate

1. GİRİŞ

Makine imalat sanayinde, talaşlı imalat proseslerinde, günümüzde en yaygın kullanılan geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden biri elektroerozyon ile işleme yöntemidir. Yöntem, özellikle, kalıp imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan bir imalat yöntemidir. Yapılan literatür incelemelerinde, daha çok elektroerozyonla işlemenin temel parametreleri olan; boşalım akımı, vurum süresi ve vurum bekleme süresinin, iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve iş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelendiği görülmüştür. Elektroerozyon yöntemi ile işlemede, yeni bir kavram sayılabilecek olan “enerji yoğunluğu” ile ilgili çok az çalışma olduğu görülmektedir. Boşalım akımının artmasıyla beraber, iş parçası işleme hızı ve elektrod aşınma hızının arttığı [1, 11] ve iş parçası işleme hızının, vurum süresinin artmasıyla ilk başlarda artarken, vurum süresinin daha da artmasıyla azalma başladığı görülmüştür. Vurum süresi optimum bir değer üstüne çıktığında boşalım enerjisinin artık iş parçasından malzeme kaldırmak yerine yüzeyi ve dielektrik sıvıyı ısıttığı belirtilmiştir [1]. İş parçası işleme hızının, boşalım enerjisiyle doğru orantılı değiştiği belirlenmiştir. İş parçası işleme hızının doğrudan kıvılcım enerjisi ile ilgili olduğu görülmektedir [2]. Enerji miktarı girdisi arttıkça iş parçası işleme hızının artacağı ve iş parçası işleme hızının kullanılan enerjiye bağlı olduğu bilinmektedir. İş parçası işleme hızı, enerji girişine bağlıdır bu da doğrudan vurum süresiyle orantılı olduğu ortaya konmuştur [3]. İş parçası işleme hızı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü, sabit vurum sürelerinde boşalım akımının artmasıyla birlikte artmaktadır. Fakat vurum süresinin sürekli artması, iş parçası işleme hızını ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmemektedir. İş parçası işleme hızı ve iş parçası yüzey pürüzlülük değerleri, önce vurum süresiyle beraber artarken, vurum süresinin daha da artmasıyla azalmalar göstermesinin, aşırı vurum sürelerinde plazma kanalının genişlemesiyle ilişkili olduğu ifade edilmektedir. Plazma kanalı genişlediği zaman, enerji yoğunluğu ve iş parçasının birim alanı tarafından emilen ısı enerjisinin azaldığı da çalışmalarda belirtilmektedir. Boşalım akımının artmasıyla, iş parçası işleme hızında artış olduğu gözlenmiş, boşalım akımı arttıkça iş parçası işleme hızının artmasının nedeninin, boşalım enerjisi üzerine, akımının büyük bir etkisinin olduğu belirtilmiştir. Boşalım enerjisi, boşalım bölgesinde darbe başına harcanan enerjiyi ifade eder ve malzeme kaldırma hızını kontrol eder [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Gerçekleştirilen bir başka çalışmada, boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi gibi parametrelerin yanı sıra, elektrod kesit alanlarının etkisi de incelenmiştir. İş parçası işleme hızının boşalım akımıyla beraber doğrusal bir şekilde arttığı, bunun nedeni, boşalım akımının artmasıyla birlikte, vurum enerjisinin artması böylelikle her iki elektrodun da maruz kaldığı ısı enerjisi oranının ve ergime ve buharlaşma hızının artmasından kaynaklanacağı bildirilmiştir. Normal elektrot, kriyojenik olarak soğutmalı elektrot ve ultrasonik destekli kriyojenik olarak soğutmalı elektrotlu olmak üzere 3 farklı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada ise [12], malzeme giderme miktarının, boşalım akımıyla birlikte arttığı, bu artışın nedeninin, boşalım enerjisinin artmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Boşalım akımının artmasının, boşalım enerji yoğunluğu ve vurum kuvvetinin artmasına neden olduğu da belirtilmiştir. Elektroerozyon yönteminde, enerji yoğunluğu konusunda son zamanlarda gerçekleştirilen bazı çalışmalarda ise, “elektroerozyon yönteminde enerji yoğunluğu” kavramına dikkat çekilmiş ve enerji yoğunluğunun, iş parçası işleme miktarı, elektrot aşınma hızı, iş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü ve elektrot aşınma miktarı üzerine etkisi incelenmiştir [13, 14].

Gerçekleştirilen bu çalışmada ise, “elektroerozyon yönteminde enerji yoğunluğu” kavramı belirtilmiş, enerji yoğunluğunun, iş parçası işleme hızına etkisi incelenerek, enerji yoğunluğunun, Elektroerozyon yönteminde önemli bir bağlı değişken olarak kabul edilebileceği ortaya konulmuştur.

2. ELEKTROEROZYON YÖNTEMİNDE ENERJİ YOĞUNLUĞU

Elektroerozyon yöntemi ile işlemede, kıvılcımlar farklı elektrik devreleri tarafından üretilebilir. Bunların her birinin farklı gerilim ve akım dalga şekilleri vardır. Bu ardışık dalga şekillerin aynı ya da en azından benzer olduğu durumlarda, her bir elektrik boşalmasındaki enerji, Eşitlik 2.1’de formüle edildiği şekilde hesaplanabilir [14].

$$E = \int_0^{t_d} Q(t) dt \quad (2.1)$$

t_d , boşalım süresini ve $Q(t)$ her bir boşalımda uygulanan toplam gücü ifade etmektedir. $Q(t)$ değeri, boşalım gerilimi (V_d) ile boşalım akımının (i_d) çarpımına eşittir.

$$Q(t) = V_d \cdot i_d \cdot t_d \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.1, Eşitlik 2.2. ile düzenlenmesi sonucunda Eşitlik 2.3 eşitliği elde edilir.

$$E = \int_0^{td} V_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt \quad (2.3)$$

Vurum süresi, boşalım (darbe) süresi ile gecikme süresinin toplamına eşittir.

$$t_s = t_d + t_i \quad (2.4)$$

Gecikme süresi, boşalım süresiyle karşılaştırıldığında sabit ve çok kısa bir süredir. Bu yüzden ihmal edilebilir ve vurum süresi yaklaşık olarak, boşalım süresine eşit alınabilir [14].

$$t_s \approx t_d \quad (2.5)$$

Bu durumda ise her bir boşalım başına düşen enerji, Eşitlik 2.6'da belirtildiği gibi hesaplanır [14].

$$E = \int_0^{ts} V_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt \quad (2.6)$$

$$E \approx V_d \cdot i_d \cdot t_s \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.6'da belirtilen boşalım enerjisi tek bir elektriksel darbe (pulse) içindir. Toplam uygulama zamanı içerisinde "n" adet elektriksel darbe oluşmaktadır. Böylece uygulama zamanı içinde elektrot ve iş parçası arasına gönderilen toplam enerjinin miktarı Eşitlik 2.7 ile ifade edilir

$$E_T = n \cdot E \quad (2.7)$$

Uygulama zamanı içerisinde tekrarlanan elektriksel darbe sayısı "n", uygulama zamanının toplam çevrim süresine (vurum ve vurum bekleme süresinin toplamı) bölünmesiyle bulunur.

$$n = \left(\frac{t_{top}}{t_s + t_p} \right) \quad (2.8)$$

Elektroerozyonla işleme sırasında işleme bölgesindeki metelsel talaş parçacıklarının dielektrik sıvı tarafından temizlenmesi için elektrodun tekrarlanan bir şekilde yukarı, çıkıp aşağı inmesinden dolayı, boşalımın gerçekleşmediği süreyi ifade etmek için, bir katsayı (k) kullanılır ve Eşitlik 2.7'deki ifade açık yazılırsa Eşitlik 2,9 elde edilmektedir.

$$E_T = k \cdot V_d \cdot i_d \cdot t_s \cdot \left(\frac{t_{top}}{t_s + t_p} \right) \quad (2.9)$$

Eşitlik 2.9'daki "t_{top}" ifadesi toplam uygulama zamanını ifade etmektedir. Böylece, uygulama zamanı içerisinde iş parçası ve elektrot arasına uygulanan toplam enerji miktarı hesaplanabilir. Toplam enerji miktarı eşitliğinin her iki tarafı da, deşarj etki alanına bölündüğünde enerji yoğunluğu (Eşitlik 2.10) elde edilmiş olur.

$$E_D = \frac{E_t}{A_{\text{ön}}} \quad (2.10)$$

Toplam enerji miktarı eşitliği (Eşitlik 2.9), enerji yoğunluğu eşitliğinde (Eşitlik 2.10) yerine yazılarak Eşitlik 2.11 elde edilir.

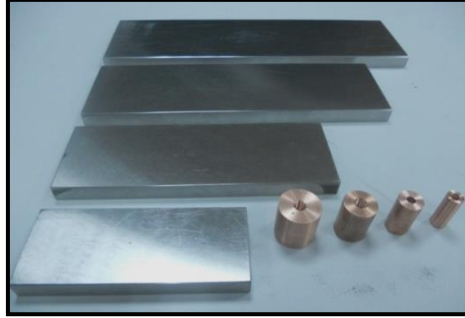
$$E_D = \frac{k \cdot V_d \cdot i_d \cdot t_s \cdot \left(\frac{t_{top}}{t_s + t_p} \right)}{A_{\text{ön}}} \quad (2.11)$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak soğuk iş takım çeliği X155CrVMo12 (DIN1.2379), elektrod olarak, %99,99 saflıkta ve 8, 12, 16 ve 20 mm olmak üzere 4 farklı çapta elektrolitik bakır çubuklar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçaları ve elektrotlar Şekil 3.1.'de verilmektedir. Deneyler, NEU-AR marka CNC-P50 tipi elektroerozyon tezgahında gerçekleştirilmiştir. Dielektrik sıvı olarak Petrofer Dielektrikum358 kullanılmıştır. İHH'nın belirlenmesi için her deney öncesi iş parçaları tamamen kurutulduktan sonra Densi marka JW UFO model hassas terazi ile üçer kez tartılmış bu üç ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanmış ve iş parçalarının deney öncesi ağırlığı olarak kaydedilmiştir. Her deney tamamlandıktan sonra iş parçaları aynı temizleme ve kurutma işlemi yapılarak üçer kez tartılmış ve bu üç ölçümün aritmetik ortalaması iş parçalarının deney sonrası ağırlığı olarak kaydedilmiştir.

Elektroerozyonla işlemede, işlem parametreleri olarak boşalım akımı, vurum süresi, vurum bekleme süresi, değişken parametreler olarak alınmış, enerji yoğunluğunun, iş parçası işleme hızının üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Deneylerde kullanılan değişkenleri ve değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Gerilim, elektrot kutbu, işleme zamanı, elektrodun malzeme üzerinde kalma süresi ve elektrodun malzeme üzerinden maksimum kalkma miktarı tüm deneyler boyunca sabit olarak alınmıştır. Çalışmada, 108 adet deney gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan iş parçaları ve elektrotlar

Çalışmada, her deney süresi 20dk alındığından, toplam uygulama zamanı 20dk olmuştur. Ancak, iş parçası işleme hızı (gr/dk) cinsinden hesaplandığından dolayı enerji yoğunluğu hesabı yapılırken 20dk içinde verilen enerji yerine birim zaman içerisinde verilen enerji yoğunluğu göz önüne alınmıştır.

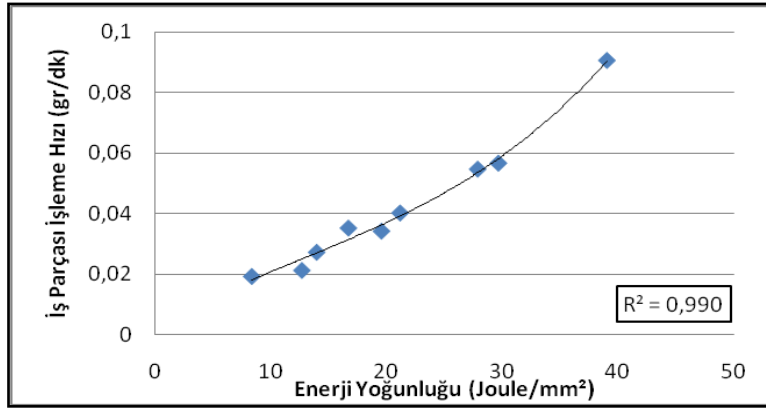
Çizelge 3.1. Deneysel çalışma değişkenleri

Deney Parametresi	Birim	Değer
Boşalım akımı	A	9, 15, 21
Vurum süresi (t_s)	μs	10, 20, 45
Vurum bekleme süresi (t_p)	μs	6, 30, 300
Elektrod çapı	mm	8, 12, 16, 20
Gerilim	V	55
Malzeme üzerinde kalma	sn	1.5
Malzeme üzerinden kalkma	mm	1.5
İşleme zamanı	dak.	20
Elektrot kutbu		Negatif (-)

Deneysel çalışmalarda, Eşitlik 2.9’deki " t_{top} " ifadesi 1 dk olarak alınmıştır, daha sonra bu süre enerji yoğunluğu hesabı yapılırken mikrosaniyeye çevrilerek hesaba katılmıştır. Deneysel çalışmalarda, Eşitlik 2.9’deki “k” değeri, çalışma şartları için 0.5 olarak belirlenmiştir. “k” değeri belirlenirken; elektrodun iniş kalkış hızı, elektrodun malzeme üzerinde kalma zamanı, elektrodun iş parçası malzemesi üzerinden maksimum yükselme miktarı ve işleme zamanı göz önüne alınmıştır.

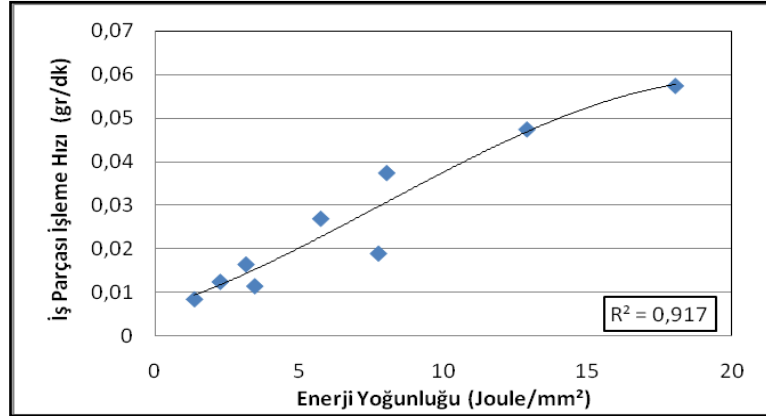
3.1. Enerji Yoğunluğunun Malzeme İşleme Miktarına Etkisi

Bu çalışmada, birim etki alanı başına enerji esas alınarak, birim zamanda iş parçasından giderilen malzeme hacmi ile ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Aynı parametre değerlerinde, farklı çaplarda elektrotlar (8, 12, 16 ve 20mm) kullanılarak, enerji yoğunluğu değeri belirlenmiştir. İlgili bölümde detaylı olarak ifade edilen ve Eşitlik 2.11’den yararlanılarak belirlenen enerji yoğunluğu değerlerine karşılık, iş parçası işleme hızı değerleri, Şekil 3.1.1-Şekil 3.1.12’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, enerji yoğunluğu ile iş parçası işleme hızı arasında 3. dereceden eğri yaklaşımı sağlandığı ve belirleme katsayısı (R^2) %91-%99 aralığında değiştiği görülmüştür. Enerji yoğunluğu artışı ile iş parçası işleme hızında artışlar olduğu görülmektedir.



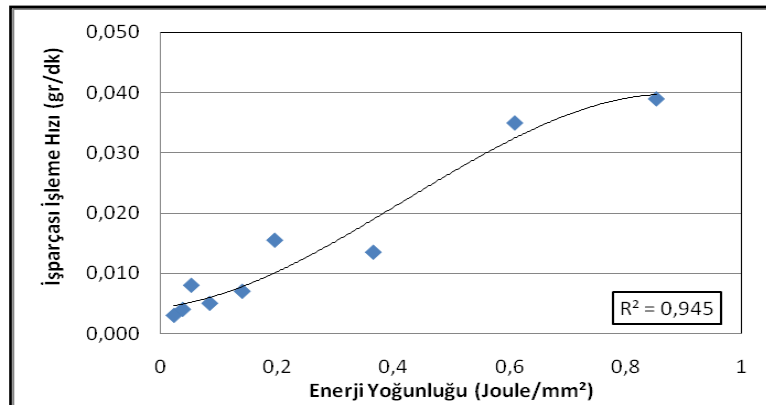
Şekil 3.1.1 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 20 mm, vurum bekleme süresi 6 µs)

20 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 6 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 8-38 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın, 0,02 ile 0,09 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %99 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y=1E-06x^3 - 5E-05x^2 + 0,0002x + 0,002$) denklemi elde edilmiştir.



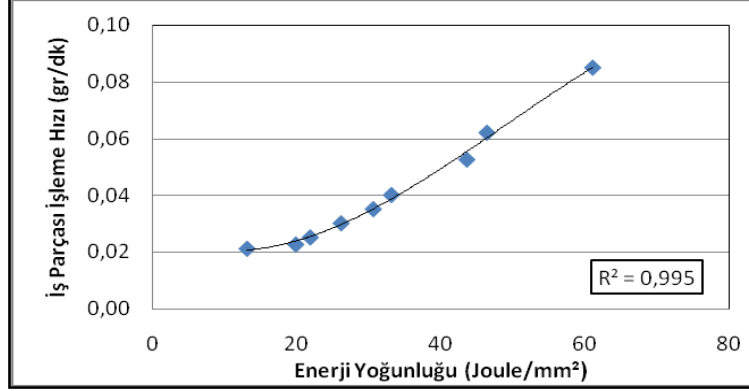
Şekil 3.1.2 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 20 mm, vurum bekleme süresi 30 µs)

20 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 30 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 2-18 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,01 ile 0,06 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %92 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y=-8E-06x^3 + 0,00018x^2 + 0,002x + 0,006$) denklemi elde edilmiştir.



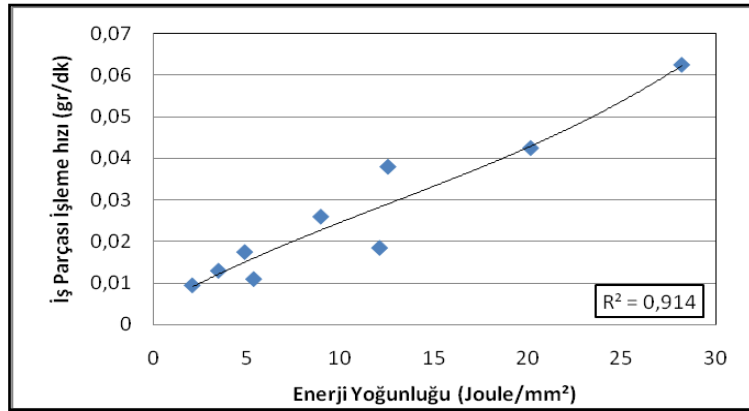
Şekil 3.1.3 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi
(elektrod çapı 20 mm, vurum bekleme süresi 300 µs)

20 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 300 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 0,01-0,85 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,002 ile 0,04 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %95 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y = -0,091x^3 + 0,114x^2 + 0,009x + 0,004$) denklemi elde edilmiştir.



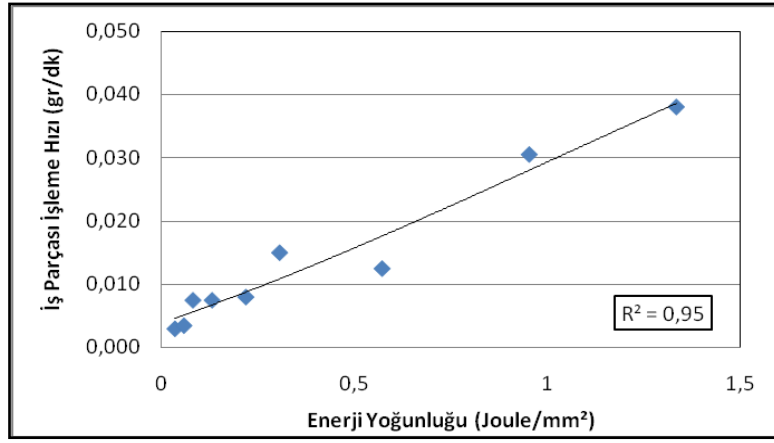
Şekil 3.1.4 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi
(elektrod çapı 16 mm, vurum bekleme süresi 6 µs)

16 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 6 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 12-62 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,02 ile 0,08 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %99 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y = -4E-07x^3 + 6E-05x^2 - 0,001x + 0,026$) denklemi elde edilmiştir.



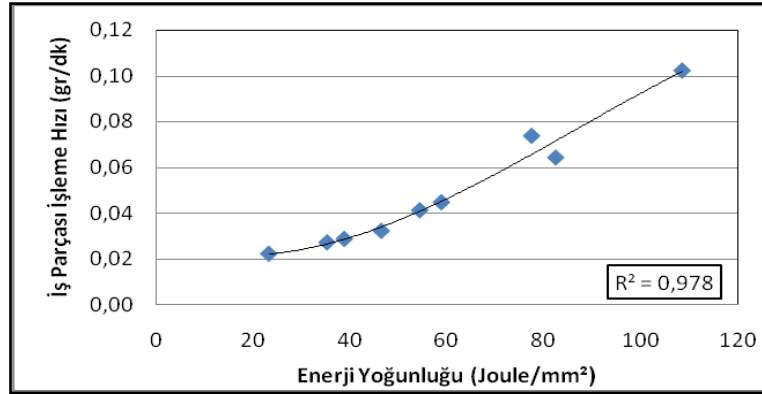
Şekil 3.1.5 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi
(elektrod çapı 16 mm, vurum bekleme süresi 30 µs)

16 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 30 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 2-28 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,01 ile 0,06 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %91 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y = 2E-06x^3 - 6E-05x^2 + 0,002x + 0,004$) denklemi elde edilmiştir.



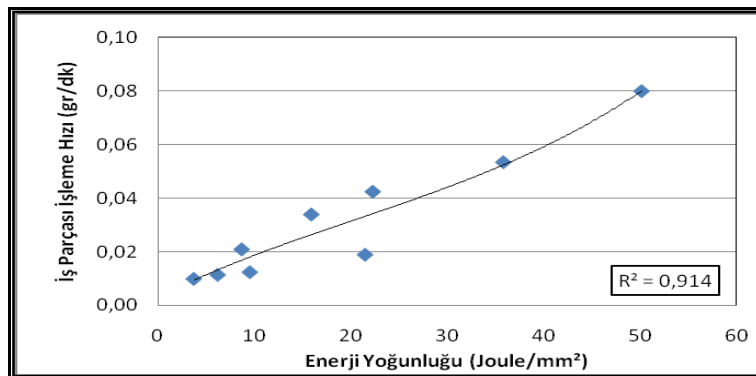
Şekil 3.1.6 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 16 mm, vurum bekleme süresi 300 µs)

16 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 300 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 0,035-1,35 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,003 ile 0,04 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %95 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y = -0,002x^3 + 0,007x^2 + 0,020x + 0,003$) denklemini elde edilmiştir.



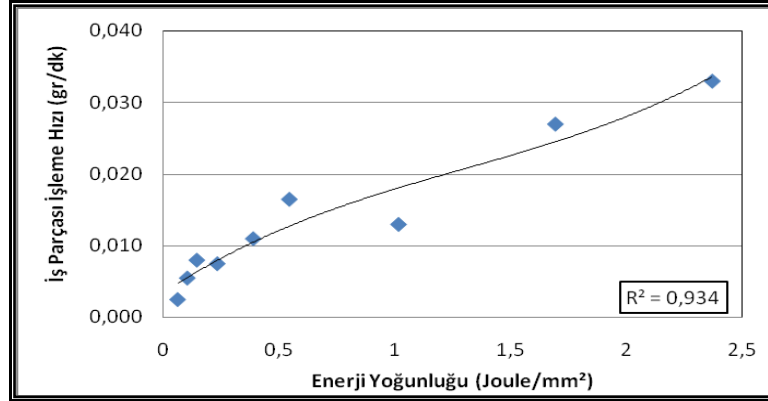
Şekil 3.1.7 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 12 mm, vurum bekleme süresi 6 µs)

12 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 6 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 20-110 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,02 ile 0,1 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %98 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y = -8E-08x^3 + 2E-05x^2 + 0,0006x + 0,027$) denklemini elde edilmiştir.



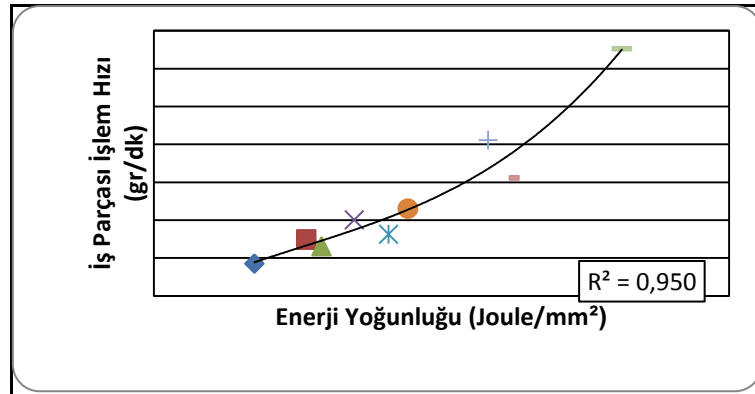
Şekil 3.1.8 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 12 mm, vurum bekleme süresi 30 µs)

12 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 30 μ s olması durumunda, enerji yoğunluğu 4-50 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,01 ile 0,08 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %91 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y= 5E-07x^3 -3E-05x^2 + 0,001x + 0,003$) denklemi elde edilmiştir.



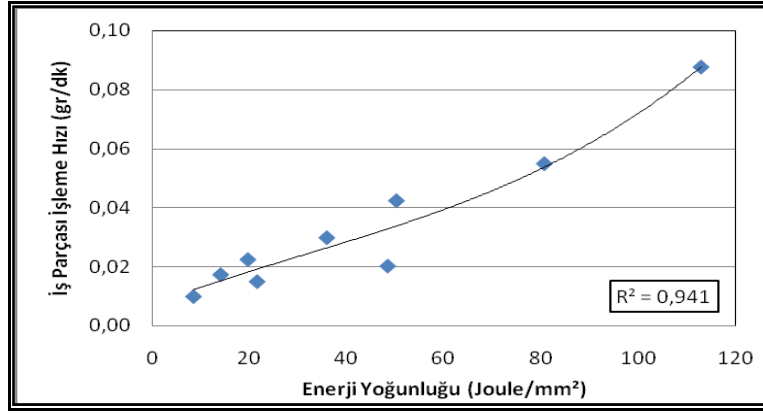
Şekil 3.1.9 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 12 mm, vurum bekleme süresi 300 μ s)

12 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 300 μ s olması durumunda, enerji yoğunluğu 0,1-2,5 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,002 ile 0,033 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %93 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y= 0,002x^3 -0,009x^2 + 0,021x + 0,003$) denklemi elde edilmiştir.



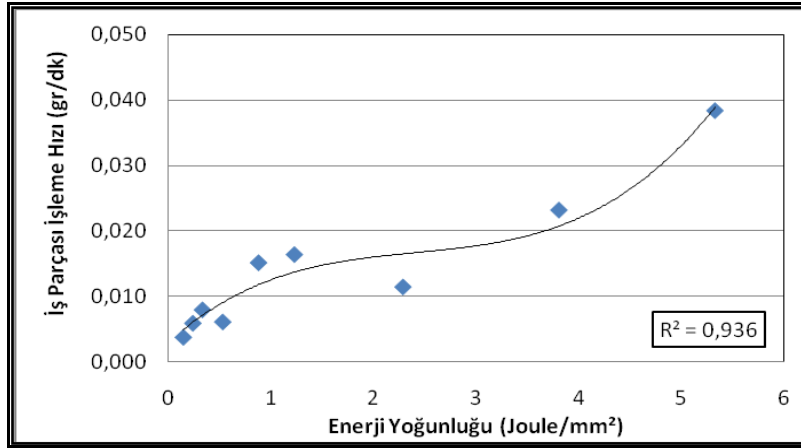
Şekil 3.1.10 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 8 mm, vurum bekleme süresi 6 μ s)

8 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vurum bekleme süresinin 6 μ s olması durumunda, enerji yoğunluğu 50-250 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,02 ile 0,13 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %95 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y= 1E-08x^3 -2E-06x^2 + 0,0005x -0,0038$) denklemi elde edilmiştir.



Şekil 3.1.11 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 8 mm, vuruş bekleme süresi 30 µs)

8 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vuruş bekleme süresinin 30 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 8-110 j/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,01 ile 0,09 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %94 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y = 4E-08x^3 - 4E-06x^2 + 0,00063x + 0,007$) denklemi elde edilmiştir.



Şekil 3.1.12 Enerji yoğunluğunun iş parçası işleme hızına etkisi (elektrod çapı 8 mm, vuruş bekleme süresi 300 µs)

8 mm çaplı elektrod kullanılarak yapılan çalışmada; vuruş bekleme süresinin 300 µs olması durumunda, enerji yoğunluğu 0,2-5,3 joule/mm² değerleri arasında değişirken, İİH'nın 0,003 ile 0,04 gr/dak. aralığında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara, regresyonla eğri uydurulduğunda, belirleme katsayısı (R²) %94 yaklaşım sağlayan 3.derece polinom ($y = 0,00072x^3 - 0,005x^2 + 0,014x + 0,002$) denklemi elde edilmiştir.

4. SONUÇ

Yapılan deneysel çalışmalarla daha önceki yapılan çalışmalarda çok az yer verilen enerji yoğunluğu kavramının iş parçası işleme hızına etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, enerji yoğunluğu ile iş parçası işleme hızı, arasında bir ilişkinin olduğu, farklı çaplardaki elektrotlarla yapılan deneylerde enerji yoğunluğundaki artışla birlikte iş parçası işleme hızının arttığı, iş parçası işleme hızı ve enerji yoğunluğu arasındaki en iyi yaklaşımın. 3. dereceden polinom şeklinde olduğu görülmüştür.

Seçilen elektroerozyon parametreleriyle aynı enerji verildiğinde, çap değeri arttıkça enerji yoğunluğu azalmakta ve buna bağlı olarak İİH miktarında azalma görülmektedir. Aynı çap değeri için, bekleme süresi arttıkça, enerji yoğunluğu istenmeyen metal partikül yoğunluğunun temizlenmesi sağlanmakta ve buna bağlı olarak kısa devre akımlarının azalmasına neden olmaktadır. Böylece kısa devre geçişleri oluşmamaktadır. Bekleme süresi fazla olduğunda kısa devre geçişleri olmadığından, akım yoğunluğu azalmakta, buna bağlı olarak İİH miktarının

azaldığı görülmektedir. Belli bir miktar talaş kaldırmak için, elektrod alanı azaldıkça, diğer değişkenler aynı kalmak kaydıyla enerji yoğunluğunun artırılması gerekmektedir.

Bu çalışma ile elektroerozyonla işlemede “enerji yoğunluğu”nun bağımsız işlem parametrelerini içeren bir bağlı değişken olduğu ve enerji yoğunluğuyla iş parçası işleme hızı arasında bir ilişkinin olduğu ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Chen, Y. ve Mahdavian, S. M. (1999), “Parametric study into erosion wear in a computer numerical controlled electro-discharge machining process“ Wear, volume 236 Pages 350-354
2. Chen, Y., Mahdivian, S.M., (2000).“ Analysis of electro-discharge machining process and its comparison with experiments“ Journal of Materials Processing Technology, volume 104 pages 150-157
3. Lee, S.H., Li, X.P., (2001), “Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide” Journal of Materials Processing Technology volume 115 pages 344-358
4. (4) Lee, H. T., Hsu, F. C., Tai, T. Y., (2004). “Study of surface integrity using the small area EDM process with a copper-tungsten electrode“ Materials Science and Engineering volume 364 (1) pages 346-356
5. Yan, B. H., Tsai, H. C., Huagh, F. Y., (2005).“The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium“ International Journal of Machine Tools & Manufacture volume 45 pages 194-200
6. Amorim, F.L., Weingaertner, W. L. (2005), “ The influence of generator actuation mode and process parameters on the performance of finish EDM of a tool steel“ Journal of Materials ProcessingTechnology volume 166 pages 411-416
7. Ergün, Z.E., Coğun, C. (2006), “Elektro erozyon ile işleme (EEİ) işparçası yüzey karakteristiklerinin deneysel incelenmesi“ Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 21 (3) s 427-441
8. Özgedik, A., Coğun, C., (2006), “ An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining“ Int. J. Adv. Manuf. Technol. volume 27 pages 488-500
9. Kuppan, P., Rajadurai A., Narayanan S., (2008), “Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of inconel 718” The International Journal of Advanced Manufacturing volume 38 pages 74-84
10. Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P., (2007), “Effect of silicon powder mixed EDM on machining rate of AISI D2 die stell“ Journal of Manufacturing Processes volume 9(1) pages 13-22
11. Sohani, M. S., Gaitonde, V. N., Siddeswarappa, B., Deshpande, A. S., (2009), “Investigations into the effect of tool shapes with size factor consideration in sink electrical discharge machining (EDM) process“ Int J Adv Manuf Technol volume 45 pages 1131-1145
12. Srivastava, V., Pandey, P.M., (2012), “Effect of process parameters on the performance of edm process with ultrasonic assisted cryogenically cooled electrode ”Journal of Manufacturing Processes volume 14 pages 393-402
13. Kocabaş Ş., (2013), “Elektroerozyonla işlemede işlem parametrelerinin malzeme giderilmesi ve yüzey kalitesine etkilerinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
14. Kıyak M., Aldemir B.E., Altan E., (2015) “Effects of discharge energy density on wear rate and surface roughness in EDM ” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 79 pages 513-518

VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN FREZELENMESİNDE ÖSTEMPERLEME SICAKLIĞI VE SÜRESİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

Yücel Kahraman^a, Gültekin Uzun^a ve İhsan Korkut^a

a, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği, Ankara/TÜRKİYE,

yuc.kahraman@gmail.com

uzun.gultekin@gazi.edu.tr

ikorkut@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, vermiküler grafitli dökme demir numuneler iki farklı sıcaklıkta (315, 375°C) ve üç farklı bekleme süresinde (60, 120, 180 dakika) östemperleme işlemine tabi tutulmuş ve seçilen kesme parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğü araştırılmıştır. CNC freze tezgâhında, kaplamasız sementit karbür kesici uçlar kullanılmıştır. Kesici uç kataloğu ve literatüre göre belirlenen kesme parametreleri ile yapılan frezeleme işlemleri esnasında oluşan kesme kuvvetleri ve işlenen yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek analiz edilmiştir. Deneyler dört farklı kesme hızı (70, 87, 98 ve 112 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0.025, 0.0375, 0.05 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (0.5 mm) kuru şartlarda yapılmıştır. Deneyler sonucunda, ısı işlem yapılmamış döküm haldeki numunenin yüzey pürüzlülük değeri, östemperleme ısı işlemi uygulanmış malzemelerin yüzey pürüzlülük değerlerine göre oldukça yüksek çıkmıştır. Östemperleme ısı işleminin malzemelerin yüzey kalitesini ortalama 5.5 kat iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Vermiküler grafitli dökme demir, yüzey pürüzlülüğü, östemperleme

THE EFFECTS ON SURFACE ROUGHNESS OF AUSTEMPERING TEMPERATURE AND TIME OF MILLING ON VERMICULAR GRAPHITE CAST IRONS

Abstract

In this study, compacted graphite cast iron samples at two different temperatures (315, 375 °C) and three different waiting times (60, 120, 180 min.) were subjected to austempering processes and investigated surface roughness according to the chosen cutting parameters. CNC milling machines, uncoated cemented carbide inserts are used. The cutting insert and cutting forces generated during catalog with cutting parameters determined according to the literature milling and analyzed by measuring the average surface roughness of machined surface. Experiments four different cutting speeds (70, 87, 98 and 112 m/min), three different feed speeds (0.025, 0.0375, 0.05 mm/rev) and the constant cutting depth (0.5 mm) was held in dry conditions. As a result of the experiments, the surface roughness of the sample in the state yet casting heat treatment, austempering were quite high due to the surface roughness of the heat treatment is applied to the material. Austempering heat treatment of the surface quality of the material was observed to improve an average of 5.5 fold.

Keywords: Compacted graphite cast iron (CGI), surface roughness, Austempering

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmelere paralel olarak araç ve gereçlerin üretilmesi için gerekli olan malzemelerin üretiminde de hızlı bir gelişme olmakta ve buna bağlı olarak da malzeme türlerinde her geçen gün artış gözlenmektedir. Endüstriyel olarak uygulamalarda geniş kullanım alanı bulan bir malzeme türü de vermiküler grafitli dökme demirlerdir [1]. Vermiküler grafitli dökme demirler, dökme demir ailesinin yeni bir üyesidir. Mekanik ve fiziksel özellikleri ile gri ve sfero dökme demirler arasında olduğu tespit edilmiştir [2].

Talaşlı imalat; kesici takımın (ya da kısaca takım) iş parçasına göre nispi hareketleri sonucunda, iş parçasının belirli bir bölümünde plastik deformasyon oluşturarak gerçekleştirilen bir talaş kaldırma işlemidir. Oldukça karmaşık bir yapıya sahip olan talaş kaldırma mekanizmasının anlaşılabilmesi için üç boyutlu takım geometrisi, iki boyutlu ortogonal kesme geometrisi şeklinde basitleştirilir. Bu geometrinin ve talaş kaldırma mekanizmasının incelenmesi sonucunda; talaş kaldırma sırasında takımın çok yüksek gerilme ve sıcaklıklara maruz kaldığı, bunun sonucunda takımda elastik ve plastik şekil değişimleri ile şiddetli bir aşınmanın meydana geldiği anlaşılmıştır. Talaş kaldırma sırasında takımda meydana gelen bu şekil değişimleri ve aşınma talaş kaldırma işlemini şüphesiz olumsuz yönde etkilemektedir. Çünkü kesici takımda meydana gelen bu deformasyonlar; iş parçasının yüzey kalitesini ve toleranslarını olumsuz yönde etkilemekte, takım tezgahı konstrüksiyonundaki (miller, yataklar vb.) titreşimlerin artmasına neden olmakta, talaş kaldırma için gerekli olan enerji miktarını dolayısıyla enerji sarfiyatını arttırmaktadır. Bununla birlikte takımda meydana gelen deformasyonların oluşturduğu en büyük olumsuzluk takım ömrünün azalmasıdır. Takım ömrünün azalması, takım maliyetini ve sonuç olarak da üretim maliyetini etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenledir ki; takım ömrünü etkileyen faktörlerin bilinmesi, bu faktörleri kontrol altına alınabilecek tedbirlerin geliştirilmesi, efektif takım ömrünün belirlenebilmesi ve optimum takım değiştirme zamanının belirlenmesi büyük önem kazanmaktadır [3].

Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesici takımlar, talaşlı imalat işlemlerinin maliyeti ve ürün kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Talaşlı imalat işlemlerinin maliyetinin düşük olması için kesici takımların yeterince uzun bir süre keskinliğini korumaları ve kesme hızının, ilerleme hızının ve talaş derinliğinin yüksek olması istenir. Kesici takımlar, kesme işlemini etkin bir şekilde yapabilmeleri için talaşlı imalat esnasındaki yüksek gerilme, sıcaklık ve sürtünme etkilerine uzun süre dayanacak kabiliyette olmalıdır [4].

Vermiküler grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri, mikro yapısı ve aşınma davranışı üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Mavi, vermiküler grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğini yüzey pürüzlülüğü açısından incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, en iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri perlitik vermiküler grafitli dökme demirlerde ve en yüksek kesme hızlarında elde edilmiştir [5]. Benzer bir çalışmada ise Seyfi, farklı östemperleme sıcaklık ve sürelerinde elde edilen mikro yapılara bağlı mekanik özellikleri belirlemiş numuneler üzerinde talaş kaldırma deneyleri uygulayarak işlenebilirlik parametrelerinden kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünü incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda KGDD malzemesinin yapı ve özelliklerinin ısıl işleme büyük oranda geliştirilebildiği saptanmıştır. Düşük sıcaklıkta (280°C) ve (30 dak) kısa östemperleme sürelerinde yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuçların elde edildiğini tespit etmişlerdir [6]. Şeker ve Hasırcı, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğini, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine bağlı olarak incelemiştir. En düşük kesme kuvveti değeri döküm haldeki numunelerden elde edilmiş buna karşılık en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri de yine bu grupta gözlemlenmiştir [7]. Zimba ve diğerleri, alaşımsız küresel grafitli dökme demiri östemperleme işlemi uygulanmışlar östemperleme sıcaklığının artması ile malzeme sertliğinin azaldığını belirtmişlerdir [8]. Gök, perlitik yapıya sahip malzeme için iki farklı sıcaklıkta östemperleme işlemi uygulanmış daha sonra CBN (Cubic Boron Nitride) ve sementit karbür kesici takım uçları ile kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma davranışını incelemiştir. Yüzey kalitesinin en düşük olduğu malzemenin östemperleme ısıl işlemi uygulanmamış KGDD malzemeler olduğunu belirtmiştir [9]. Kuş, östemperlenmiş ve döküm haldeki GGG40 ferritik küresel grafitli dökme demir numunelerin aşınma davranışlarını incelemiştir. Sonuç olarak östemperleme ısıl işleminin numunelerin aşınma direncini, çekme ve akma dayanımını artırdığı tespit etmiştir. Mikro yapının östemperleme sıcaklığına önemli derecede bağlı olduğunu, östemperleme sıcaklığının yükselmesi ile aşınma direncinin azaldığı belirtmiştir [10]. Stefanescu, VGDD'in morfolojisi, malzemeyi işleme anında talaş kaldırmak için yeteri kadar kırılğan yapmadığını, bundan dolayı toz talaş çıkışını engellemenin zor olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünün yüksek çıktığını tespit etmiştir [11]. Kırçalı ve Çakır östemperleme sıcaklık ve zamanının malzeme özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir.

ÖKGDD'in işlenebilirliğini takım ömrü, takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi kriterlerine göre değerlendirmişlerdir. İş parçasının sertliği arttıkça takım aşınmasının arttığını buna bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinde artış gözlemlemişlerdir [12]. Karabulut, vermiküler grafitli dökme demirin frezelemede işlenebilirliğini ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Seramik kesicilerde karbür kesici uçlarda oluşan yüzey pürüzlülük değerlerinin aksine, kesici takım yanaşma açısının değeri 45°'den 88° 'ye doğru arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı gözlemlenmiştir [13]. Yazman, kaplamasız ve yüksek kesme hızlarında kaplamalı kesici takımlar kullanılarak ÖKGDD'lerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde kesici takım aşınması, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, talaş morfolojisi ve yığıntı talaş oluşumu gibi kriterleri incelemiştir. İşlenebilirlik deneyleri sonucunda, kaplamalı takımlarla yüksek kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma işlemlerinde aşınma ve yüzey pürüzlülüğü açısından kaplamasız takımlara göre daha iyi bir performans elde edilmiştir. Düşük kesme hızlarında meydana gelen yığıntı talaş kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Kaplamalı takımlarla yapılan deneylerde talaş derinliği arttıkça yüzey pürüzlülüğü iyileştiğini, bunun tam tersi olarak kaplamasız takımlarla yapılan deneylerde talaş derinliği arttıkça yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlenmiştir [14]. Gök ve diğerleri yaptıkları çalışmada, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin (ÖKGDD) sinterlenmiş karbür kesici takımlar ile işlenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri deneysel olarak incelenmişlerdir. Düşük östemperleme sıcaklıklarının kesme kuvvetlerinin artmasına neden olurken, daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini gözlemlenmiştir. Takımda genellikle yan yüzey yanak aşınması meydana gelmiştir. Azalan östemperleme sıcaklığı ile takım ömrünün azaldığı belirtilmiştir [15].

Literatür araştırmaları ışığında vermiküler grafitli dökme demir malzemeye uygulanan farklı östemperleme sıcaklık ve sürelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla vermiküler grafitli dökme demir numuneler iki farklı sıcaklıkta (315, 375°C) ve üç farklı bekleme süresinde (60, 120, 180 dakika) östemperleme işlemine tabi tutulmuştur. Kesme işlemi için sementit karbür kesici takımlar kullanılmıştır. CNC freze tezgâhında, kesici uç kataloğu ve literatüre göre belirlenen kesme parametreleri ile yapılan frezeleme işlemleri esnasında oluşan kesme kuvvetleri ve işlenen yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek analiz edilmiştir. Deneyler dört farklı kesme hızı (70, 87, 98 ve 112 m/dak), üç farklı ilerleme miktarı (0.025, 0.0375, 0.05 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (0.5 mm) kuru şartlarda yapılmıştır.

2. MATERYAL VE DENEYSEL METOT

2.1. Deney Numuneleri

Deneysel çalışmalarda iş parçası malzemesi olarak 25x30x100 mm ölçülerinde dinamometreye uygun numuneler kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan VGDD malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 2.1'de verilmiştir.

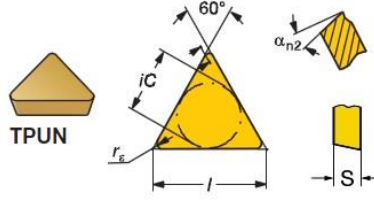
Çizelge 2.1. Deneylerde kullanılan vermiküler grafitli dökme demirin kimyasal bileşimleri (% ağırlık)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Perlitik	3,82	1,804	0,337	0,031	0,015	0,074	0,013	0,002
	Cu	Mg	Sn	Ti	Al	Zn	Bi	Fe
Perlitik	0,879	0,014	0,092	0,0203	0,008	0,082	0,007	Kalan

2.2. Kullanılan Kesici Takım ve Takım Tutucu

Deneylerde SANDVIK Coromant tarafından üretilen kaplamasız sementit karbür (TPUN 16 03 12) kesici uçlar kullanılmıştır. Bu kesici ucun boyutları Çizelge 2.2'de görülmektedir. Takım tutucu olarak ise FK 1517 32 32 16 kodlu tutucu kullanılmıştır.

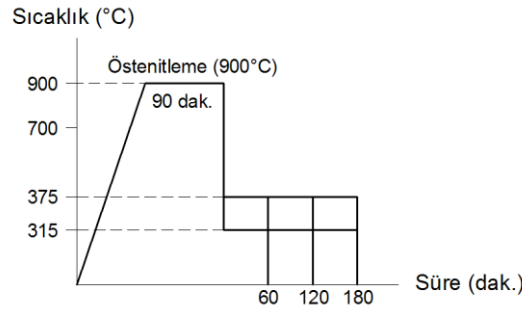
Kesici Uç	TPUN 16 03 12
Kesici Köşe Sayısı	3
Yaklaşma Açısı	90°
Eğim Açısı, α_{n2}	11°
Uç açısı	60°
Kesici Uç Yarıçapı, r_s (mm)	1,2
Kesici Uç Kalınlığı, S (mm)	3,18
Kesici Kenar Uzunluğu (l)	16,5



Çizelge 2.2. Kesicinin şematik gösterimi

2.3. Isıl İşlemler

Malzemelerin östemperleme ısıl işlemleri için seçilen sıcaklık ve süre parametreleri literatürde belirtilen değerlere göre alınmıştır. Östemperleme ısıl işlemi; ön ısıtmadan sonra östenitleme ve izotermal dönüşüm (östemperleme) olarak iki ana kademedен meydana gelmektedir. Isıl işlemler süresince sıcaklık ölçümleri K tipi ısıl çift ile yapılmıştır. Uygulanan ısıl işlemlerin özeti Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Uygulanan ısıl işlemlerin şematik özeti

Östenitleme işlemi için, atmosfer kontrolsüz fırınlar kullanılmıştır. Numuneler bütün ısıl işlem boyunca fırın içerisinde daha önce sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı aynı yere yerleştirilerek, 900°C’de ayarlanmıştır. 900°C sıcaklıktaki östenitleme banyosunda BaCl₂ içerikli nötr tuz (Petrofer HS 550) kullanılmıştır.

Östemperleme işlemi, numuneler geleneksel östenitleme sıcaklığı ~900°C’de 90 dakika östenitlendikten sonra hızlı bir şekilde, 315°C ve 375°C sıcaklıklarındaki %50 oranında potasyum nitrat ve %50 sodyum nitrat (%50 KNO₃ + %50 NaNO₃) karışımından oluşan tuz (Petrofer AS 135) banyosuna daldırılan numuneler farklı sürelerde (60, 120 ve 180 dakika) bekletilmiştir. Daha sonra ise oda sıcaklığına havada soğutulmuştur. Östemperleme işlemi için 2,5 Kw gücünde ve 220V ve 13A, PID kontrol sistemli ±2°C hassasiyetle çalışan Protherm Marka tuz banyosu ünitesi kullanılmıştır. Bütün ısıl işlemler boyunca her numunenin sıcaklığı numune yüzeyine nokta kaynağı ile kaynatılmış termokupl ile gözlenmiştir.

2.4. Malzemenin Sertlik Ölçümü

Deneyde kullanılan malzemeler üzerinde sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde Instron-Wolpert marka DIATESTOR 7551 tipi universal sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Bütün numunelerin sertlik ölçümleri Vickers yöntemi (136° elmas piramit uç ve 30 kgf yük) kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca deneyde kullanılan malzemelerden talaş kaldırılmadan önce sertlik ölçümü yapılmıştır. Cihazlar kalibrasyon bloğu ile kalibre edildikten sonra numunelerin sertlikleri ölçülmüştür. Aynı numune için, talaş kaldırılmadan önce ve talaş kaldırıldıktan sonra 9’ar farklı noktadan olmak üzere 18 noktadan ölçülen sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır.

2.5. İşlenebilirlik Deneyleri

İşlenebilirlik deneyleri, ISO 8688-1’deki deney şartlarına uygun olarak Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü Sanayi CNC laboratuvarında bulunan, Fanuc kontrol ünitesi kullanan, 5,5 kW güce

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

sahip Johnford VMC550 BSD dik işleme merkezinde yapılmıştır. Bu standardın (ISO 8688-1) öngördüğü şekilde seçilen kesme parametreleri Çizelge 2.3'te görülmektedir. Kesme hızı değerleri, imalatçı verilerinden yola çıkarak dört farklı değerde alınmıştır. Her bir deneyde yeni kesici uç kullanılmıştır ve her bir malzeme için 12 deney, toplamda 84 deney yapılmıştır. Vermiküler grafitli dökme demir (VGDD) numuneler iki farklı sıcaklıkta (315, 375°C) ve üç farklı bekleme süresinde (60, 120, 180 dakika) östemperleme işlemine tabi tutulmuştur. Kesme işlemi için sementit karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Deneyler dört farklı kesme hızı (70, 87, 98 ve 112 m/dak), üç farklı ilerleme miktarı (0.025, 0.0375, 0.05 mm/dev) ve sabit talaş derinliğinde (0.5 mm) kuru şartlarda yapılmıştır.

Çizelge 2.3. Her bir deney için kesme parametreleri

Numune	Östemperleme Sıcaklığı (°C)	Östemperleme Süresi (Dakika)	Talaş Derinliği, a (mm)	Kesme Hızı, V (m/dak)	İlerleme Miktarı, f (mm/dev)
Döküm Halde	-	-	0.5	70, 87, 98, 112	0.025, 0.0375, 0.05
Östemperleme Isıl İşlemi Uygulanmış	315, 375	60, 120, 180			

2.6. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü

Yüzey pürüzlülüklerinin ölçümünde, yüzeydeki girinti ve çıkıntıların toplam alanlarının eşit olduğu düzlemi referans kabul ederek, bu düzleme göre üstte ve altta kalan alanların eşit olduğu yeni iki düzlemi bulan ve bunlar arasındaki uzaklığı esas alan, aritmetik ortalama (R_a) değeri yüzey pürüzlülük kriteri olarak dikkate alınmıştır.

Pürüzlülük ölçümünde profil metodu kullanılmıştır. Bu amaçla profil değişimini R_a , R_z ve R_{max} cinsinden okuyabilen ve Resim 2.1'de görülen MAHR-Perthometer M1 taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Cihazla 150 μm 'ye kadar yüzey pürüzlülükleri ölçülmektedir.



Resim 2.1. MAHR- Perthometer M1 taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı

Ölçme işlemine geçmeden önce yüzey pürüzlülük cihazı, yüzey pürüzlülük değeri önceden bilinen kalibrasyon blokları ile kalibre edilmiştir. Numuneler 100 mm boyunda işlendikten sonra yüzeylerin oksitlenmemesi ve ölçme değerlerini etkilememesi amacıyla ölçme işlemi bekletilmeden yapılmıştır. Pürüzlülük ölçüm işlemleri işlenen yüzeyin başlangıcı ile bitimi arasında üç farklı bölgeden (giriş, orta, çıkış) 3'er adet olmak üzere 9 farklı noktadan alınmıştır. Ölçüm sonuçları excel veri tablosuna kaydedilerek ortalamaları alınmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Östemperleme Sıcaklık ve Süresinin Sertliğe Etkisi

Östemperleme uygulanmamış (döküm haldeki) ve östemperleme uygulanmış vermiküler grafitli dökme demir numunelerin sertliklerindeki değişim Çizelge 3.1’de görülmektedir. Östemperleme ısı işlemiyle birlikte sertlik, döküm haline göre artmaktadır. Isıl işlem yapılmamış döküm haldeki numunenin sertliğine göre farklı östemperleme sıcaklığı ve sürelerinde bekletilen numunelerin sertliklerinde 1,7-2,02 kat artış meydana gelmiştir. Östemperleme işlemiyle sertliğin artması, izotermal işlem sırasında meydana gelen mikro yapısal dönüşümün bir sonucudur [16-19].

Çizelge 3.1. Deneylerde kullanılan vermiküler grafitli dökme demire ait sertlikler

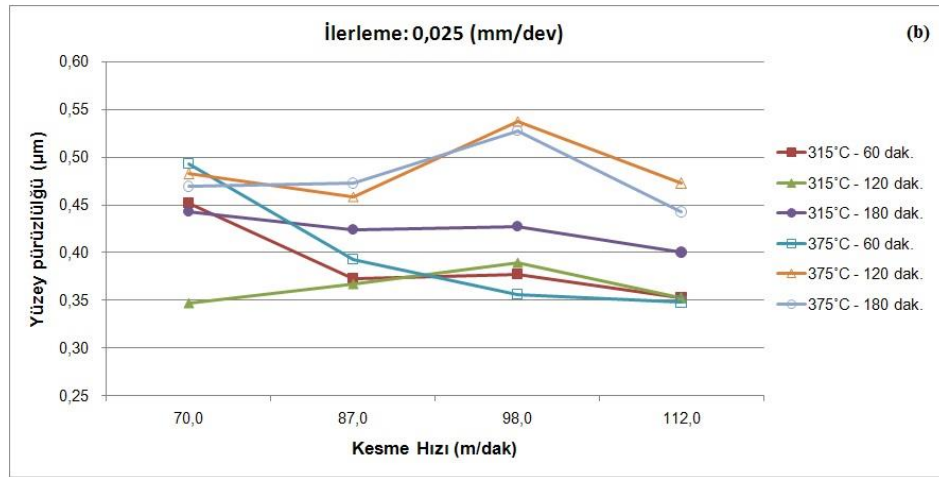
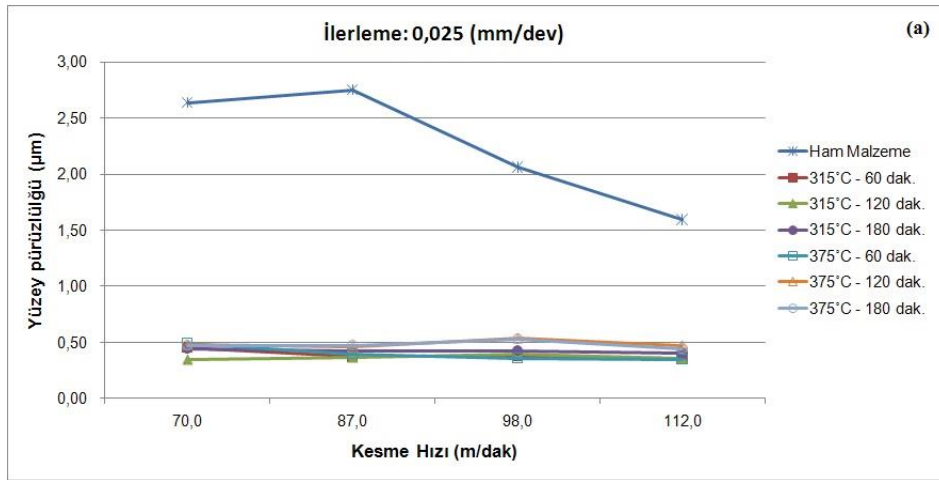
Parça No	Östemperleme Sıcaklığı (°C)	Östemperleme Süresi (Dakika)	Ölçülen Rockwell Sertlik Değeri (HRC)
1	-	Döküm Ham Halde (östemperleme uygulanmamış)	22,57
2	315	60	45,60
3		120	44,07
4		180	42,77
5	375	60	38,37
6		120	41,10
7		180	39,90

315°C’de oluşan alt beynit morfolojisinin sertliğinin, 375°C’de oluşan üst beynit sertliğinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Östemperleme sıcaklığının artması malzemenin sertliği düşürmektedir. Bunun nedeni ise dönüşümün daha hızlı olması ve oluşan fazlar arası mesafelerin azalması ile ösferritik yapının artması ve kalıntı östenit (düşük karbonlu östenit) miktarının azalmasıdır. Kalıntı östenit oda sıcaklığında soğutulması esnasında martensite dönüşmesinden dolayı yapının sertliği artmaktadır. Bilindiği gibi martensit oldukça sert bir fazdır [6, 9, 19-22].

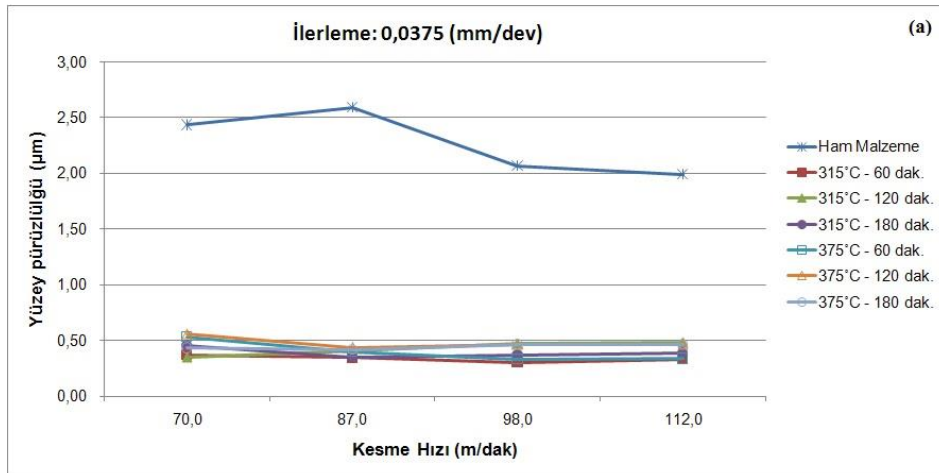
3.2. Yüzey Pürüzlülüğü Açısından Değerlendirme

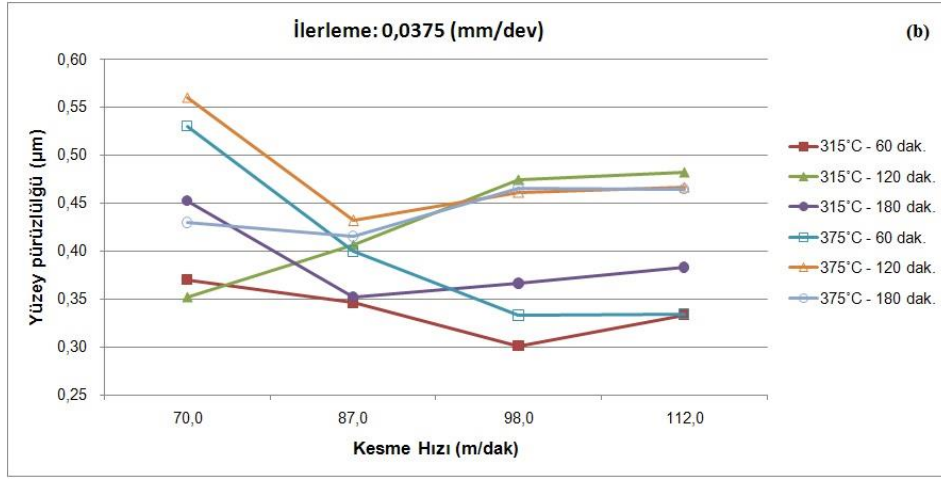
Dökülmüş halde bulunan östemperleme işlemi uygulanmamış numune ve farklı östemperleme sıcaklıkları ve sürelerinde üretilen numunelerin üzerinde yapılan işlenebilirlik deneyleri sırasında ölçülen kesme hızı ve ilerleme miktarına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, her bir kesici takımla talaş kaldırma işlemi sonucunda elde edilen işlenmiş yüzey üzerinde üç farklı bölgede yapılmış ve aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir.

Deneyler neticesinde ısı işlem görmemiş VGDD’in yüzey pürüzlülük değeri, östemperleme ısı işlemi uygulanmış malzemelerin yüzey pürüzlülük değerlerine göre oldukça yüksektir. Bunun nedeni olarak ısı işlem yapılmamış VGDD’in işlenmesi esnasında standart talaş tiplerinin haricindeki toz talaş ile karşılaşılmasıyla açıklanabilir. Isıl işlem yapılmamış VGDD’in morfolojisi, malzemeyi işleme anında talaş kaldırmak için yeteri kadar kırılğan yapmadığını, bundan dolayı toz talaş çıkışını engellemenin zor olduğunu bilinmektedir [11]. Östemperleme ısı işleminin döküm haldeki numunelere göre VGDD malzemelerin yüzey kalitesini ortalama 5,5 kat iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

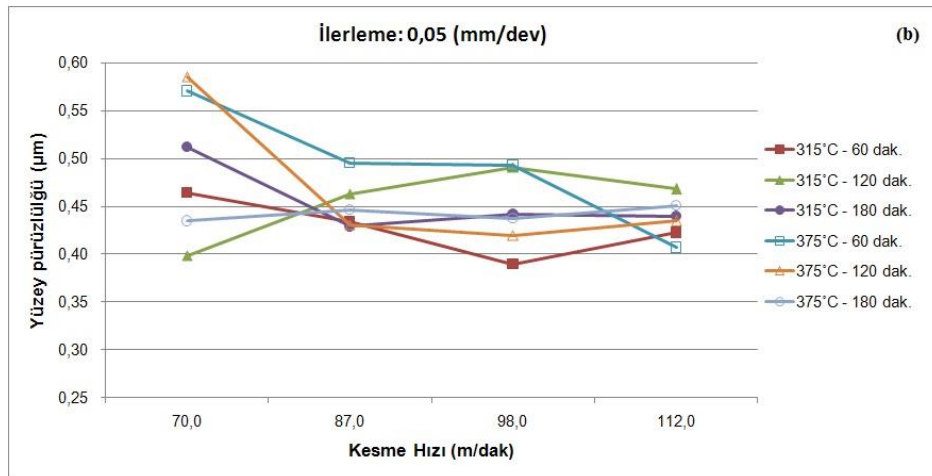
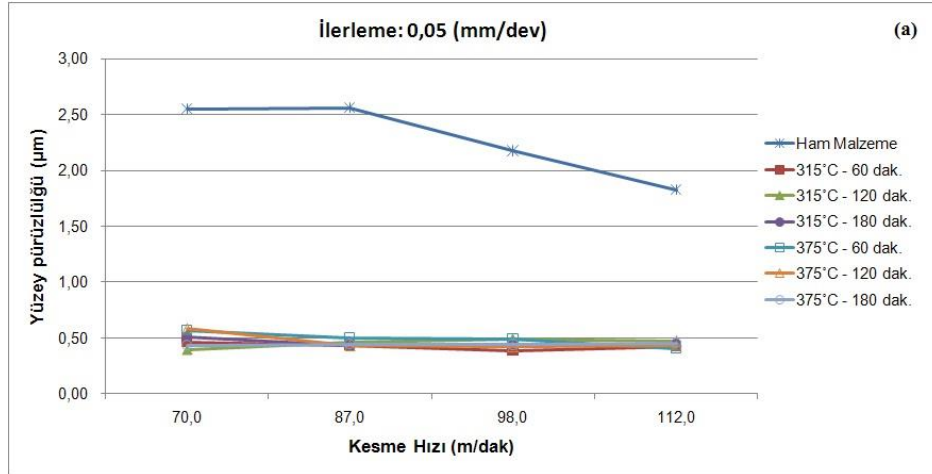


Şekil 3.1. 0,025 mm/dev ilerleme her bir malzeme için (Farklı östempereleme sıcaklık ve süreleri uygulanan malzeme ve östempereleme işlemi uygulanmamış ham malzeme) ilerlemeye bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü a) Tüm Numuneler, b) Sadece östemperelemiş numuneler





Şekil 3.2. 0,0375 mm/dev ilerleme her bir malzeme için (Farklı östemperleme sıcaklık ve süreleri uygulanan malzeme ve östemperleme işlemi uygulanmamış ham malzeme) ilerlemeye bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü a) Tüm Numuneler, b) Sadece östemperlenmiş numuneler



Şekil 3.3. 0,05 mm/dev ilerleme her bir malzeme için (Farklı östemperleme sıcaklık ve süreleri uygulanan malzeme ve östemperleme işlemi uygulanmamış ham malzeme) ilerlemeye bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü a) Tüm Numuneler, b) Sadece östemperlenmiş numuneler

Grafikler ortak değerlendirildiğinde genel olarak kesme hızının artışı ile numunelerin yüzey pürüzlülüğünde iyileşme görülmektedir. Kesme bölgesindeki sıcaklığın artmasıyla beraber talaş akışı ve talaşın biçimlenmesi kolaylaşmaktadır. Bu durum, beklenen şekilde yüzey kalitesini olumlu etkileyerek yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olmaktadır. Ancak kesme hızındaki aşırı artışlar, takımın aşınma sürecine daha erken girmesine sebep olacağından (aşırı yüksek sıcaklıkların kesici takımın sıcak sertliğini olumsuz etkilemesi sebebiyle), kesme hızının belli bir sınıra kadar artırılması yüzey kalitesi açısından olumlu olurken, daha fazla artırılması yüzey kalitesinde tekrar kötüleşmeye sebep olabilmektedir. Bu durum özellikle 0.0375 mm/dev ilerleme hızında görülmektedir. Bu durum daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde benzerlik göstermektedir [1, 6, 7, 15, 23- 26].

En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri daha önce yapılan çalışmalara paralel olarak ısı işlem görmemiş numunelerde görülmektedir. Bu durum ısı işlem görmemiş numunelerin daha düşük mekanik özelliklerinin sahip olması ve karşılaşılan toz talaş morfolojisi ile ilişkilidir [1, 5, 12]. Döküm haldeki numunede en iyi yüzey pürüzlülüğü 112 m/dak kesme hızında $Ra = 1,591 \mu m$ olarak elde edilmiştir. Döküm haldeki numunelerde kesme hızının artışı ile genel olarak yüzey pürüzlülüğünde iyileşme görülmektedir. Kesme hızı %60 artırıldığında genel olarak yüzey pürüzlülüğünün %40 iyileştiği gözlenmektedir.

Östemperleme ısı işlemi uygulanmış numunelerde genel olarak kesme hızının artışı ile yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir. Yine de birkaç sonuçta beklenmeyen değişimlerde gözlenebilmektedir. Bu ani değişimlerin genellikle döküm numunelerin yapılarında bulunan kusurlar (sert fazın miktarı, dağılımı, parçacık büyüklüğü, gözenekli ve homojen olmayan yapısı) ve bu kusurların kesici takımın ucuyla karşılaşmasına atfetmek mümkündür. Genel olarak düşük sıcaklıklarda ($315^{\circ}C$) yapılan östemperleme işlemi işlenen parça yüzeyinde olumlu bir etkiye sahiptir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında ($375^{\circ}C$) ise, yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Çizelge 3.1 incelendiğinde bu durumun östemperleme sıcaklığı azaldıkça malzemelerin mekanik özellikleri dolayısı ile sertliği artması, sertliği artan malzemelerin işlenmesi esnasında daha hassas yüzeyler elde edilmesi ile açıklanabilir [1, 6, 7, 12, 15, 18, 24].

4. SONUÇLAR

Yüzey pürüzlülüğünün, çeşitli kriterlere bağlı olarak değiştiği bilinen bir gerçektir. Bunlardan bazıları; kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği, malzemenin yapısı ve mekanik özellikler olarak sayılabilir. Vermiküler grafitli dökme demirlere uygulanan östemperleme ısı işlem sıcaklık ve süresi de mikro yapı ve mekanik özellikleri etkilediğinden büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada östemperleme ısı işlemi ile VGDD malzemesinin yapı ve özellikleri değiştirilmiştir. Bu değişimler bazı numunelerin işlenebilirliğine ve yüzey pürüzlülüğüne olumlu yansımaktadır.

Östemperleme ısı işlem ve süresinin vermiküler grafitli dökme demirlerin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- ❖ Isıl işlem yapılmamış döküm haldeki numunenin sertliğine göre farklı östemperleme sıcaklığı ve sürelerinde ısı işlem yapılan numunelerin, sertliklerinde 1,7-2,02 kat artış gözlemlenmiştir.
- ❖ En yüksek sertlik değeri, $315^{\circ}C$ 'de 60 dakika bekletilen östemperlenmiş vermiküler grafitli dökme demirlerde ölçülmüştür. Düşük östemperleme sıcaklığında sertliğin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.
- ❖ Döküm haldeki numunelerde, östemperleme ısı işlemi yapılmış numunelerin yüzey pürüzlülüklerine göre kötü bir yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Östemperleme ısı işleminin VGDD malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü ise ortalama 5.5 kat iyileştirdiği gözlemlenmiştir.
- ❖ Genel olarak düşük sıcaklıklarda ($315^{\circ}C$) yapılan östemperleme işlemi işlenen parça yüzeyinde olumlu bir etkiye sahiptir. Yüksek östemperleme sıcaklıklarında ($375^{\circ}C$) ise, yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.

- ❖ Artan kesme hızıyla beraber ortalama yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuç ısıtılmış işlem yapılmamış (ham malzeme) numunelerde 112 m/dak kesme hızında 0.025 mm/dev ilerleme miktarında ölçülmüştür. Isıtılmış işlem yapılmış numuneler içerisinde ise en iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri 315°C'de 60 dakika östemperlenmiş numunede 98 m/dak kesme hızında 0.0375 mm/dev ilerleme miktarında gözlemlenmiştir

5. SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar	Açıklama
BSD	Bilgisayarlı Sayısal Denetim
CBN	Cubic boron nitride (Kübik Bor Nitrür)
CGI	Compacted Graphite Iron (Vermiküler Grafitli Dökme Demir)
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)
HRC	Rockwell C sertlik değeri
ÖVGDD	Östemperlenmiş Vermiküler Grafitli Dökme Demir
VGDD	Vermiküler Grafitli Dökme Demir

6. TEŞEKKÜR

Deneysel çalışmalarda kullanılan CNC tezgâh ve diğer ekipmanları ile çalışmaya katkıda bulunan Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederiz.

7. KAYNAKLAR

- [1] Stefanescu, D. M., (1988), "Compacted graphite iron", *ASM Handbook*, 1:1480-1489
- [2] Murthy, V.S.R, Kishore, and S Seshan, (1985). " Vermicular graphite cast iron-current state of the art", *Sadhana*, Vol. 8, Part 4, 361-372.
- [3] Özdemir, U. , Erten, M. (2003), "Talaşlı imalat sırasında kesici takımında meydana gelen hasar mekanizmaları ve takım hasarını azaltma yöntemleri", *Havaacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, cilt 1, sayı 1, (37-50).
- [4] Şeker, U. (1997). Takım tasarımı, Takım Tasarımı Ders Notları, Ankara.
- [5] Mavi, A. (2008). "Vermiküler grafitli dökme demirin işlenebilirliğinin deneysel olarak araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [6] Seyfi, A., (2006). "Östemperlenmiş GGG60 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [7] Şeker, U., Hasırcı, H., (2005). Evaluation of machinability of austempered ductile Irons in terms of cutting forces and surface quality, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.173, pp.260-268.
- [8] Zimba, J., Simbi, D.J., and Navara, E.(2003), Austempered ductile iron: An alternative material for moving components, *Cement and Concrete Composites*, C:25, s:643- 649.
- [9] Gök, K. (2006). " KGDD malzemelerde östemperleme işleminin kesme parametrelerine ve takım ömrüne etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [10] Kuş, H., (2007). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [11] Stefanescu, D. M., (1988), Compacted graphite iron, *ASM Handbook*, 1:1480-1489.
- [12] Kırçali, K., Çakır, M., (2006). "Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme sıcaklığı ve zamanın işlenebilirliğe etkilerinin incelenmesi", TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi 26-28 Nisan 2006, Balıkesir.
- [13] Karabulut, Ş., (2012). Vermiküler grafitli dökme demirin (VGDD) frezelemedeki işlenebilirliğinin deneysel olarak araştırılması ve yapay sinir ağları ile modellenmesidir, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [14] Yazman, Ş., (2006). Östemperlenmiş ferritik küresel grafitli dökme demirlerde kesme parametrelerinin işlemeye etkilerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [15] Gök, K., Uçun, İ., Aslantaş, K., ve Taşgetiren, S., (2007). Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin sinterlenmiş karbür kesici takım ile tornalama işleminde takım performansının incelenmesi, Gazi Üniversitesi, *Müh. Mim. Fak. Der.* Cilt 22, No 4, 739-744.
- [16] Ghang, C. H. Shih, T.S., (1994). "Study on isothermal transformation of Austempered Ductile Iron", *AFS Transactions*, Vol. 119.
- [17] Akray, Seçkin, İ., (2007). "Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] Ovalı, İ. , Mavi, A., (2011). "Ösferrit hacim oranının çift fazlı küresel grafitli dökme demirlerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey.
- [19] Janowak, J.F., Gundlach, R.B., (1983). "Development of a ductile iron for commercial austempering", *A.F.S. Transactions*, 91:377-388.
- [20] Mavi, A., Korkut, İ., (2014). "The effects of austempering temperature and time on the machinability of vermicular graphite iron", *Materials Testing*: Vol. 56, No. 4, 289-293.
- [21] Zimba, J., Simbi, D.J., and Navara, E.(2003), "Austempered ductile iron: An alternative material for moving components", *Cement and Concrete Composites*, C:25, s:643- 649.
- [22] Şahin, Y., Durak, O (2007). "Abrasive wear behaviour of austempered ductile iron", *Materials and Design*,1844–1850.
- [23] Ahmadabadi, M.N., Khazai, B.A., and Bahmani, M., (1997). Effect of austempering variables on the mechanical properties of Ni-Mn-Cu ADI, *AFS Transactions*, C: 74, s: 501-505.
- [24] Hayrynen, K.L., (1998). Another avenue for ductile iron foundries, austempered ductile iron presents a horizon of opportunities for foundries, *Modern Casting*, s: 28-30.
- [25] Günay, M., (2003). Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 84-101.
- [26] Kurt, A., (2006). Talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmelerin deneysel olarak incelenmesi ve matematiksel modellerinin oluşturulması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 115-215.

LAZER KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN Ti6Al4V ALAŞIMININ MİKRO YAPI VE İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Mehmet ALTUĞ^{a*}, Mehmet ERDEM^b

^a*İnönü Üniversitesi, Malatya MYO, Makine ve Metal Teknolojileri, Malatya, Türkiye*
mehmet.altug@inonu.edu.tr

^b*İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, Malatya, Türkiye*
mehmet.erdem@inonu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada 140 A akım ve farklı frekans değerleri kullanılarak 3 mm kalınlığındaki Ti6Al4V alaşımı plakalar lazer kaynağı ile birleştirilmiştir. Farklı frekans değerlerinin mikro sertliğe, mikro yapıya ve tel erozyonla işlenebilirliğine etkisi araştırılmıştır. Kaynak metali mikro yapısının ince lameler titanyum martenzit fazı (α') ve birincil β fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Kaynak metalinden ana metale doğru ilerledikçe lameler asiküler α' faz yapısının değiştiği tespit edilmiştir. Kaynak metali mikro sertlik değerleri ısıdan etkilenen bölgenin sertlik değerlerine kıyasla yüksek olduğu belirlenmiştir. Isıdan etkilenen bölgenin kerf değeri kaynak metali kerf değerine kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kaynak metali ve ısıdan etkilenen bölgenin her ikisinde de T_{off} ve W_s değerleri ana metale kıyasla artmıştır. Bu değerlere bağlı olarak hem ısıdan etkilenen bölgenin hemde kaynak metalinin kerf değerlerinde artış görülmüştür. Ancak W_t değerinin artışı ile bu iki bölgedeki kerf değerleri azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Ti6Al4V, Lazer kaynağı, Mikro yapı, WEDM, Kerf

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MACHINABILITY PROPERTIES OF THE Ti6Al4V ALLOY WELDED BY LASER WELDING

Abstract

In this study, Ti6Al4V alloy plates of 3 mm thickness via 140 A current and values of different frequency were joined with laser welding. The effect of different frequency values were investigated for micro hardness, micro structure, and machinability in wire electrical discharge machining. It was found that the micro structure of welded metal consists of thin lamella titanium (α') and primary β phases. It was determined, when moving from weld metal towards the base metal, the structure of lamella acicular α' phase was altered. It was observed that the micro hardness values of weld metal were higher than the hardness values of the heat affected zone. It was analyzed that the kerf values of the heat affected zone were lower than the kerf weld metal values. The T_{off} and W_s values in the weld metal and heat affected zone were increased compared to the base metal. The increases in the kerf values were observed both in the heat affected zone and the weld metal, depending on these values. Therefore, the kerf values of these two zones were decreased by an increase in the W_t magnitude.

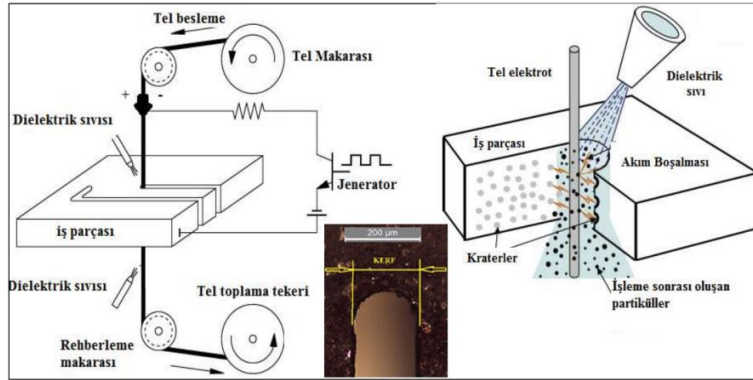
Keywords: Ti6Al4V, Laser welding, Microstructure, WEDM, Kerf

1. GİRİŞ

Titanyum alaşımları üstün mekanik ve fiziksel özellikleri nedeni ile medikal tıp, uzay, denizcilik, enerji, kimya ve otomotiv uygulamalarında mühendislik malzemesi olarak çok geniş bir kullanım alanı vardır [1-4]. Ti-6Al-4V alaşımı kullanılan titanyum alaşımlarının yaklaşık %50'sini oluşturur [2,5]. Üstün korozyon direnci ve mekanik özelliklere sahip olmasının yanında biyouyum özelliği ve kaynaklanabilmesi nedeni ile de tercih sebebi olmaktadır [1,6].

Akman ve arkadaşları [7] östenitik paslanmaz çeliklerin ve Al alaşımlarının kaynağında kullanılan kaynak ve ekipmanlarının ticari saflıktaki titanyum ve alaşımlarının kaynağında da kullanılabilmesini belirtmişlerdir. Liu ve arkadaşları [8] lazer kaynağında küçük bir alana etkili yoğunlukta enerji girişi olması, ısıdan etkilenen bölgenin (ITAB) darlığı ve mikro yapısal değişikliklerin sınırlı olması nedenlerinden dolayı Ti alaşımlarının lazer kaynağı ile birleştirilebileceğini ifade etmişlerdir. Baghjari ve Akbari Mousavi [9] Nd:YAG pulsed lazer kaynağında düşük ısı girdisi nedeni ile ITAB'ın genişliği diğer fizyon kaynaklarına kıyasla göreceli olarak çok küçüktür. ITAB genişliği yaklaşık olarak 25 μm dir. Gao ve arkadaşlarına göre 500 $^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda Ti6Al4V alaşımı zararlı gaz absorbe etmeye oldukça duyarlıdır. Bunun sonucu olarak kararsız yapı oluşabilir ve mekanik özellikler zayıflar. ITAB'ın dar olması kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerini artırır. Wang ve arkadaşlarına göre Ti alaşımlarının lazer kaynağı esnasında mekanik özellikleri korumak için kaynak bölgesini koruyucu gaz ile korumanın kritik bir önemi vardır. Onlar koruyucu gaz kullanımının süneklikteki kayıpları azalttığını ifade etmişlerdir.

Geleneksel olmayan işleme tekniklerinden tel erozyon ile işleme tekniği yüksek sertlik derecelerine sahip içeren karmaşık geometriye sahip metal parçaları yüksek hassasiyetle işleyebilme kabiliyetinden dolayı günümüz işleme teknolojileri arasında önemli yer tutmaktadır [10,11].



Şekil 1. Tel erozyon ile işleme tekniği ve kerf [10,11].

Tel erozyonda kerf analizi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Araştırmacılar Taguchi deney tasarımı kullanarak, kerf ve yüzey pürüzlülüğünün minimizasyonu ve MRR'nin maksimizasyonuna yönelik çalışmalar yapmışlardır [12-16]. Gupta vd. (2012), Tosun ve Coğun (2004) çalışmalarında genel olarak kerf değerlerinin parametrelerin artışına bağlı olarak arttığını belirtmişlerdir [17,18]. Lazer kaynağı ile birleştirilen Ti6Al4V alaşımı plakaların tel erozyonla işlenebilirliğine yönelik çalışmaları az olması nedeni ile bu alandaki çalışmalara katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada 140 A akım ve üç farklı frekans değerleri kullanılarak 3 mm kalınlığındaki Ti6Al4V alaşımı plakalar lazer kaynağı ile birleştirilmiştir. Frekans değerlerindeki değişimin mikro sertliğe, mikro yapıya etkileri incelenmiş ve bu bağlamda tel erozyonla işlenebilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada Ti-6Al-4V alaşım levhaların lazer kaynağı ile birleştirilmesinden sonra tel erozyonda işlenebilirliği incelenmiş ITAB ve KB'deki kerf değerlerinin farkları tespit edilmeye çalışılmıştır.

2. MALZEME VE METOT

Bu çalışmada 3x52x100 mm ebatlarındaki kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilen Ti6Al4V levhalar kullanılmıştır. Lazer kaynak işleminden önce numune yüzeyleri asetonla ve parlatma diski ile temizlenmiştir. Levhalar mengenede alın altına sabitlenmiş ve CNC lazer kaynak makinesinde farklı frekans değerleri kullanılarak birleştirilmiştir. Lazer kaynak parametreleri Tablo 2 verilmiştir. 200 W kapasiteli lazer Nd:YAG Lazer kaynak makinesi kullanıldı. 1064 nm lazer dalga boyu ve 30 mm/dakika lazer ilerleme hızı kullanılmıştır. Koruyucu gaz olarak %99.99 saflıkta argon kullanılmıştır.

Tablo 1. Ti6Al4V levhaların kimyasal bileşimi

Element	Ti	Al	V	H	Fe
%	Kalan	5.5-6.5	3.5-4	0.01	0.40 mak.

Tablo 2. Lazer kaynak parametreleri

Parametreler	Deney Sırası		
	1-a	2-b	3-c
Akım (A)	140	140	140
Frekans (Hz)	36	40	44

Levhaların tel erozyonda kesme işlemleri yüksek hassasiyetli ONA AF 25 marka wire electrical discharge machining (WEDM) tezgahında yapılmıştır. Tezgahta 0,25 mm çapında çinko bakır tel kullanılmıştır. Deney parametreleri için belirlenen seviyeler (Tablo 3) Ti-6Al-4V alaşımının en düşük kerf değerlerinin elde edildiği çalışmalardan belirlenmiştir [10]. Ayrıca taguchi L8 deney tasarımı yöntemi kullanılarak WEDM'de deney tasarımı yapılmıştır. Kerf ölçümleri LEICA DM4000M optik mikroskop cihazı ile numunelerin 3 farklı noktasından ölçülüp ortalama değerleri belirlenmiştir.

Tablo 3. Tel erozyon parametreleri

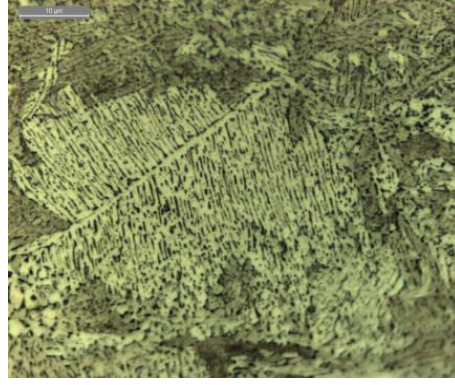
Parametre	Değer	
Time off (μ s)	50	100
Wire speed (m/min)	5	10
Wire tension (g)	4	8

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Kaynaklı numunelerin her biri metalürjik incelemeler için enine kesitte kesilmiştir. Zımparalama ve parlatma işleminden sonra Kroll's kimyasalında (4mL HNO₃, 2mL HF and 94mL of H₂O) dağlanmıştır. LEICA DM4000M cihazda optik mikroskop ve Shimadzu GMV-20 cihazında 100 gr yük kullanılarak mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri enine kaynak kesitinden 250 μ m aralıklarla alınmıştır. Her bir bölge için üç adet sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler ve değerlendirmeler neticesinde tel erozyon parametreleri belirlenmiş ve işlenebilirliği incelenmiştir.

3.1 Mikro yapı

Şekil 2'de Ti6Al4V alaşımının optik mikroskop resmi görülmektedir. Tavlanmış mikro yapı α ve β fazlarından oluşur. Açık renkli bölgeler hegzagonal sıkı paket α fazını, ince lamelli koyu bölgelerde hacim merkezli kübik yapıdaki β fazını temsil etmektedir. Genelde α fazının tane sınırlarında β fazı bulunmaktadır. Benzer mikro yapının varlığı Jovanovic ve arkadaşları tarafından da ifade edilmiştir [19].



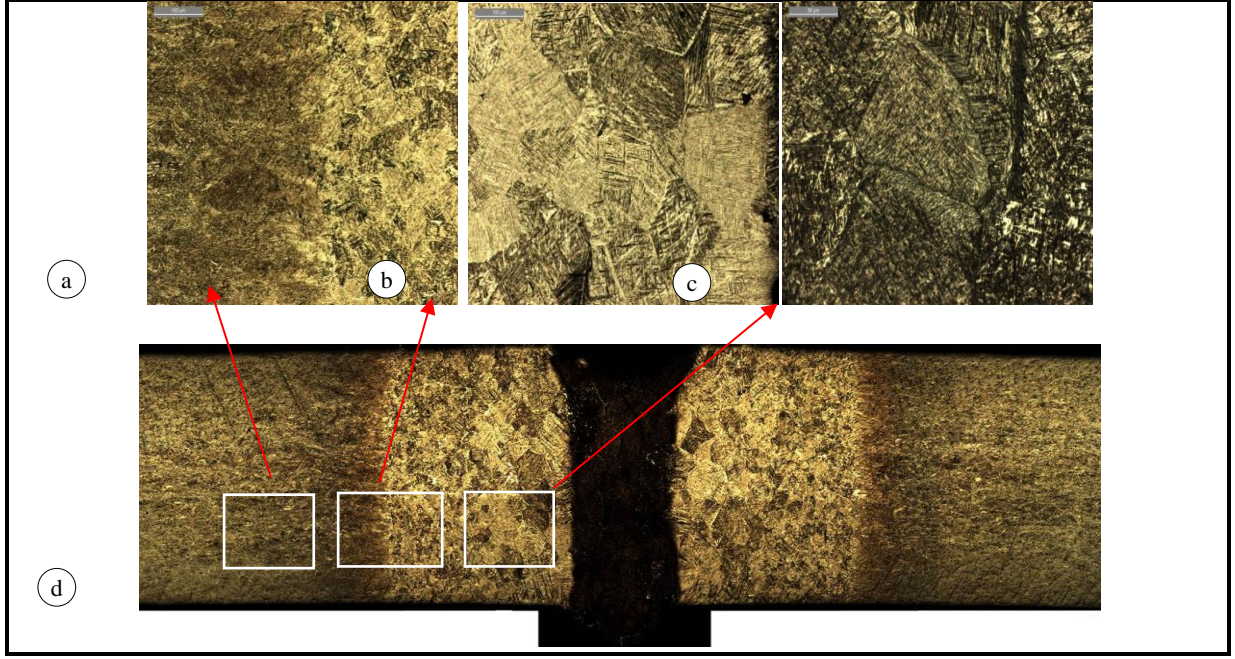
Şekil 2. Ti6Al4V alaşımı ana metal mikro yapısı (x1000)

Şekil 3’de farklı frekans değerleri ile birleştirilen Ti6Al4V levhaların kesit görüntüsü verilmiştir. Lazer gücü arttıkça yani frekans değeri arttıkça kaynak metali hacmi ve nüfuziyetin arttığı görülmektedir. ITAB’ın ergime bölgesine yakın olan kısmında yüksek sıcaklık nedeni ile tanelerin kabalaştığı görülmektedir. ITAB’ın ana metale yakın olan bölgesinde ise düşük sıcaklık nedeni ile tanelerdeki irileşme daha azdır. Baghjari ve Akbari Mousavi martenzitik paslanmaz çelik levhaları lazer kaynağı ile birleştirmişler ve lazer gücünü artırdıklarında kaynak metali hacminin arttığını ifade etmişlerdir. Akımı artırıp kaynak hızını azaltarak lazer gücünü artırmışlardır.



Şekil 3. Lazer kaynağı ile farklı parametrelerle birleştirilen levhaların kesit görüntüsü (x50)

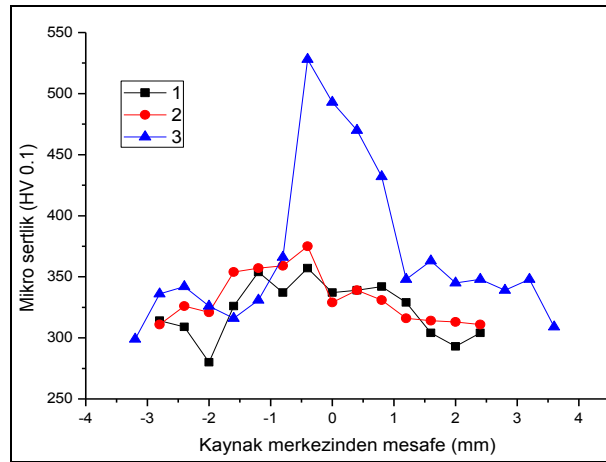
Şekil 4’de 3 nolu parametrelerle birleştirilen Ti6Al4V levhaların kesit görünümü ve mikro yapıları ve verilmiştir. Bu detay mikro yapı resimlerinde ana metal (a), ITAB (b) ve kaynak metali (c) bölgeleri açıkça görülmektedir. Kaynak metali mikro yapısının ince iğnemsiz titanyum martenzit fazı (α') ve birincil β fazlarından oluştuğu düşünülmektedir. Denge şartlarında katılaşma esnasında öncelikle β fazı oluşur. Beta geçiş sıcaklığının altına yavaşça soğutulduğunda ise beta tane sınırlarında alfa fazı çekirdeklenir ve lameler formunda büyür. Ortaya çıkan lameler yapı lameler α olarak anılır. Havada hızlı soğutma yapıldığında asiküler alfa fazı (α') olarak adlandırılan ince iğnemsiz α' fazı oluşur. Belirli orta soğutma hızlarında Widmanstatten yapı gelişir. Bu yapı artan soğutma hızlarında incelikir. Beta fazı widmanstatten alfa plakalar arasında ince bir plaka olarak yer alır. Alfa plakaları beta {110} düzlemine paralel olacak şekilde büyür (Katzarov, Malinov, ve Sha). Lazer kaynağında ısı girdisinin az olması ve kaynak metali soğuma hızının yüksek olması nedeni ile birincil β tane sınırlarında ince iğnemsiz titanyum martenzit fazının (α') oluştuğu düşünülmektedir. Gao ve arkadaşları TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı ile birleştirdikleri Ti6Al4V levhaların ergime bölgesi mikro yapısının asiküler α' ve çok azda ikincil α fazlarından oluştuğunu tespit etmişlerdir. Lazer kaynağı ile birleştirdikleri Ti6Al4V levhaların ergime bölgesi mikro yapısının ise tamamen asiküler α' fazından oluştuğunu belirlemişlerdir.



Şekil 4. 3 nolu parametrelerle birleştirilmiş levhaların kesit ve detay mikro yapıları

3.2 Mikro sertlik sonuçları

Kaynaklı numunelerin mikro sertlik değerleri Şekil 5’de verilmiştir. Ana metal mikro sertlik değeri ortalama 305 HV ve kaynak metalinin en yüksek mikro sertlik değeri 528 HV dir. Bu sonuçlar, ana metalden kaynak metaline doğru ilerledikçe numunelerin sertlik değerlerinin arttığını göstermiştir. 3 nolu parametrelerle birleştirilen kaynaklı numunenin sertlik değeri diğer parametrelerle birleştirilen numunelere kıyasla yüksek çıktığı görülmüştür. Sertlik değerindeki bu yükselişin nedeni ısı girdisinin fazla ve soğuma hızının yüksek olmasıdır. 36 ve 40 Hz frekans değerlerinde kaynak metal hacmi ve ITAB genişliği 44 Hz frekans değerine kıyasla daha dardır. Bu nedenle lazer kaynağı sonrasında 3 nolu parametrelerle birleştirilen levhaların ITAB ve kaynak metal bölgelelerinde asiküler α' faz oranının daha fazla olduğu düşünülmektedir. Bu faz (asiküler α') titanyum martenzit olarak anılır ve sertliği yüksek bir fazdır. Yapılan bir çalışmada Ti6Al4V alaşımı levhalara farklı sıcaklıklardan su verme işlemi yapılmış ve su verme sonunda mikro yapısı asiküler α' fazından oluşan numunenin sertliğinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5. Kaynaklı numunelerin mikro sertlik değerleri.

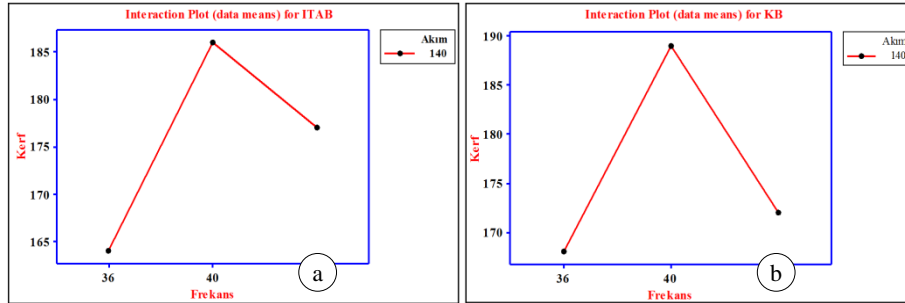
3.3 Kerf

Lazer kaynağı ile birleştirilen levhaların mikro sertlik ve mikro yapı analizleri neticesinde farklı tel erozyon parametreleri ile işlenebilirliği incelenmiştir. Lazer kaynağı ile birleştirmiş Ti6Al4V levhaların Taguchi L8 deney tasarımı sonucu elde edilen ITAB ve KB'lerine ait kerf değerleri Şekil. 2'de verilmiştir.

Deney No	Toff	Wt	Ws	ITAB	KB	S/N
1	50	4	5	164	168	-44,5062
2	50	4	10	186	189	-45,5292
3	50	8	5	174	174	-44,811
4	50	8	10	178	181	-45,1536
5	100	4	5	186	189	-45,5292
6	100	4	10	177	181	-45,1536
7	100	8	5	172	173	-44,7609
8	100	8	10	184	189	-45,5292

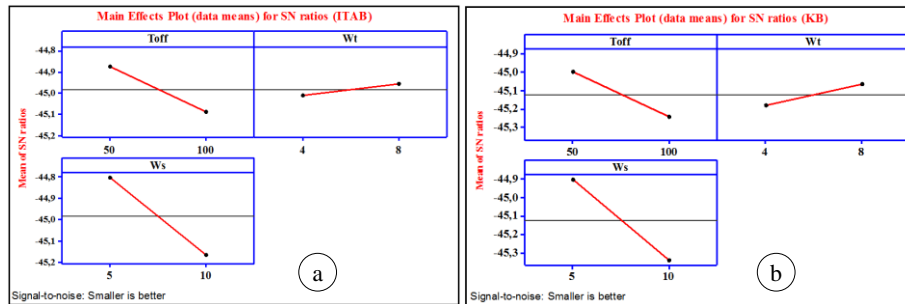
Şekil 6. ITAB ve KB kerf değerlerinin karşılaştırılması

Kaynak parametrelerinin kerf değerleri üzerindeki etkileri Şekil 7'de gösterilmektedir. Burada kaynak parametrelerinin ITAB bölgesindeki kerf değerleri KB'deki kerf değerlerine nazaran daha düşük çıkmaktadır. Bu farklılığın temel nedeninin ITAB ve KB oluşan yeni sertlik değerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca ITAB ve KB en düşük kerf değerleri frekansın 36 Hz olduğu durumlarda elde edilmiştir (Şekil 7). Ancak ITAB ve KB frekans değerinin 40 olduğu kesimlerde kerf değerlerinde önemli bir artış görülmüş frekansın 44 olduğu durumda kerf değerleri tekrar düşüş göstermiştir.



Şekil 7. Lazer kaynak parametrelerinin kerf üzerindeki etki grafikleri a) ITAB b)KB

ITAB ve KB'deki kerf değerlerinin tel erozyon parametreleri ile ilişkisi Şekil 8'de gösterilmektedir. ITAB ve KB'lerinin her ikisinde de T_{off} ve W_s değerlerinin artışı ile kerf değerlerinde de bir artış görülmüştür. Ancak W_t değerinin artışı ile hem ITAB hem de KB'deki kerf değerlerinde bir azalma görülmüştür.



Şekil 8. Tel erozyon parametrelerinin a) ITAB ve b) KB'deki SN etki grafikleri

4. SONUÇLAR

Ti6Al4V alaşımı levhalar farklı frekans değerleri kullanılarak lazer kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Bu kaynaklı levhaların mikro sertlik, mikro yapı ve tel erozyonla işlenebilirlikleri araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur;

- Tavlanmış ana metal mikro yapısının α ve β fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Lazer gücü arttıkça (frekans değeri) kaynak metali hacmi ve nüfuziyetin arttığı görülmüş ve ITAB'ın ergime bölgesine yakın olan kısmında yüksek sıcaklık nedeni ile tanelerin kabalaştığı tespit edilmiştir. Kaynak metali mikro yapısının ince iğnemi titanyum martenzit fazı (α') ve birincil β fazlarından oluştuğu belirlenmiştir. Kaynak metalinden ana metale doğru ilerledikçe iğnemi asiküler α' faz yapısının bozulduğu tespit edilmiştir.
- Ana metal mikro sertlik değeri ortalama 305 HV ve kaynak metalinin en yüksek mikro sertlik değeri 528 HV olduğu tespit edilmiştir. Ana metalden kaynak metaline doğru ilerledikçe numunelerin sertlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Sertlik değerindeki bu yükselişin, ısı girdisinin fazla ve soğuma hızının yüksek olması nedeni ile oluşan asiküler α' fazından kaynaklandığı belirlenmiştir.
- ITAB bölgesindeki kerf değerlerinin, KB'deki kerf değerlerine nazaran daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu farklılık lazer kaynağı sonrasında oluşan mikro yapı ve sertliğe bağlı oluşmuştur.
- ITAB ve KB'lerinin her ikisinde de T_{off} ve W_s değerlerinin artışı ile kerf değerlerinde de bir artış görülmüştür. Ancak W_t değerinin artışı ile hem ITAB hem de KB'deki kerf değerlerinde bir azalma görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje birimi tarafından 2012/164 nolu proje ile desteklemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Safdar, A., Wei, L.Y., Snis, A., Lai, Z. 2012. "Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V", Materials Characterization, Volume 65, Pages 8-15.
- [2] Ge, L., Tian, N., Lu, Z., You, C. 2013. "Influence of the surface nanocrystallization on the gas nitriding of Ti-6Al-4V alloy", Applied Surface Science, Volume 286, Pages 412-416.
- [3] Bandyopadhyay, A., Espana, F., Balla, V.K., Bose, S., Ohgami, Y., Davies, N.M. 2010. "Influence of porosity on mechanical properties and in vivo response of Ti6Al4V implants", Acta Biomaterialia, Volume 6(4), Pages 1640-1648.
- [4] Sha, W., Malinov, S. 2009. Titanium alloys: modelling of microstructure, properties and applications, CRC Press, USA,
- [5] Arrazola, P.J., Garay, A., Iriarte, L.M., Armendia, M., Marya, S., Le, MaîtrF. 2009. "Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3), Journal of materials processing technology", Volume 209, Pages 2223-2230.
- [6] He, L., Manshadi, A.D., Dippenaar, R.J., 2012. "The evolution of microstructure of Ti-6Al-4V alloy during concurrent hot deformation and phase transformation", Mater. Sci. Eng. A, Volume 549, Pages 163-167.
- [7] Akman, E., Demir, A., Canel, T., Sınmazçelik, T. 2009. "Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys", Journal of materials processing technology, Volume 209, Pages 3705-3713.
- [8] Liu, J., Watanebe, I., Yoshida, K., Atsuta, M. 2002. "Joint strength of laser-welded titanium", Dental Materials, Volume 18, Pages 143-148.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [9] Baghjari, S.H., Akbari Mousavi, S.A.A. 2013. "Effects of pulsed Nd: YAG laser welding parameters and subsequent post-weld heat treatment on microstructure and hardness of AISI 420 stainless steel", *Materials Design*, Volume 43, Pages 1-9.
- [10] Altuğ, M., Erdem, M., Ozay, C. 2015. "Experimental investigation of kerf of Ti6Al4V exposed to different heat treatment processes in WEDM and optimization of parameters using genetic algorithm", *Int.J.Adv. Manuf. Technol.*, Volume 78, Pages 1573–1583.
- [11] Özkul, İ., Şeker, U., Buldum, B.B., Akkurt, A. 2012. "Sıcak iş takım çeliklerinden Dievar takım çeliğinin tel erozyon ile işlenebilirliğinin araştırılması", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, cilt 9, sayı 4, s. 31-44.
- [12] Yan, M.T., Huang, P.H. 2004. "Accuracy Improvement of WireEDM by Real-Time Wire Tension Control", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Volume 44(7–8), Pages 807–814.
- [13] Hari, S., Khanna, R. 2011. "Parametric optimization of Cryogenic treated D-3 for cutting rate in wire electrical discharge machining", *J Eng. Technology*, Volume 1(2), Pages 59–64.
- [14] Jangra, K., Jain, A., Grover, S. 2010. "Optimization of multiple-machining characteristics in wire electrical discharge machining of punching die using grey relational analysis", *Journal of Scientific and Industrial Research*, Volume 69, Pages 606-612.
- [15] Kansal, H.K., Singh, S., Kumar, P. 2005. "Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 169(3), Pages 427–436.
- [16] Mahapatra, S.S., Patnaik, A. 2007. "Optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process parameters using Taguchi method", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Volume 34(9-10), Pages 911-925.
- [17] Gupta, P., Khanna, R., Gupta, R.D., Sharma, N. 2012. "Effect of process parameters on kerf width in WEDM for HSLA using response surface methodology", *Journal of Engineering and Technology*, Volume 2(1), Pages 1-6.
- [18] Tosun, N., Cogun, C., Tosun, G., 2004. "A study on kerf and materials removal rate in wire electrical discharge machining based on taguchi method", *J. Mater. Process. Technol.*, Volume 152, Pages 316-322.
- [19] Jovanovic, M.T., Tadic, S., Zec, S., Miskovic, Z., Bobic, I., 2006. The effect of annealing temperatures and cooling rates on microstructure and mechanical properties of investment cast Ti6Al4V alloy. *Mater.Des* Volume 27, Pages 192–199

KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞLI İMALATI

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞLI İŞLENEBİLME PERFORMANSI

Uğur Köklü^a, Yusuf Kaynak^b, Okan Demir^c, Ahmet Avcı^c, Ayhan Etyemez^d

*a, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü,
Karaman/TÜRKİYE, ugurkoklu@kmu.edu.tr*

*b, Marmara Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul/TÜRKİYE,
yusuf.kaynak@marmara.edu.tr*

*c, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Konya/TÜRKİYE,
okandemir@selcuk.edu.tr, aavci@selcuk.edu.tr,*

d, Nikken Türkiye, İstanbul/TÜRKİYE, ayhan@nikken.com.tr

Özet

Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemeler yaygın kullanılan cam elyaf takviyeli ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelere nazaran arzu edilen üstünlüklere sahip olmakla birlikte, bu malzemelerin talaşlı imalatı konusunda yeterince çalışma yapılmamıştır. Bu çalışma da fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin temel talaşlı işlenebilme performanslarının araştırılması için farklı ilerleme miktarı ve devir sayıları kullanılarak testler yapılmış ve bu parametrelerin ilerleme kuvveti, tork ve hasar faktörüne etkisi belirlenmiştir. İlerleme oranının, devir sayısına oranla ölçülen çıktıları daha fazla etkilediği gözlemlenmiştir. İlâveten, karbon elyaf/epoksi tarafına oranla cam elyaf/epoksi tarafında hasar faktörünün daha büyük olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit, delme süreci, hasar faktörü

MACHINING PERFORMANCE OF FUNCTIONALLY GRADED COMPOSITE MATERIALS

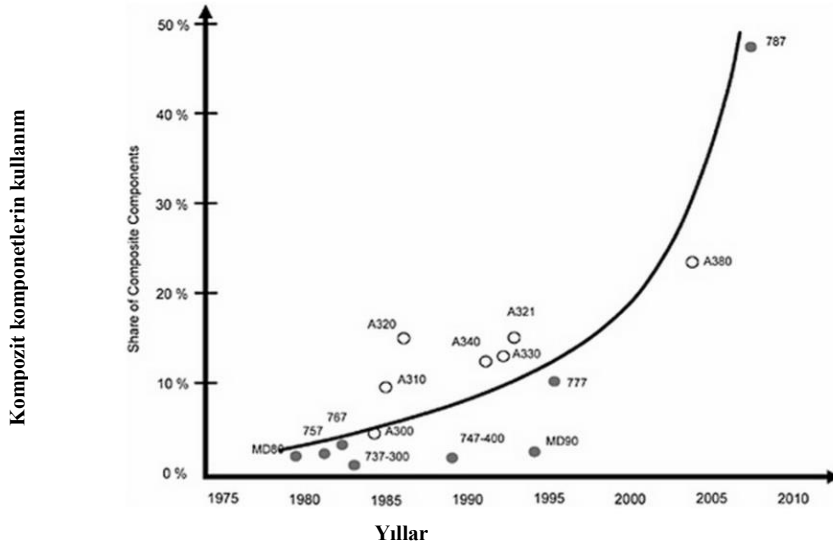
Abstract

Compare to widely used composite materials such as carbon fiber reinforce composite or glass fiber reinforce composite, functional graded composite has much desired properties, however, there is not enough studies on machining performance of this advanced material. To understand fundamental machining performance of this material in drilling operation, a series of drilling tests have been conducted under various feed rates and cutting speed to observe resulting thrust force, torque and delamination factor. Feed rate is found to have greater effects on thrust force, torque and delamination factor in comparison with spindle speed. This study also shows that delamination factor is much larger at the exit of glass fiber/epoxy side of functionally graded composite in comparison with carbon fiber/epoxy side.

Keywords: Functional graded composite, drilling process, delamination factor

1. GİRİŞ

Havacılık ve otomotiv gibi endüstrilerde yüksek performans gösteren ve aynı zamanda hafif olan malzemelere ilgi son yıllarda artış göstermiştir. Bu durum ise kompozit malzemelerin öne çıkmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, kompozit malzemeler sahip oldukları üstün niteliklerden dolayı diğer mühendislik malzemelerine alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır [1]. Kompozit malzemelerin havacılıkta kullanımının yaygınlaşması ile ilgili veriler Şekil 1’de sunulmuştur. Görüldüğü üzere, bu malzemelerin kullanımı her geçen yıl artmaktadır. Kompozit malzemelerden yapılan komponentlerin montajını gerçekleştirebilmek için bu malzemelere delik delinmesi gerekli ve kaçınılmaz bir süreçtir [1]. Delik delme sürecinde genellikle geleneksel talaşlı imalat yöntemleri tercih edilmekte olup [2], bu yöntem özellikle kompozit malzemenin homojen olmamaları ve anizotropik davranış göstermeleri nedeni ile; geleneksel yöntemlerle talaşlı imalatı, özellikle en sık tercih edilen delik delme operasyonu sürecinde birtakım sorunlara neden olmaktadır [3]. Kompozit malzemelere geleneksel yöntemlerle delik delinmesi sürecinde karşılaşılan sorunların başında delinen delik çevresinde oluşan hasar gelmektedir [4]. Hasar oluşumu imalatta arzu edilmeyen bir durum olup, hasarsız delik delme işlemi gerçekleştirmek için çalışmalar yapılmaktadır [5]. İlaveten delik delme sürecinde meydana gelen yüksek ilerleme kuvveti, tork, delikte meydana gelen termal hasar, deliğin boyutsal doğruluğunun tolere edilebilir sınırların dışında olması gibi hususlar karşılaşılan sorunların özeti olarak verilebilir [6].



Şekil 1. Kompozit malzemenin yapılan komponentlerin uçaklardaki kullanım yüzdesinin yıllara göre değişimi [7]

Kompozit malzemelerin delinmesi sürecini kontrol altına alıp, bu süreçte karşılaşılan sorunları elimine etmek için araştırmacılar farklı parametrelere odaklanmışlardır. Kesme parametreleri [8], kesme koşulları [9-12], kesici takım geometrisi [13-15] ve farklı kesici takım malzemeleri [16, 17], delme sürecinde kompozit malzemenin altına destek malzeme konulması [18] bunlardan bazılarıdır. Bahsi geçen bu çalışmalarda bulgular göstermiştir ki, dikkate alınan parametreler delme sürecinin kontrolüne ve delme sürecinde ve deliğin özelliklerinde süreçten dolayı ortaya çıkan sorunların azaltılması ve özellikle delikte meydana gelen hasarın minimize edilmesi konusunda katkı sağlamışlardır [2].

Kompozit malzemelerin delinmesinde önemli bir noktada kompozit malzemelerin birçok farklı kombinasyondan üretilebiliyor olmasıdır. Kompozit malzemelere eklenen farklı malzemeler kompozitin özelliklerini iyileştirirken, aynı zamanda bu kompozit malzemenin talaşlı işlenmesi için yeni çalışmanın yapılması zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Bilindiği üzere, iş parçasında değişen özellikler talaşlı imalat sürecini etkilemektedir. Bu bağlamda literatürde kompozit malzemeler konusunda birçok çalışma olmasına rağmen, örneğin bu makalede sunulan fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin talaşlı imalatı konusunda çalışma, bilindiği kadarı ile henüz literatürde yoktur. Bu malzemeler sahip oldukları yüksek aşınma dayanımları ve yüksek sıcaklıklara karşı gösterdikleri ısıl dirençten dolayı havacılık, otomotiv ve elektronik gibi endüstrilerde kullanılmalarının avantaj sağlayacağı düşünülen malzemelerdir. Ancak bu malzemeler kalınlıkları boyunca malzeme özelliklerinin değiştiği homojen özellik göstermeyen malzemelerdir [19].

Bu çalışma da mevcut kompozit malzemelerden önemli sayılabilecek farklılıklara sahip, fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin geleneksel yöntemlerle delinebilirliği araştırılmıştır. Bu malzemenin

delinebilme performansını değerlendirmek için, ilerleme kuvvetleri, tork ve hasar faktörü dikkate alınmış ve ilerleme miktarı, kesme hızı gibi parametrelerin delinebilirliğe ve ölçülen çıktılara etkisi deneysel olarak araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemesi VARTM tezgahı kullanılarak üretilmiştir. Cam elyaf kumaşlar ve karbon elyaf kumaşlar Dost Kimya firmasından temin edilmiş olup 200 gr/m² ağırlığa sahip ve plain weave (düz dokuma) özelliktedirler. Kompozitin üretimini gerçekleştirmek için, yeterli miktarda epoksi (Momentive, L160) ve sertleştirici (Momentive H160) kullanılarak, 0.8 Bar vakum altında epoksinin, cam ve karbon elyaf kumaş tabakalama sırası Şekil 2’de görüldüğü gibi, elyaf kumaşları ıslatması sağlanmıştır (Şekil 3). Kumaşların tüm alanı ıslandıktan sonra epoksi giriş portu işkenceyle hava almayacak şekilde kapatılmıştır. Akabinde ise kompozit 70 °C’de 1 saat ve 110 °C’de 4 saat olacak şekilde kurlenmiştir.

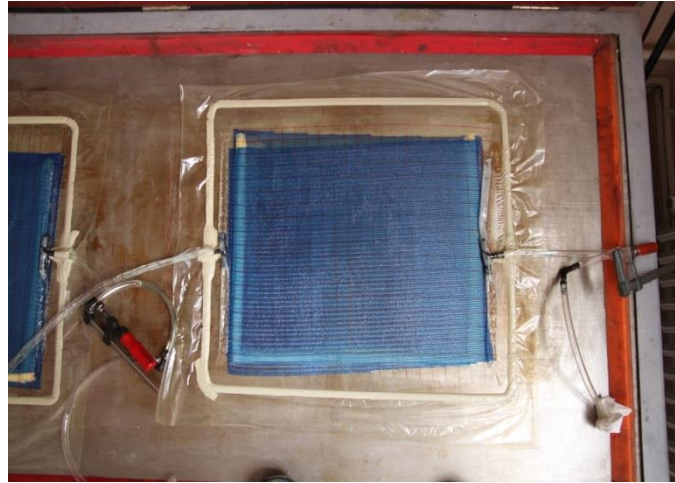


Şekil 2. Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitin tabakalanma sırası (gri renk karbon fiber kumaşları, beyaz renk cam fiber kumaşları temsil etmektedir)

Deneylerde kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1 de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan kompozit malzemenin mekanik özellikleri

	Cam Fiber Kompozit	Karbon Fiber Kompozit	Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit
Elastiklik Modülü (GPa)	21	43	30
Kopma Dayanımı (MPa)	412	740	541
Kopma Uzaması (%)	2.44	2.25	1.99

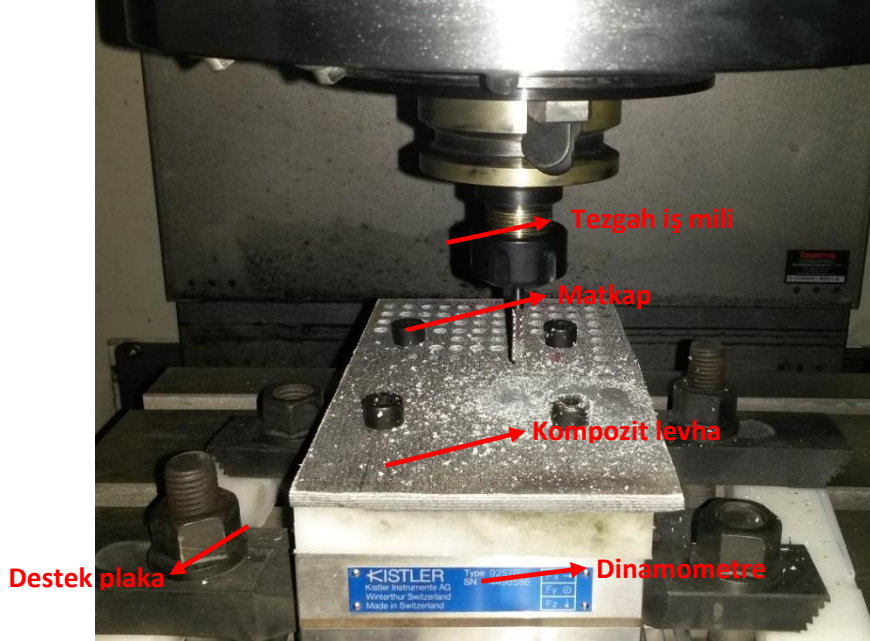


Şekil 3. Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin hazırlanması (Tam olarak ıslanmış elyaf kumaşlar)

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

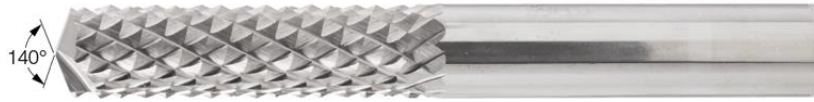
Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit numuneler 500*600 mm boyutlarından dinamometreye bağlayabilmek için yaklaşık olarak 170*100 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır.

Delme deneyleri motor gücü 12 kW, iş mili devri 10 000 dev/dak tezgah pozisyonlanma doğruluğu 0.003 mm, tekrarlanabilirlik doğruluğu ise ± 0.002 mm olan Quaser MV 154 C CNC işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel set-up Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 4. Delik delme deney düzeneği

Bu çalışma da 4 mm çapından İscar EPND-C8 04 kodlu % 9 kobalt ile ultra ince taneli karbür matkaplar kullanılmıştır. Her bir deneyde yeni bir matkap kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan matkabın fotoğrafı Şekil 5’de görülmektedir.



Şekil 5. Deneylerde kullanılan matkap

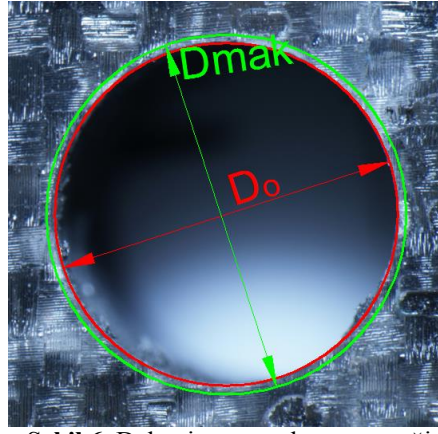
Delme deneyleri kuru delme şartları altında yapılmıştır. Deneysel çalışma da 5000 ve 7500 dev/dak olmak üzere 2 farklı fener mili hızında ve 5 farklı ilerleme miktarında (0.01, 0.02, 0.04, 0.08 ve 0.12 mm/dev) gerçekleştirilmiştir.

Deney anında ilerleme kuvvetleri ve torku ölçebilmek için Kistler 9257 B tipi dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre tezgah tablasına güvenli bir şekilde bağlanmıştır. Ölçülen sonuçları etkilememesi için 170*100*10 mm boyutlarında hazırlanan ön delikli altlık kullanılmıştır. Kompozit levha ön delikle numune üzerinden dinamometreye 4 adet gömme başlı alyen civata ile bağlanmıştır.

Delik çevresinde oluşan hasarlar 20X büyütme optik mikroskop ile ölçülmüştür. Hasar faktörü (F_d), aşağıda verilen denklem dikkate alınarak hesaplanmıştır [2].

$$F_d = \frac{D_{maks}}{D_0} \quad (1)$$

Burada D_{maks} hasarlı en büyük çap, D_0 ise delik çapıdır. Şekil 6’da örnek bir ölçüm görülmektedir.



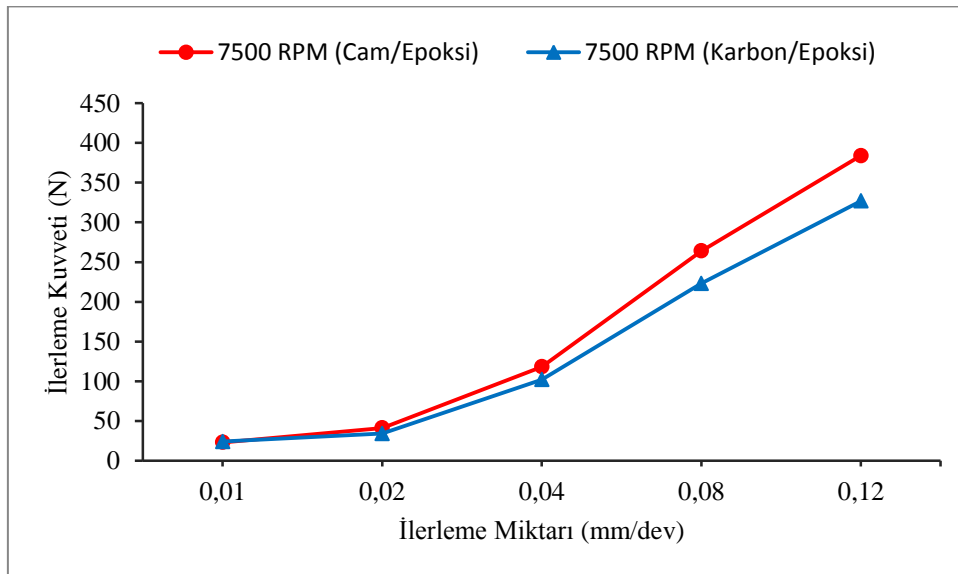
Şekil 6. Delaminasyon ölçümü örneği

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

1.1. İlerleme Kuvvetleri ve Tork Sonuçları

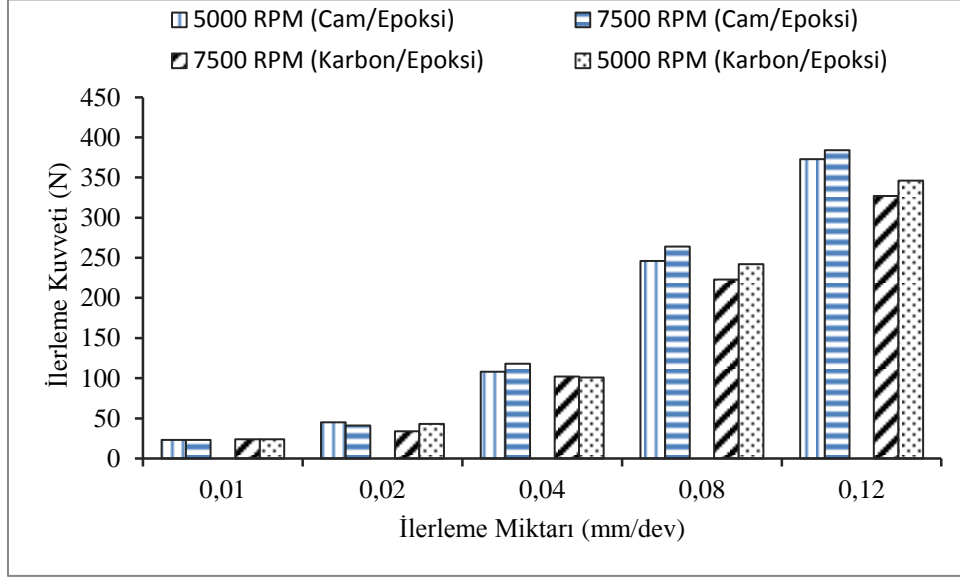
Geleneksel talaşlı imalat yöntemi ile yapılan talaş kaldırma süreçlerinde, özellikle delik delme sürecinde ilerleme kuvvetlerinin ölçülmesi ve analizi önem arz etmektedir. Bilhassa kompozit malzemelerin delinmesinde ilerleme kuvveti ayrı bir öneme sahiptir. Bunun en önemli sebeplerinden biri de ilerleme kuvveti ile delik hasarı arasında ilişki olduğuna dair bulguların literatürde yer almasıdır [20]. Bu çalışma da ilerleme kuvvetlerinin oluşumunda rol oynaması öngörülen parametrelerden kesme hızı ve ilerleme miktarı dikkate alınmıştır. İlaveten çalışma da kullanılan kompozit malzemenin fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit olması sebebiyle, delmenin cam ve karbon/epoksi tarafından yapılmasının kuvvetlere ve torka etkisi de irdelenmiştir.

Şekil 7’de sabit devir sayısında (7500 RPM), fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin farklı yönlerden delinmesi sonucu elde edilen ilerleme kuvvetleri sunulmuştur. Şekil 2’de görüldüğü üzere kompozit tabakanın bir tarafındaki tabakalar tamamen cam elyaf, diğer tarafındaki tabakalar tamamen karbon elyaf ve ortasında ise hem karbon elyaf hem de cam elyaf mevcuttur. Dolayısı ile çalışma da öncelikli olarak cam elyaf olan tarafından delme işlemi yapılmış akabinde ise karbon elyaf tarafından delme işlemi yapılmıştır. Her ne kadar delik plakının kesiti boyunca delinmiş olsa da, delme esnasında oluşan ilerleme kuvvetlerinin iş parçasının yönünden bağımsız olmadığı Şekil 7’de görülmektedir. Cam elyaf fiber kumaşları tarafından delik delindiği zaman oluşan ilerleme kuvvetlerinin karbon elyaf fiber kumaşları tarafından oluşan ilerleme kuvvetlerine nazaran daha yüksek olduğu Şekil 7’de sunulan bulgular referans alınarak söylenebilir. Diğer bir husus ise, ilerleme miktarındaki artış yönden bağımsız olarak ilerleme kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur.



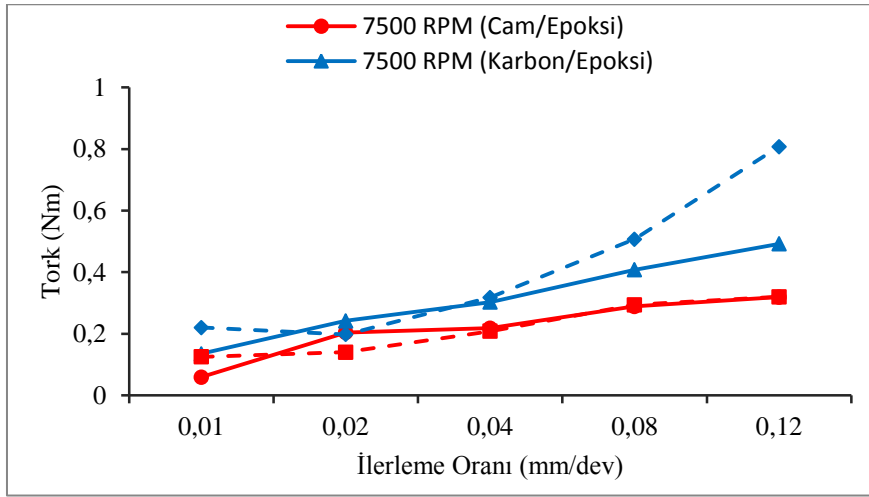
Şekil 7. İlerleme oranı ve kompozit malzemenin Cam/epoksi ve Karbon/epoksi yönlerinden delinmesinde oluşan maksimum ilerleme kuvvetleri

Özellikle ilerleme miktarı 0.02 mm/dev'in üzerine çıkarıldığında, ilerleme miktarındaki artış ile delme esnasında oluşan ilerleme kuvveti değerindeki artışın paralel olduğu görülmektedir. İlerleme oranının ilerleme kuvvetine etkisine benzer bir etki kesme hızındaki değişimde gözlemlenmemiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, kesme hızının ilerleme kuvvetine etkisi oldukça sınırlıdır. Bu sınırlı etki malzemenin delme yönünün değiştirilmesi ile farklılık göstermemiştir. Cam elyaf ve karbon elyaf tarafından yapılan delme işlemlerinde kesme hızı sınırlı etki göstermiştir. Not edilmesi gereken husus, fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin delinmesi sürecinde ilerleme miktarı ve kesme hızının ilerleme kuvvetine etkisi, mevcut literatürde farklı kompozit malzemelerin (Cam elyaf takviyeli kompozit veya karbon elyaf takviyeli kompozit) delinmesi sürecinde elde edilen bulgular ile paralellik göstermektedir [2].



Şekil 8. Farklı devir sayıları ve ilerleme miktarlarında kompozit malzemenin Cam ve Karbon/epoksi taraflarından delinmesinde oluşan maksimum ilerleme kuvvetleri

Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin delinmesi sürecinden oluşan tork sonuçları Şekil 9'da sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, tork değerlerinin fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitin delinmesi sürecinde yönden bağımsız olmadığı görülmektedir. Karbon elyaf fiber kumaşlarının olduğu yönden yapılan delme sürecindeki tork değerlerinin farklı ilerleme değerlerinde ve kesme hızlarında veya diğer bir ifade ile farklı devirlerde, cam elyaf fiber kumaşlarının olduğu yönden yapılan delme sürecindeki tork değerlerinde nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu farklılık özellikle yüksek ilerleme miktarında çok daha net olarak görülmektedir. Devir sayısındaki artış veya diğer bir ifade ile kesme hızındaki artışın tork değerlerindeki değişime etkisi farklı ilerleme miktarında farklılık göstermekte olup, net bir trend gözlemlenmemiştir.

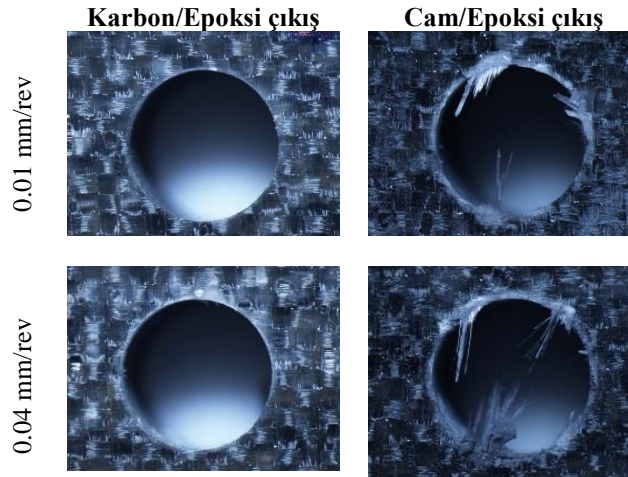


Şekil 9. Farklı devir sayıları ve ilerleme miktarında kompozit malzemenin Cam ve Karbon/epoksi taraflarından delinmesinde oluşan maksimum ilerleme kuvvetleri

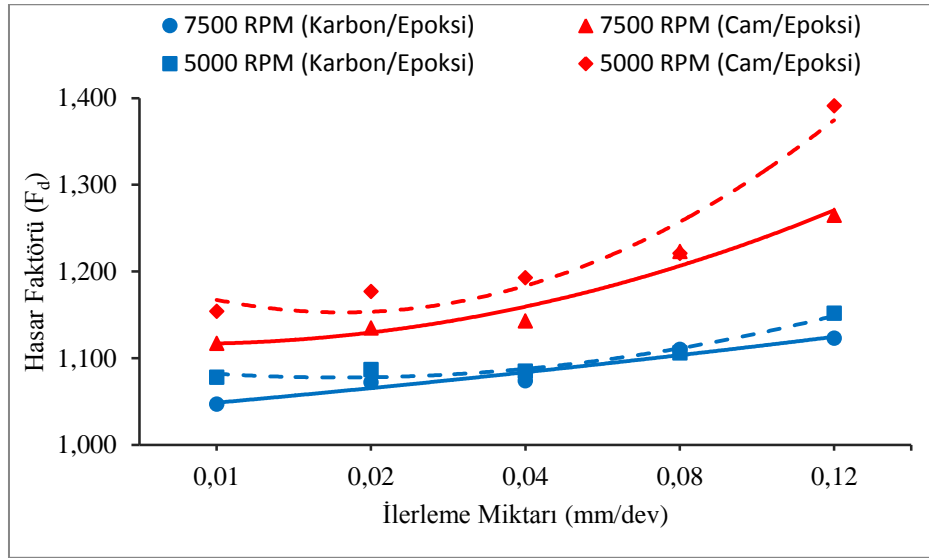
1.2. Hasar Faktörü

Kompozit malzemelerin delinmesi sürecinde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri delik çevresinde meydana gelen hasardır. Kompozit malzemelerin yapılarında oluşacak hasar ve hatalar bu malzemelerin kullanımı süresince yorulma davranışlarını olumsuz etkileyecek ve dayanımlarını azaltacaktır [21]. Dolayısıyla hasarın oluşumunda rol oynayan faktörlerin tayin edilmesi ve kontrol edilmesi önem arz etmektedir. Hasar oluşumunda kesme parametreleri, kesme şartları, matkap geometrik özelliklerinin rolü konusunda çalışmalar yapıldığı bu çalışmanın giriş kısmında ilgili literatüre atıfta bulunularak bahsedilmiştir. Bu çalışma da hem kesme parametreleri (ilerleme miktarı ve kesme hızı) hem de kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerin etkisi irdelenmiştir. Şekil 10'da görüldüğü üzere fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin delinmesinde delik çıkışında hasar oluşmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, delik çıkışındaki fiber kumaşın türü ve ilerleme miktarındaki değişim hasar faktörünü etkilemektedir. Yapılan çalışma da elde edilen nicel değerler Şekil 11'de sunulmuştur.

Kesme parametrelerin hasar faktörüne etkisi Şekil 11'de net olarak görülmektedir. Devir sayısının veya diğer bir ifade ile kesme hızının artması hasar faktörünü azaltmıştır. Bu davranış fiber kumaşın malzemesinden bağımsızdır. Ancak cam elyaf takviyeli epoksi de kesme hızının etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Artan devir sayısı beraberinde kesme bölgesindeki sıcaklığın artışına neden olmaktadır. Bu durumda kompozit malzemede düşük devirlere nazaran bir yumuşama söz konusu olmakta ve nihayetinde hasar faktörü azalmaktadır. Artan devir sayısının cam elyaf yönünde daha belirgin etkisi ise yine cam elyafın sahip olduğu mekanik özellikler dikkate alındığında, artan devir sayısı ile meydana gelen yumuşamanın daha etkin rol oynaması sonucu olduğu görülebilir. İlerleme oranının artması hasar faktöründe artışa sebep olmaktadır. Gözlemlenen bu ilişki de fiber kumaşın malzemesinden bağımsızdır. Hem karbon fiber yönündeki delik çıkışında hem de cam fiber yönündeki delik çıkışındaki hasar faktörü ilerleme miktarındaki artış ile artmaktadır.



Şekil 10. Karbon ve Cam/Epoksi yönlerinden delinen deliklerin çıkışlarında meydana gelen hasar



Şekil 11. İlerleme oranı ve devir sayısına bağlı olarak fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin Karbon ve Cam epoksi tarafında oluşan hasar faktörü

Bir önceki bölümde Şekil 7’de görüldüğü üzere ilerleme miktarının artması ilerleme kuvvetini arttırmıştır. Artan ilerleme kuvvetleri beraberinde delinen delik ve çevresindeki gerilmeyi arttırmaktadır ve bu durum delik alanındaki ve çevresindeki fiberlerin daha fazla gerilmeye maruz kalarak deforme olmalarına sebebiyet vermektedir. Buda delik çevresindeki kalıcı hasarın daha geniş bir alana yayılmasına neden olmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit te cam elyaf fiber takviyeli elyaf malzemenin olduğu yöndeki delik çıkışında oluşan hasar faktörü karbon elyaf malzemenin olduğu yöndeki delik çıkışındaki hasar faktörüne nazaran çok daha fazladır. Bunun nedenlerinden birisi cam elyaf takviyeli yöndeki delme işleminde elde edilen ilerleme kuvvetlerinin karbon elyaf takviyeli yöndekine nazaran yüksek olmasıdır (Şekil 7). İlâveten cam elyaf liflerin mekanik özellikleri ve kırılma davranışı dikkate alındığında delme esnasındaki ilerleme kuvvetleri neticesinde oluşan gerilmenin daha büyük bir alana etkiliyor olmasıdır. Bu durum test edilen tüm ilerleme miktarı değerleri ve kesme hızları için geçerlidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemenin geleneksel yöntemle talaşlı işlenebilme performansı delik delme operasyonu ile test edilmiştir. Farklı devir sayısı, ilerleme miktarı ve iş parçasının kompozisyonunda olan cam elyaf ve karbon elyaf yönlerinden delinmesinin ilerleme kuvvetlerine, torka ve hasar faktörüne etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit malzemelerin delinmesinde ilerleme miktarının bu malzemenin işlenme performansında özellikle ilerleme kuvvetlerinin ve hasar faktörünün oluşumunda önemli rol oynadığı görülmüş olup, devir sayısının etkisinin nispeten sınırlı olduğu görülmüştür. Ayrıca bu malzemenin cam elyaf/epoksi yönündeki deliğin hasar faktörünün karbon elyaf/epoksi yönündeki delikte oluşan hasar faktörüne nazaran çok daha büyük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, bu malzemede hasar faktörünün azaltılması veya hasarsız olarak delik delinebilmesi için kesme parametrelerinden ilerleme miktarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bunlara ilâveten, bu malzemenin kompozisyonundaki ve özellikle de delinecek deliğin çıkış bölgelerindeki cam elyaf oranının delik bölgesinde oluşacak hasar faktöründe dominant etkisinin olduğu talaşlı imalat süreçlerinde dikkate alınması gerek bir durum olduğu sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesi için gerekli olan matkap uçlarını temin ederek, çalışmaya katkı sağladıkları için İSCAR kesici takım firmasına ve yetkililerine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Liu, D., Tang, Y., Cong, W. 2012. "A review of mechanical drilling for composite laminates", Composite Structures, cilt 94, s.1265-1279.
- [2] Kumar, D., Singh, K. 2014. "An approach towards damage free machining of CFRP and GFRP composite material: a review", Advanced Composite Materials, s.1-15.
- [3] Palanikumar, K., Prakash, S., Shanmugam, K. 2008. "Evaluation of delamination in drilling GFRP composites", Mater Manuf Process, cilt23, s.858-864.
- [4] Palanikumar, K. 2010. "Modeling and analysis of delamination factor and surface roughness in drilling GFRP composites", Mater Manuf Process, cilt25, s.1059-1067.
- [5] Davim, J.P., Reis, P. 2003 "Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments", Composite structures, cilt59, s.481-487.
- [6] Arul, S., Vijayaraghavan, L., Malhotra, S., Krishnamurthy, R. 2006. "The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites", International Journal of Machine Tools and Manufacture, cilt46, s.252-259.
- [7] Brinson, L. 2005. "Meeting the Emerging Demand for Durable Polymer Matrix Composites", The National Academies Press: Washington DC.
- [8] Arul, S., Samuel Raj, D., Vijayaraghavan, L., Malhotra, S., Krishnamurthy, R. 2006. "Modeling and optimization of process parameters for defect toleranced drilling of GFRP composites", Mater Manuf Process, cilt21, s.357-365.
- [9] Shyha, I., Soo, S.L., Aspinwall, D., Bradley, S., Perry, R., Harden, P., Dawson, S. 2011. "Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks", International Journal of Machine Tools and Manufacture, cilt51, s.569-578.
- [10] Park, K.H., Beal, A., Kim, D., Kwon, P., Lantrip, J. 2011. "Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools", Wear, cilt271, s.2826-2835.
- [11] Xia, T., Kaynak, Y., Arvin, C., Jawahir, I.S. 2015. "Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, in press.
- [12] Babu, K.A., Kumar, G.V., Venkataramaiah, P. 2015. "Prediction of Surface Roughness in Drilling of Al 7075/10%-SiCp Composite under MQL Condition using Fuzzy Logic", Indian Journal of Science and Technology, cilt.8.
- [13] Tsao, C., Chiu, Y. 2011. "Evaluation of drilling parameters on thrust force in drilling carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates using compound core-special drills", International Journal of Machine Tools and Manufacture, cilt51, s. 740-744.
- [14] Tsao, C., Hocheng, H. 2004. "Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material", International Journal of Machine Tools and Manufacture, cilt44, s.1085-1090.
- [15] Karpát, Y., Değer, B., Bahtiyar, O. 2012. "Drilling thick fabric woven CFRP laminates with double point angle drills", Journal of materials processing technology, cilt212, s. 2117-2127.
- [16] Sastry, K.K., Rao, V.S., Palanikumar, K., Dhanalakshmi, R., Kuravi, A. 2014. "Assessment of Process Parameters Influencing Delamination Factor on the Drilling of CFRC Composite Material with Tin Coated Carbide Tool", Indian Journal of Science and Technology, cilt7, s.142-150.
- [17] Karpát, Y., Değer, B., Bahtiyar, O. 2014. "Experimental evaluation of polycrystalline diamond tool geometries while drilling carbon fiber-reinforced plastics", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, cilt71, s.1295-1307.
- [18] Tsao, C., Hocheng, H., Chen, Y. 2012. "Delamination reduction in drilling composite materials by active backup force", CIRP Annals-Manufacturing Technology, cilt61, s. 91-94.
- [19] Oktem, A.S. 2014. "Fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) ileri kompozit plakların statik analizi", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, cilt29,sayı1, s.111-119.
- [20] Li, N., Li, Y., Zhou, J., He, Y., Hao, X. 2015. "Drilling Delamination and Thermal Damage of Carbon Nanotube / Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites Processed by Microwave Curing", International Journal of Machine Tools and Manufacture, in press.
- [21] Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson L. 1997 "Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates", Compos.:PartA, Cilt 28A, s.141-151.

HELİSEL ÇOK KRİSTALLİ ELMAS MATKAPLAR İLE KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER LEVHALARIN DELİNME İŞLEMİNİN İNCELENMESİ

Yiğit Karpat^a ve Onur Bahtiyar^b

*a, Bilkent Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara/TÜRKİYE,
ykarpat@bilkent.edu.tr*

*b, TUSAŞ Havacılık, Ankara/TÜRKİYE,
obahtiyar@tai.com*

Özet

Karbon fiber takviyeli polimer malzemeler sahip oldukları düşük ağırlık, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci ve düşük ısıl genleşme gibi özellikleri nedeniyle uzay ve havacılık alanlarında yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Karbon fiberlerin yüksek aşındırma etkisi ve polimer malzemenin düşük ısı iletim katsayısı nedeni ile delik delme işleminde kullanılan kesici takımlar hızlı bir şekilde aşınmakta ve sonuç olarak işlenen parçalarda katman ayrışması, boyut hassasiyetinin azalması gibi problemlere sebep vermektedir. Karbon fiber takviyeli polimer malzemelerin delinmesi esnasında matkap malzemesinin, matkap geometrisinin ve kesme parametrelerinin seçimi üreticiler için önemli bir konudur. Bu çalışmada çok kristalli elmas malzemenin iki değişik geometrisine sahip matkaplar ile karbon fiber takviyeli polimer malzeme üzerinde delik açma çalışmaları yapılmış, delik delme parametrelerinin ve matkap ucu geometrisinin delme sırasında oluşan kuvvet ve tork değerlerine ve delik çıkış kalitesi ve takım aşınmasına olan etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Delik açma, karbon fiber takviyeli polimer malzemeler, çok kristalli elmas takımlar, takım aşınması, katman ayrışması

INVESTIGATION OF DRILLING CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS WITH POLYCRYSTALLINE DIAMOND HELICAL DRILLS

Abstract

Carbon fiber reinforced polymers are widely in aerospace industry due to their unique properties such as light weight, high strength and low thermal expansion. Due to the highly abrasive nature of carbon fibers and low thermal conductivity of the polymer material, cutting tools are worn out rapidly, which lowers the efficiency of the process by increasing the cost and also brings about other drawbacks such as delamination, inferior surface qualities and dimensional accuracy. Therefore, the most suitable cutting parameters, tool geometry, and tool material need to be determined for an efficient machining process. In this work, drilling of carbon fiber reinforced polymers with polycrystalline diamond drill bits has been studied. Effects of drilling parameters and drill geometry on tool wear, delamination and thrust force and torque have been investigated.

Keywords: Drilling, carbon fiber reinforced polymer materials, polycrystalline diamond tools, tool wear, delamination

1. GİRİŞ

Sahip oldukları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve düşük ısıl genleşme gibi cazip özellikler karbon fiber takviyeli polimer malzemelerin havacılık endüstrisinde giderek daha fazla kullanılır hale gelmesine yol açmıştır. Fiber takviyeli polimer malzemelerden son şekillerine yakın olarak üretilen parçalar üzerinde delik delme, kenar ve yüzey frezeleme gibi talaş kaldırma işlemlerinin uygulanması gerekmektedir. Bunlar arasında en yaygın olanı işlem delik delme işlemidir. Karbon liflerinin aşındırıcı etkisi takımların hızlı bir şekilde aşınmasına sebep olmaktadır. Karbon fiber takviyeli polimer malzemelerin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle delik delme esnasında ortaya çıkan ısı enerjisi kesme bölgesinden uzaklaştırılmamakta, kesici takım kenarında yoğunlaşarak takımın hızlı bir şekilde aşınmasına yol açabilmektedir. Kesici takımın aşınması ile kesme işlemi verimli olarak gerçekleştirilememekte, artan kuvvetler ile kompozit malzemeyi oluşturan katmanların birbirinden ayrışması ve oluşan yüksek sıcaklıklar ile polimer matris yapının yanması gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Katmanların ayrışması kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesini azaltmaktadır. Katman ayrışması kompozit malzemelerin delik kalitesini belirleyen en önemli ölçüttür ve kabul edilir sınırların dışına çıkılması durumunda üretilen parça kalite testlerini geçememektedir. Literatürde yapılan çalışmalar, kesici takım malzeme ve geometrisinin ve kesme parametrelerinin katman ayrışması üzerinde doğrudan etki ettiğini göstermiştir. Bu çalışmada çok kristalli elmas malzemenin imal edilmiş helisel forma sahip fakat uç geometrileri farklı iki değişik matkap ucu ile delik delme esnasında oluşan kuvvet ve tork değerleri ve delik çıkış kaliteleri deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

Karbon fiber takviyeli polimer malzemelerin delinmesi konusunda literatürde yapılmış birçok deneysel çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaları ana konusu kesme parametreleri ve katman ayrışması arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Delik delme işleminde ilerleme kuvvetiyle katman ayrışması arasında doğrusal bir ilişki olduğu, takım aşınması arttıkça katman ayrışmasının daha da arttığı görülmüştür [1]. Delik delme işlemi esnasında kompozit plakanın altına yerleştirilen destek bloğunun katman ayrışmasına belli bir derece engel olduğu ve böylece işlemin daha yüksek ilerleme hızlarında gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir [2]. Destek bloğu kullanılmadan gerçekleştirilen bir çalışmada küçük çaplı bir ön delik açılması gerekliliği ve değişken ilerleme hızı uygulanmasıyla delik kalitesinin artabileceği vurgulanmıştır [3]. Düşük ilerleme hızlarında genel olarak ilerleme kuvvetininin de düşük olduğu, bunun da katman ayrışmasını azalttığı gözlemlenmiştir [4]. Takım ömrüne etki eden en önemli iki faktörün takım geometrisi ve ilerleme hızı olduğu belirtilmektedir ve en iyi takım ömrü performansının uç açısı 140° olan aşamalı matkap ucuyla elde edildiği ifade edilmektedir [5]. Bir başka çalışmada yüksek kesme hızlarında ısıl yumuşama nedeniyle ilerleme kuvvetinin azaldığı görülmüştür [6]. Örgü tip karbon elyaf takviyeli polimerlerin kuru kesme şartlarında kaplamasız ve kaplamalı karbür takımlarla delik açma işleminin incelendiği bir çalışmada, aşınmış takımın kesici kenarının yuvarlanmış bir şekil alması nedeniyle kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür [7]. Yine kaplamasız ve kaplamalı karbür takımlarla gerçekleştirilen bir başka çalışmada en iyi performansın elmas kaplamalı karbür takımlar ve 125-130° uç açısıyla elde edildiği vurgulanmaktadır [8]. Elmas kaplamalı karbür takımların incelendiği bir diğer çalışmada yüksek ilerleme hızında elmas kaplamanın daha uzun dayandığı, düşük ilerleme şartlarında ise elmas kaplamanın hızlı bir şekilde kırıldığı ve bunun takım performansını kötü yönde

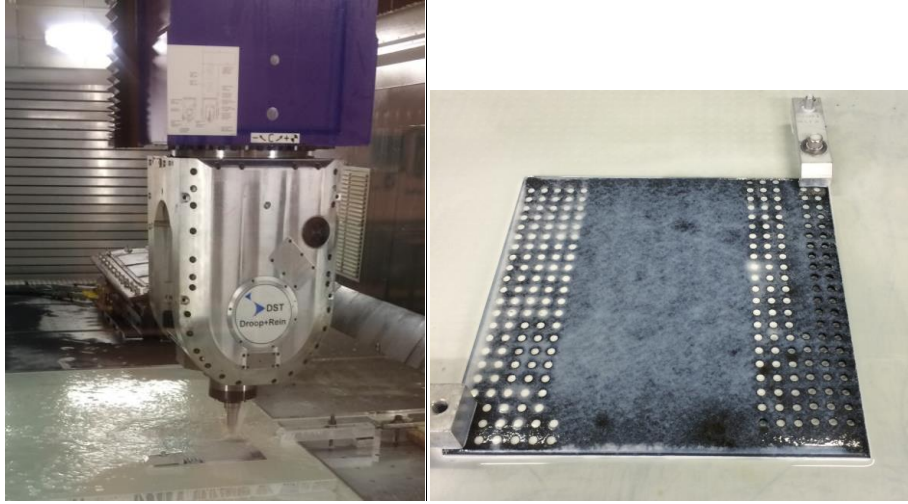
etkilediği gösterilmiştir [9]. Karbon fiber destekli polimerlerin delinmesi sırasında aşınmaya en dayanıklı olarak bilinen takım malzemesi çok kristalli elmadır (polycrystalline diamond, PCD). Bu tip takımlar üzerinde yapılan bir çalışmada takım geometrisinin takım ömrü ve katman ayrışması olayı üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir [10]. Bu takımlar üretim zorlukları sebebiyle yüksek maliyetlidir ve genellikle basit geometriye sahiptirler. Ancak takım imalat endüstrisinde geliştirilen yenilikler sonucunda helisel açığa sahip çok kristalli elmas takımların üretimine başlanmıştır.

Literatürde yapılan çalışmaların birçoğu karbon fiber takviyeli polimerlerin delinmesini deneysel olarak ele almaktadır. Bu yaklaşımın seçilmesinin ana sebebi karbon fiber kompozit malzemesinin işlenmesi sırasında etkili olan talaş kaldırma mekanizmasının fiber yönüne bağlı olarak değişmesi ve baskın olarak kırılma olayının görülmesidir. Bu durum analitik modelleme işlemini zorlaştırmaktadır. Ancak karbon fiber takviyeli polimerlerin delinmesi işleminin fizik tabanlı olarak modellenmesi ve işleme sonucunun önceden öngürülebilmesi için analitik işleme modellerini geliştirilmesi gerekmektedir ve akademik çevrelerde bu yönde araştırmalar devam etmektedir [11, 12]. Bu modeller, verilen karbon fiber kompozit malzeme özelliklerine göre kesici takım geometrilerinin tasarlanması ve işleme parametrelerinin az sayıda deney ile seçilebilmesi amacıyla yöneliktir. Bu

çalışmada çok yönlü karbon fiber takviyeli polimer malzemelerin çok kristalli elmas takımlar ile delinmesi sırasında takım geometrisinin delik çıkış kalitesi, kuvvet ve tork çıktıları üzerine etkileri incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN EKİPMAN VE KESİCİ TAKIMLAR

Bu çalışma dahilinde karbon fiber takviyeli kompozitlerin işlenmesi için özel olarak üretilmiş 5 eksenli Dörries-Scharmann marka işleme merkezi kullanılmıştır (75 kW, 24,000 d/dak). Delik açma çalışmaları levha şeklindeki çok yönlü karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzeme üzerinde gerçekleştirilmiştir. Destek bloğu olarak üzerinde önceden açılmış 8 mm çapında delikler içeren bir alüminyum levha kullanılmıştır. Kompozit levha, bu alüminyum levha üzerine yerleştirilmiş ve delikler tam olarak alüminyum levha üzerindeki deliklerle çıkacaktır şekilde ayarlanmıştır. Tezgah ve deneylerde kullanılan karbon fiber takviyeli kompozit parça Şekil 1’de görülmektedir. İlerleme kuvveti ve tork döner tip Kistler 9123 dinamometre ve Kistler 5223 tip yükseltici kullanılarak ölçülmüş kuvvet değerleri bir veri toplama sistemi üzerinden bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 1. Delik delme çalışmasında kullanılan tezgah ve delik delme işleminin yapıldığı plaka.

Çok yönlü karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Katmanlar 0° - 90° ve $\pm 45^{\circ}$ şeklinde 72 kat olacak şekilde serilmiştir.

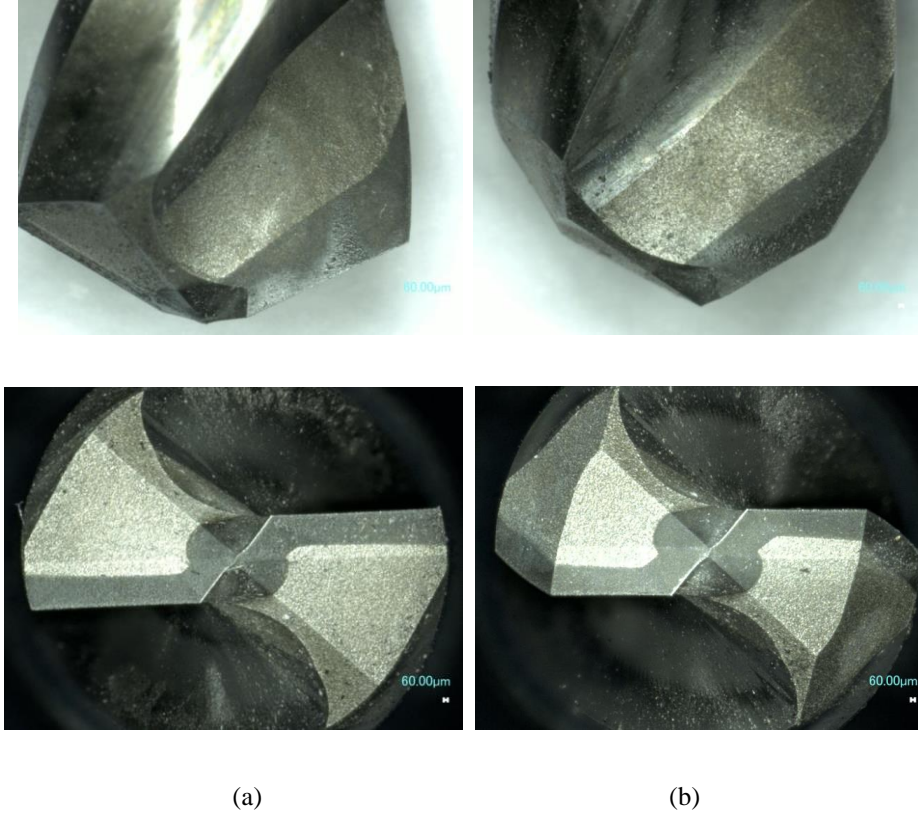
Tablo 1. Örgü tipi karbon elyaf takviyeli kompozit malzemenin malzeme özellikleri

Elyaf Hacim Oranı (%)	Mukavemet (MPa)	Modül (GPa)	Yoğunluk (g/cm^3)	Pişmiş Katman Kalınlığı (mm)
59	2690	165	1,58	0.13

Mekanik özellikler oda sıcaklığında ve 0° ile 90° serim açıları için geçerlidir.

Delik açma işlemi için 6.4 mm çapında çok kristalli elmas kesici uca sahip matkaplar kullanılmıştır. Çalışmada iki adet uç geometrisi göz önüne alınmıştır. Bunlardan birincisi tek uç açısına (120°) sahip helisel matkap ucu (M1 olarak adlandırılmıştır), diğeri ise çift uç açısına (120° - 60°) sahip helisel matkap ucudur (M2 olarak adlandırılmıştır). Çift uç açısının kullanılması ile ilerleme yönündeki kuvvetlerin ve kesme momentinin kesici kenar boyunca dengeli bir şekilde karşılanması ve delik yüzey kalitesine etki eden kesme kenarının korunması

amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan çok kristalli elmas takımların profilleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Tüm deneyler soğutma sıvısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Takımların enine kesici kenar geometrileri aynıdır.

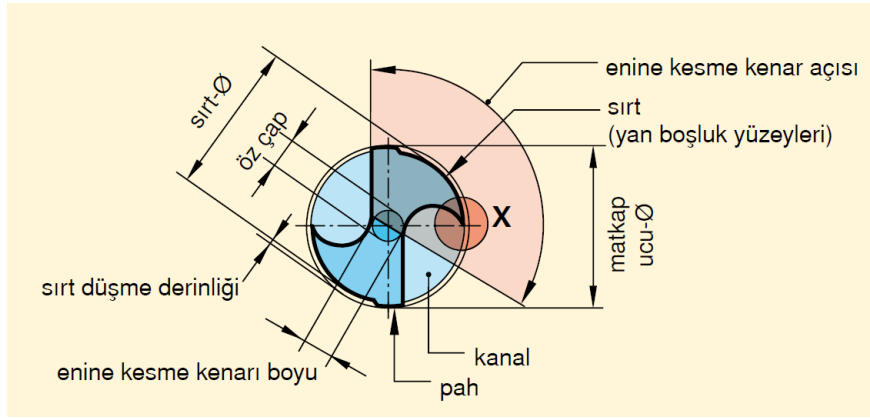
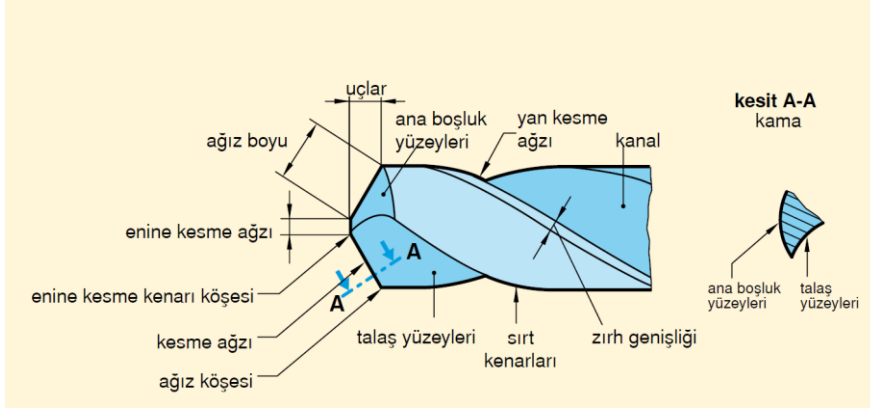


Şekil 2. Deneysel çalışmada incelenen PCD takımların profilleri. (a) Tek uç açısına sahip M1 takımı, (b) Çift uç açısına sahip M2 takımı.

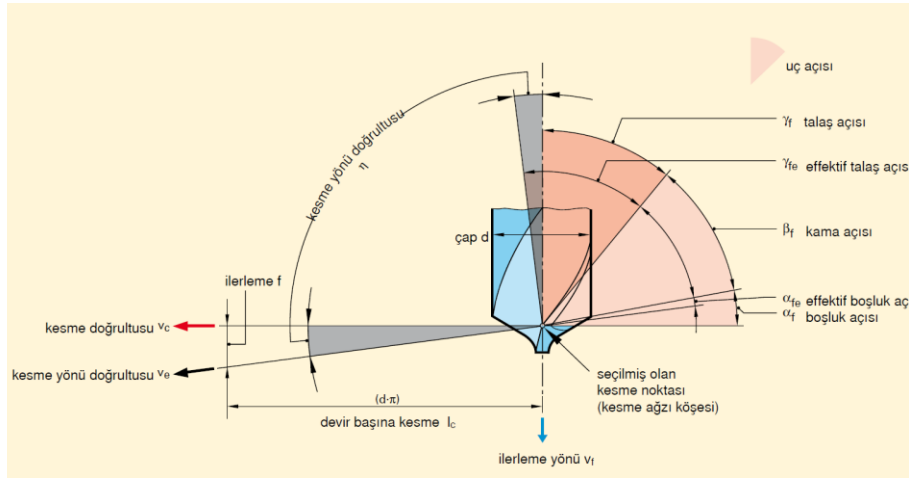
3. HELİSEL MATKAP GEOMETRİLERİNİN İNCELENMESİ

Geometrileri Şekil 2 ile gösterilen kesici takımların delik delme performanslarının incelenmesinden önce takım geometrilerinin ayrıntılı olarak incelenmesi ve aradaki farklılıkların ortaya konması amaçlanmıştır. Şekil 3 ile helisel kanallara sahip bir matkap ucu üzerindeki açılar ve uzunluk tanımları gösterilmektedir [13]. Bu tanımlar DIN ISO 5419 sistemine göre yapılmıştır. Matkap geometrisi uç açısı, çap, helis açısı, ağız boyu gibi parametreler ile tanımlanmaktadır. Ancak kesme işlemine etki eden parametre sayısı bundan daha fazladır. Enine kesme ağızı, enine kesme açısı, talaş açısı, kama açısı vb. gibi değerler talaş kaldırma işlemine doğrudan etki etmektedir ve helisel forma sahip matkap uçlarında bu değerler kesici kenar boyunca değişmektedir. Şekil 3 içerisinde kesit A-A olarak gösterilen kesici uç profili ve bunun kesme esnasındaki durumu özellikle karbon fiber kompozit işleme sırasında önemli bir parametre hale gelmektedir. Çok kristalli elmas takımların aşınması genellikle bu kesici ucun yuvarlanması şeklinde olmaktadır. Bu yuvarlanma değeri ise delik delme esnasında oluşan tork ve sıcaklıklar sonucu ortaya çıkmaktadır [14].

Delik delme işlemi esnasında takım kendi eksenini etrafında dönerken aynı zamanda düşey yönde ilerlemektedir. Bu sebeple kesici kenar üzerinde alınan bir noktanın iki adet hız bileşeni bulunmaktadır. Şekil 4 ile bu durum açıklanmıştır. Kesme yönü doğrultusunun hesaplanması ve kesici kenar talaş açısının ölçülmesi ile efektif talaş açısı hesaplanabilir. Efektif talaş açısı delik delme esnasında kesici kenar üzerine etki eden kuvvetlerin analizinde önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma dahilinde incelenecek takımların açılarının ölçülmesi için bir lazer topografi cihazı (Keyence VKX 110) kullanılmıştır. Kesici takımlar bu cihaz ile incelenmiş ve takım açılarının kenar boyunca değişimleri bu şekilde ölçülmüştür. Kesici takım uç açılarının değişimlerinin tanımlanması amacıyla yakın bir zamanda yayınlanmış olan bir çalışma göz önüne alınmıştır [13].



Şekil 3. Helisel tip matkap geometrisi ve tanımlar [13].



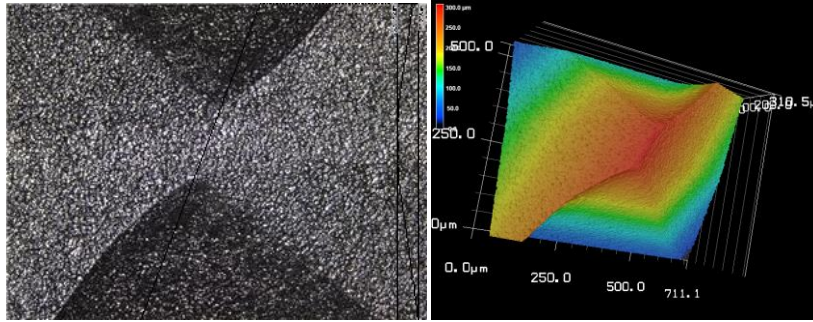
Şekil 4. Matkap hız bileşenleri ve talaş açısı tanımları [13].

Bu bilgiler ışığında kesme açısı (μ), kesici takımın açısal hızı ile ilerleme miktarı arasındaki ilişkiden yararlanılarak Denklem 1 ile hesaplanabilir. Kesme hızı matkap merkezinde sıfır olacağı için kesme açısı matkap yarıçapının fonksiyonu olarak verilmelidir. Burada f devir başı ilerleme miktarını, r ise matkap yarıçapını göstermektedir.

$$\mu(r) = \arctan\left(\frac{f}{2\pi r}\right) \quad (1)$$

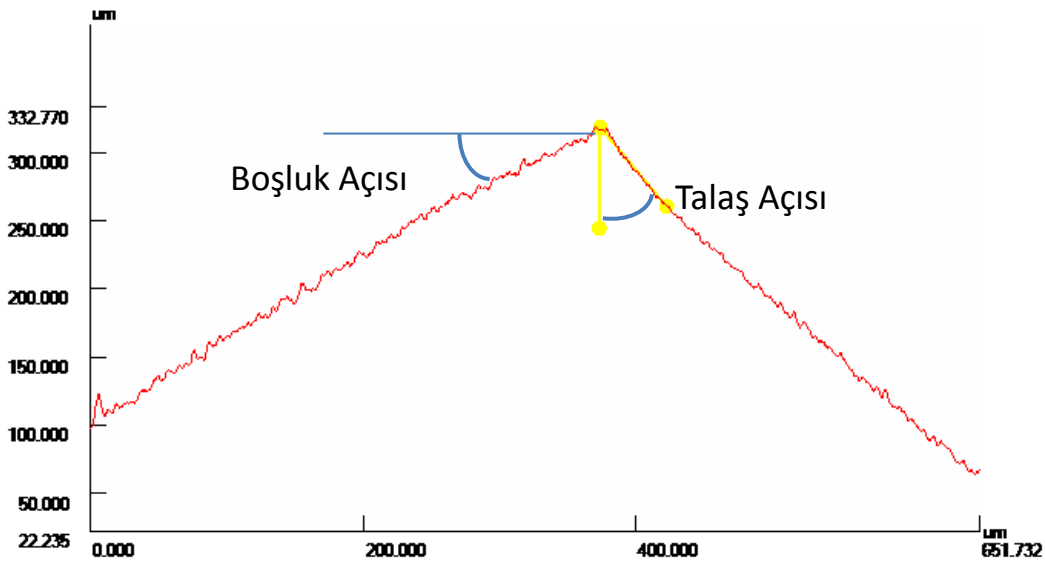
Denklem 1'de verilen ilişkiye göre takım dönme hızı yüksek, ilerme hızı düşük ise kesme açısı oldukça düşük olmaktadır. Bu bahsedilenler şartlar genelde karbon fiber takviyeli polimer malzemeler için tavsiye edilen kesme parametreleridir ancak bunlar aynı zamanda kesme açısının ve dolayısıyla talaş açısının düşük kalmasına ve malzemenin kesilmesinin zorlaşmasına sebep olmaktadır. Görüldüğü gibi seçilen ilerleme miktarı talaş kaldırma esnasındaki açılara doğrudan etki etmektedir.

Enine kesme kenar bölgesinin (*OAB*) geometrisi matkap performansına etkiyen en önemli faktörlerden biridir. Şekil 5 bu bölgenin detayını göstermektedir. Bu çalışmada incelenen kesici takımlar üzerinde enine kesme kenarının keskinleştirilmesi ve matkap merkezinin kesilen malzemeye dalmasının kolaylaştırılması, kesme esnasında takım önünde biriken malzemenin uzaklaştırılması ve sonuç olarak bu bölgede oluşacak sıcaklıkların kontrol edilmesi amacıyla kama inceltme işlemi uygulanmıştır.

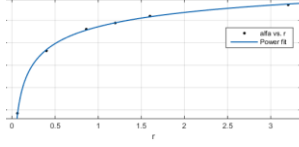


Şekil 5. Matkap enine kesici kenar bölgesinin incelenmesi (M1).

Şekil 5 ile gösterilmiş bölgenin mikroskop altında incelenmesi sonucu elde edilen uzunluk ve açı değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Enine kesme kenarı boyunca kama inceltmesi uygulanan bölgedeki uzunluğu 130 μm , toplam uzunluğu ise 800 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 6a enine kesme kenar kesitini göstermektedir. Görüldüğü gibi bu bölgede negatif talaş açısı bulunmaktadır. Bu değer kesme kenarı boyunca negatiften pozitifte doğru değişmektedir. Şekil 6b takım yarıçapı boyunca ölçülmüş talaş açısı değerini göstermektedir. M2 takımı için de benzer bir durum söz konusudur ancak bu matkabın ikinci kesici kenarındaki uç açısı daha az olduğu için bu bölgedeki talaş açısı M1 takımına göre daha küçük ancak boşluk açısı daha büyük olmaktadır. Uç açısının daha küçük olması bu bölgedeki kesilmemiş talaş kalınlığını da azaltmaktadır. İncelenen bölgede kesici kenar yarıçapının 4-5 μm civarında olduğu görülmüştür. Takım geometrisinin oluşan ilerleme kuvveti ve tork değerlerine olan etkisi ise bir sonraki bölümde tartışılmıştır.



(a)

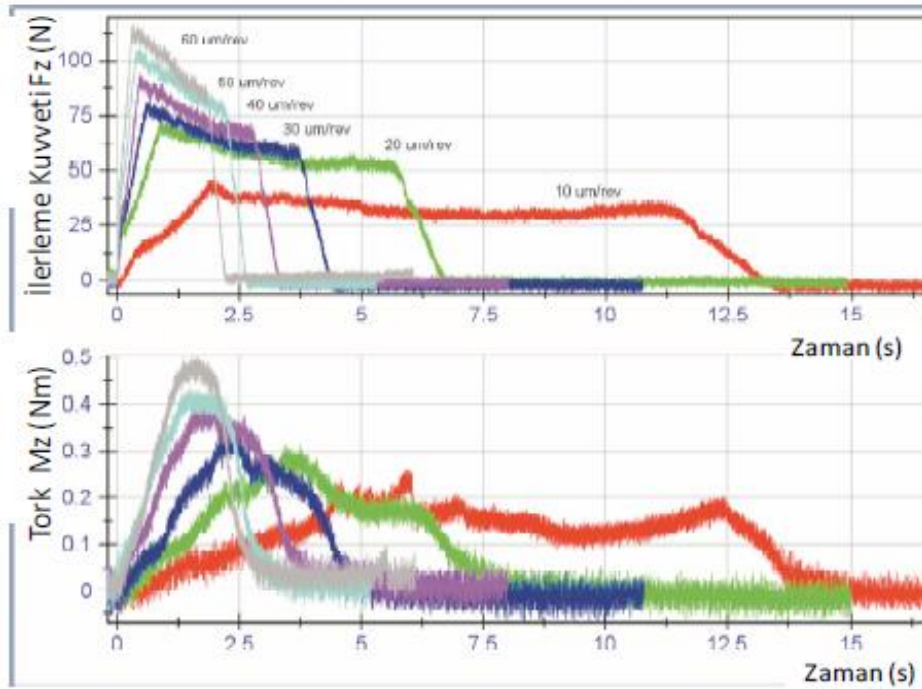


(b)

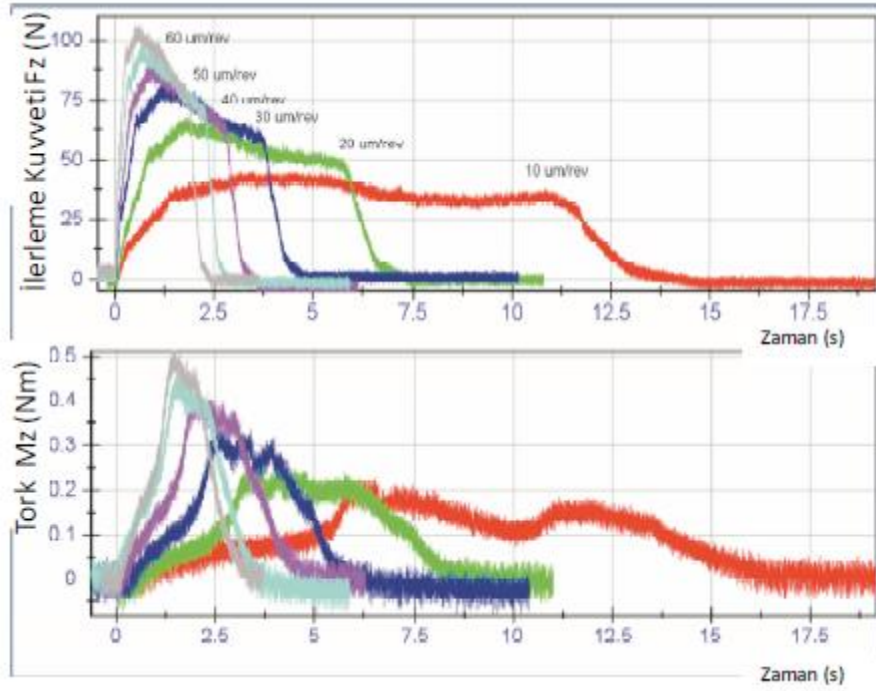
Şekil 6. Enine kesici kenar bölgesinin kesitinin incelenmesi, (b) Takım yarıçapı boyunca talaş açısının değişimi (M1 kodlu matkap için)

4. DELİK DELME ESNASINDA OLUŞAN İLERLEME KUVVETİ VE TORK DEĞERLERİNİN İNCELENMESİ

Karbon fiber kompozitlerin delinmesi sırasındaki en önemli kalite ölçütü katman ayrışmasına sebep vermeden delik delme işleminin tamamlanmasıdır. Bir matkap ucunun katman ayrışmasına sebep olmadan açabildiği delik sayısı takım ömrünün ölçüsü olarak değerlendirilebilir. Delik delme esnasında oluşan kuvvetler ve tork değerleri takım kesici kenarının aşınma miktarı ile ilintilidir. Delik delme esnasında oluşan kuvvet ve tork değerlerinin ölçülmesi matkap geometrisinin etkisinin anlaşılması açısından önemlidir. Bu amaca yönelik olarak sabit devir ve değişken ilerleme şartlarında delik delme deneyleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Devir değeri 5000 dev/dak olarak, ilerleme değerleri ise devir başına 10, 20, 30, 40, 50 ve 60 $\mu\text{m}/\text{dev}$ olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ele alınan matkapların kesici kenar yarıçapının 4-5 μm olması ilerleme değerlerinin seçilmesinde göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 7 elde edilen kuvvet ve tork değerlerini göstermektedir.



(a)



(b)

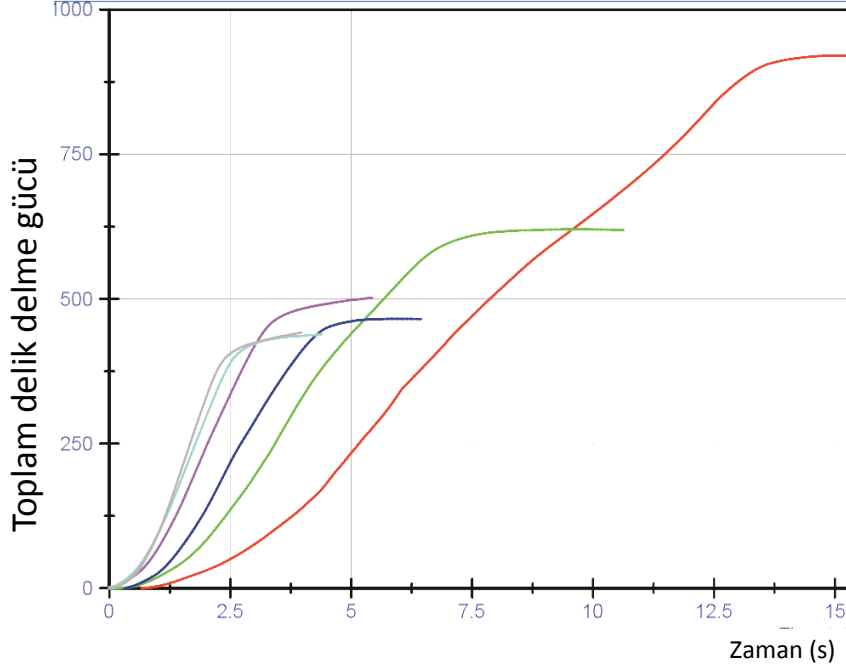
Şekil 7. Delik delme esnasında oluşan kuvvet ve tork değerleri (5000 dev/dak dönme hızı ve 10, 20, 30,40, 50, 60 µm/rev ilerleme değerlerinde). (a) M1 kodlu matkap, (b) M2 kodlu matkap.

Beklendiği gibi ilerleme değerinin artması ile ölçülen ilerleme yönündeki kuvvet ve tork değerleri artmaktadır. Deneylerin yapıldığı 5000 dev/dak koşulunda, çift uç açısına sahip M2 matkap geometrisinin ürettiği kuvvet ve tork değerlerinin M1 geometrisine biraz daha düşük olduğu görülmektedir. Düşük ikinci kesme bölgesi uç açısı o bölgedeki talaş kalınlığını düşürmekte ve dolayısıyla oluşan kuvvetlerin bir miktar azalmasına sebep olmaktadır. Şekil 7 ile verilen ölçümler incelendiğinde, kesme kuvvetinin tepe noktasına ulaşmasından sonra delik çıkışına kadar kuvvet değerlerinde bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüşün delik delme esnasında artan sıcaklıklar sebebiyle malzemenin yumuşaması ve yapının fiberlerin hasara uğratılmasına karşı gösterdiği direncin azalması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Matkap geometrisinin delik delme esnasında oluşan sıcaklık dağılımlarını etkilediği kabul edilirse, kuvvet düşüşünün matkap geometrisi ile ilişkili olduğu söylenebilir. İlerleme kuvvetinin düşmesi delik çıkışı esnasında katman ayrışması ihtimalini azaltmakta, ancak yükselen sıcaklıklar sebebiyle takım aşınma miktarı da artabilmektedir. İncelenen matkapların farklı geometrilere sahip olması takımların toplam kesme kenarı boylarının farklı olmasına ve delik delme süresinin bir miktar farklı olmasına sebep olmaktadır. İki takımın farklı geometrilere sahip olması sebebiyle sadece kuvvet ve tork değerlerine bakarak bir değerlendirme yapmak yerine, delik delme işlemi sırasındaki toplam (kümülatif) güç değerlerinin hesaplanmasına karar verilmiştir. Ölçülen ilerleme kuvveti ve tork zaman eğrileri altında kalan alan bilgisi kullanılarak delik delme sırasında harcanan toplam güç hesaplanabilir. Dolayısıyla M2 matkabının ikinci uç açısının getirdiği avantaj bu şekilde hesaplanabilir. Delik delme esnasında toplam güç (P) Denklem 1 ve 2 kullanılarak hesaplanabilir. Buna göre ilerleme yönünde oluşan kuvvet (F_z) ve ilerme hızı (fN) ve tork (M_z) ve açısal dönme hızı (ω) değerlerinin delik delme işlemi boyunca integralinin alınması ile toplam güç hesaplanmaktadır. Delik delme esnasında X ve Y yönlerinde oluşan kuvvetlerin etkisi ihmal edilmiştir. Şekil 8 hesaplanan toplam güç değerlerini değişik ilerleme değerleri için göstermektedir. Toplam delik delme gücünün karbon fiber ve polimer matriksin birbirinden ayrılmasına, fiberlerin koparılmasına, ve oluşan toz şeklindeki talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılmasına harcadığı ve delik delme esnasında kesme bölgesindeki sıcaklıkların yükselmesine sebep olduğu kabul edilmiştir.

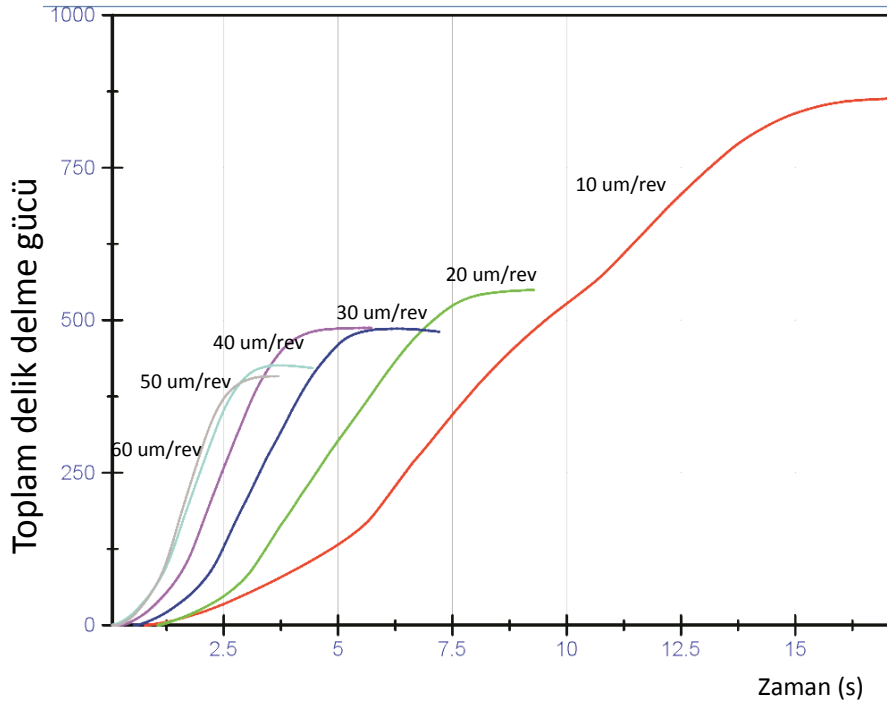
$$P = P_{Fz} + P_{Mz} \quad (1)$$

$$P_{Fz} = \left[\int_0^{t_5} F_z(t) f N dt \right] \quad (2)$$

$$P_{Mz} = \left[\int_0^{t_6} M_z(t) N \frac{2\pi}{60} dt \right]$$



(a)



(b)

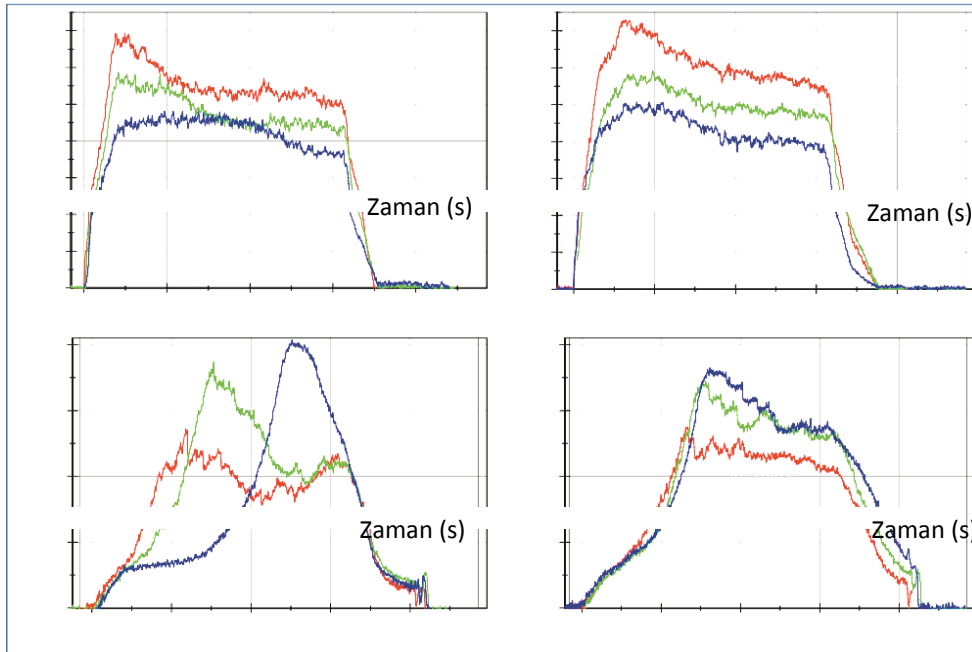
Şekil 8. İlerme değerine göre harcanan toplam delik delme gücü değerleri (5000 dev/dak dönme hızı ve 10, 20, 30,40, 50, 60 $\mu\text{m}/\text{rev}$ ilerleme değerlerinde). (a) M1 kodlu matkap, (b) M2 kodlu matkap.

Şekil 8 ile verilen değerlere göre M2 matkabının 10 ve 20 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme değerlerindeki toplam güç değerleri (sırasıyla 875 W ve 580 W) M1 matkabının değerlerine göre (925 W ve 625 W) biraz daha düşüktür. İki matkap arasındaki fark 30 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ve üstü değerlerde ise ortadan kalkmaktadır. Bunun sebebi yüksek ilerleme değerlerinde kompozit talaş oluşum mekanizmasının baskın olarak kırılma şeklinde olması ve geometrinin bu aşamada delik delme işlemi üzerindeki etkisinin azaldığı şeklinde açıklanabilir. Yapılan deneyler sonucunda delik çıkışları incelendiğinde 30 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ilerleme değerinden sonra delik çıkışlarında kalite sorunlarının başladığı görülmüştür. Şekil 8 ile verilen güç değerlerinin neredeyse tamamı tork ve açısal hız sebebiyle oluşmaktadır. Bugüne kadar literatürde yapılan çalışmalar, çoğunlukla ilerleme yönündeki kuvvetin katman ayrışmasına sebep olduğu göstermekte, delik delme esnasında oluşan torkun etkisi ise genelde göz ardı edilmiştir. Delik delme esnasında oluşan toplam gücün delik delme işlemine olan etkisinin incelenmesi açısından yeni bir deney seti tasarlanmış ve deneyler yine aynı test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan parametreler Tablo 2 ile gösterilmiştir.

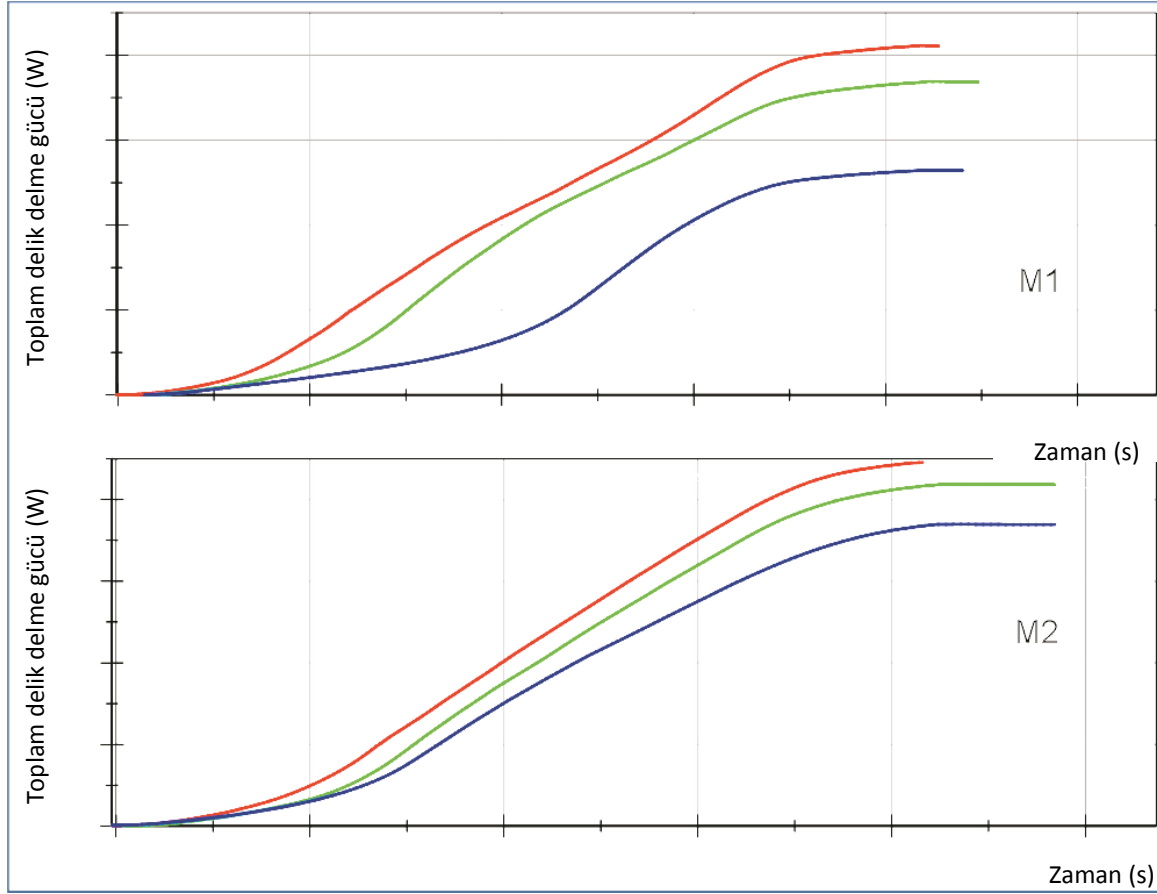
Tablo 2. Deneysel şartlar

Devir Değeri (Dev/dak)	Devir Başı İlerleme ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	İlerleme hızı (mm/dak)
3300	0.033	100
4000	0.25	100
500	0.2	100

Yeni deney setinde ilerleme hızı sabit tutulmuş, devir ve devir başı ilerleme miktarları ise değiştirilmiştir. Her deney için yeni takımlar (M1 ve M2) kullanılmıştır. Her şartta 3 adet delik delinmiştir. Şekil 9, bu deneylerde ölçülen ilerleme kuvveti ve tork değerlerini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre devir değeri düşürülüp, ilerleme değeri artırıldığında her iki matkap için de ilerleme kuvvetleri düşmektedir. Bu noktada daha önce belirtilen efektif talaş ve boşluk açısı değerlerinin yüksek ilerlemede daha da arttığı, bunun da talaş oluşumunu kolaylaştırdığı hatırlanmalıdır. Tork değerleri ise ilerleme kuvvetlerin tersine artmaktadır. M1 matkabının ilerleme kuvvet değerleri M2 matkabından biraz daha düşüktür. M2 matkabı ise M1 matkabına göre ilerleme arttıkça daha düşük tork değerleri vermiştir. İkinci kesme bölgesinin etkisini burada görülmektedir. M1 matkabı için 30 $\mu\text{m}/\text{dev}$ ve 3300 dev/dak parametresinde oluşan tork diğerlerine göre biraz olarak yüksektir.



Şekil 9. M1 ve M2 matkapları için ölçülen ilerleme kuvveti ve tork değerleri



Şekil 10. Yeni deney seti için hesaplanan toplam delik delme gücü değerleri.

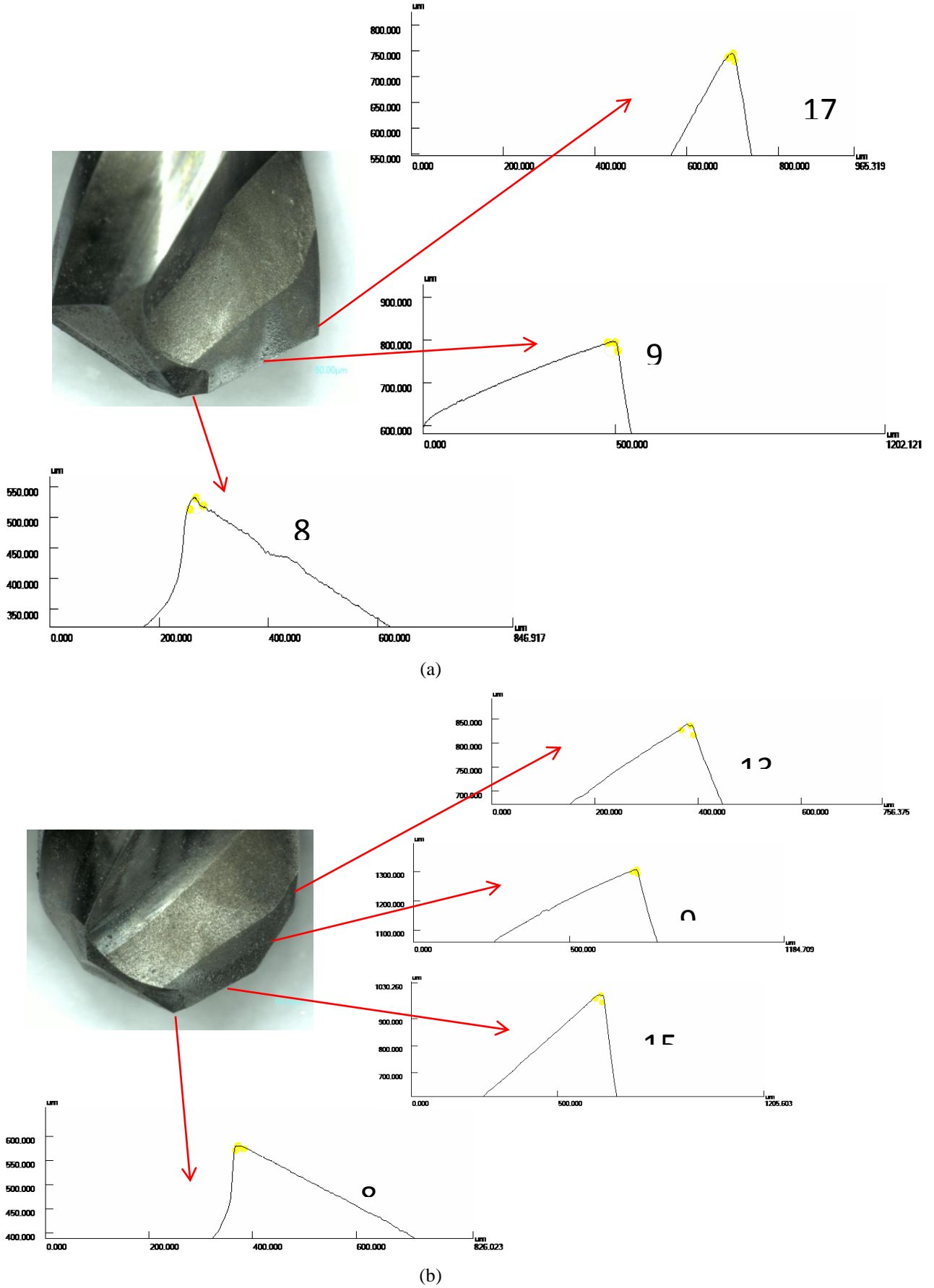
Şekil 10'da hesaplanan toplam delik delme gücü değerleri incelendiğinde, düşük devir ve yüksek ilerleme değerlerinde beklendiği gibi toplam güç azalmaktadır. M1 matkabı M2 matkabına göre daha düşük değerler göstermektedir. Bunun sebebi tork tepe değerlerinden ziyade tork eğrisinin zaman ile değişimi ile ilgilidir. Bu sonuçlar delik delme parametreleri, delik delme sırasında oluşan sıcaklıklar ve sıcaklıkların malzeme özellikleri üzerindeki etkisi ve dolayısıyla bunların arasındaki etkileşimin oluşan kuvvet ve tork çıktıları üzerine olan etkilerine yönelik ilginç sonuçlar göstermektedir.

5. DELİK ÇIKIŞ KALİTESİ VE TAKIM AŞINMASININ İNCELENMESİ

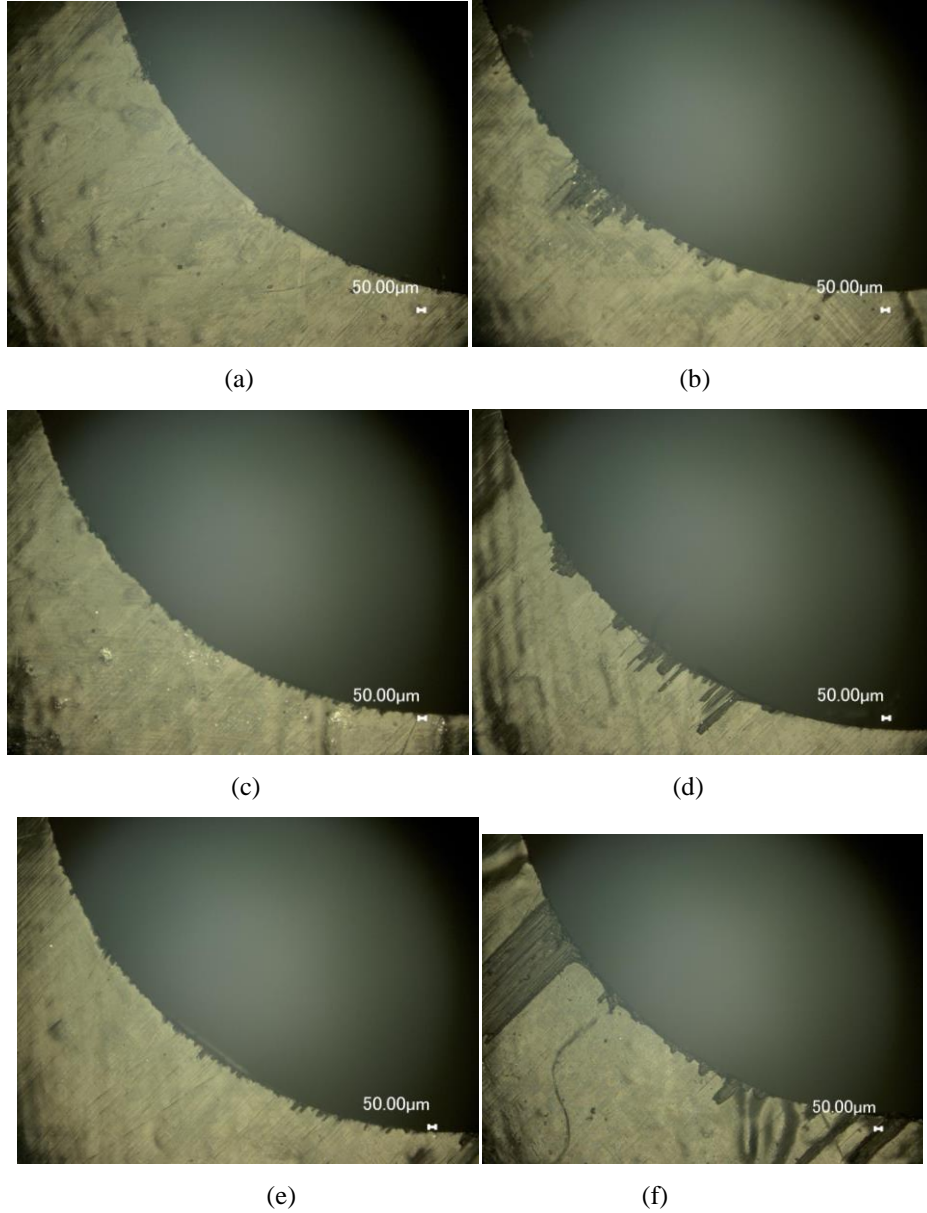
Elde edilen bu sonuçların delik çıkış kalitesi ve takım aşınması gibi değerlere nasıl etki ettiğinin anlaşılması için delinen deliklerin ve matkapların aşınma durumları incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 11 ve Şekil 12 ile gösterilmiştir. Kullanılmamış takımlarda 4-5 μm olan kesici kenar yarıçapı, yapılan deneylerin sonucunda göre az sayıda delik delinmiş olsa bile artış göstermiştir. Artış miktarı takımın geometrisine bağlı olarak değişim göstermiştir. M1 matkabında kesici kenar yarıçapı, enine kesme bölgesinden dış kesme kenarına doğru artış göstermektedir. Delik kalitesine etki eden dış kesici kenarda kesici kenarda yarıçap 17 μm değerine çıkmaktadır. M2 geometrisi ise sahip olduğu iki değişik uç açısı dolayısıyla M1 matkabına göre daha farklı bir aşınma gidişatı göstermiş, birinci kesici kenarda yüksek aşınma, ikinci kesme kenarında ise daha az aşınma ölçülmüştür. İkinci uç açısı kesici kenarı koruma görevini yerine getirmektedir.

Şekil 12 ise delik çıkışlarındaki durumu göstermektedir. Delik çıkış kalitesinin en probleml olduğu bölge fiber açısının delik ile 45° açı ile birleştiği bölgedir. Dolayısı ile bu bölge ayrıntılı olarak incelenmiştir. M2 matkabı her üç deney şartında da herhangi bir kalite sorunu olmayan delik çıkışları üretirken, M1 matkabı ise kesici

kenardaki aşınma kaynaklı olarak delik çıkış hataları ortaya çıkarmaktadır. Devir sayısı artar ve ilerleme düşerken kalite problemi daha da artmaktadır.



Şekil 11. Yeni deney seti sonunda matkapların aşınma durumu: a) M1, b) M2.



Şekil 12. Delik çıkışlarının durumu (Yukarıdan aşağıya doğru (3300 dev/dak-30 um/dev), (4000-25), (5000-20)):
(a-c-e) M2, (b-d-f) M1.

6. SONUÇLAR

Karbon fiber takviyeli polimer malzemelerin delinmesi konusunda literatür incelendiğinde genel olarak kesme hızının yüksek ve ilerleme hızının düşük tutulması gerektiği tavsiye edilmektedir. Düşük ilerlemede kesici kenar delik içinde daha fazla yol kat etmekte ve kesici kenar yüksek aşındırıcı özelliklere sahip iş parçasıyla daha uzun mesafede temas halindedir. Dolayısıyla düşük ilerleme değerlerinde yüksek ilerleme değerlerine kıyasla daha hızlı aşınma olmaktadır. Aşınmanın artması sonucunda artan ilerleme yönündeki kuvvet ile kabul edilebilir (katman ayrışması olmadan açılabilen) kalitede delik sayısı azalmaktadır. Bu çalışmada ilerleme değerinin artırılması ve buna karşılık olarak devir sayısının düşürülmesi ile takım ömrünün artırılabilceğini ortaya koymaktadır. Delik boyunca değişken ilerme değerlerinin uygulanması ve ilerleme yönünde takıma değişken genlikte ilerme uygulanması gibi teknikler ile yine takım ömrünün artırılabilceği anlaşılmaktadır. Çalışmada yapılan gözlemler şu şekilde özetlenebilir:

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- 1) Takım geometrisine uygun parametrelerin seçilmesi kabul edilir takım ömrü ve delik çıkış kalitesi için önem arz etmektedir. Çift uç açısına sahip takım geometrisi belli şartlarda tek aç açısına sahip olan geometriden daha iyi sonuç vermektedir.
- 2) Tork eğrisi delik delme esnasında harcanan güç miktarına doğrudan etki etmekte olup, takım aşınması ile ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla, katman ayrışmasına indirekt olarak etki etmektedir.
- 3) Delik delme parametrelerine göre delik delme işlemi esnasında sıcaklıkların hesaplanması ve karbon fiber kompozit malzemesinin sıcaklığa bağlı olarak malzeme özelliklerinin değişiminin anlaşılması, matkap tasarımı konusunda kilit rol oynamaktadır.

7. KAYNAKÇA

- [1] Chen, W.C., 1997, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 37, 1097-1108
- [2] Tsao, C.C., Hocheng, H., 2007, "Parametric study on thrust force of core drill", *Journal of Mater. Processing Tech.*, 192, 37-40.
- [3] Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P., 2000, "Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills", *Composites Part A*, 31, 1107-1115
- [4] Tsao, C.C., 2008, "Thrust force and delamination of core saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 37, 23-28.
- [5] Shyha, I.S., Aspinwall, D.K., Soo, S.L., Bradley, S., 2009, "Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 49, 1008-1014.
- [6] Rawat, S., Attia, H., 2009, "Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach", *CIRP Annals- Manufacturing Tech.*, 58, 105-108.
- [7] Faraz, A., Biermann, D., Weinert, K., 2009, "Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 49, 1185-1196.
- [8] Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M.E., Girod, F., 2010, "Modeling and tool wear in drilling of CFRP", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 50, 204-213.
- [9] Karpat, Y., Değer, B., Bahtiyar, O., 2012, "Drilling thick fabric woven CFRP laminates with double point angle drills", *Journal of Materials Processing Technology* 212, 2117– 2127.
- [10] Karpat, Y., Değer, B., Bahtiyar, O., 2014 "Experimental evaluation of polycrystalline diamond tool geometries while drilling carbon fiber-reinforced plastics", *Int J Adv Manuf Technol* 71:1295–1307.
- [11] Karpat, Y., Bahtiyar, O., Değer B., Kaftanoğlu, B., 2014, "A mechanistic approach to investigate drilling of UD-CFRP laminates with PCD drills", *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 81–84.
- [12] Sadek, A., Shi, B., Meshreki M., Duquesne, J., Attia, M.H., 2015, "Prediction and control of drilling-induced damage in fibre-reinforced polymers using a new hybrid force and temperature modelling approach", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.074>
- [13] Gühring firması delik delme katalogu
- [14] Karpat, Y., Bahtiyar, O., 2015, "Comparative analysis of PCD drill designs during drilling of CFRP laminates", 15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, *Procedia CIRP*
- [15] Lazar, M.B., Xirouchakis, P., 2013, "Mechanical load distribution along the main cutting edges in drilling", *Journal of Materials Processing Technology* 213, 245–260.

KARBONELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN DELİNMESİNDE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜ AZALTACAK OPTİMUM KESME PARAMETRELERİN SEÇİLMESİ

Birhan Işık^a, Mehmet Şah Gültekin^b

*a, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Karabük/TÜRKİYE,
birhanisik@karabuk.edu.tr*

*b, Şırnak Üniversitesi Şırnak Meslek Yüksekokulu Makine Bölümü, Şırnak/TÜRKİYE,
mehmetsahgultekin@sirnak.edu.tr*

Özet

Son zamanlarda mühendislik malzemeleri içinde hızla önemi artmakta olan karbonelyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin işlenebilirliğinin incelenmesi bu malzemenin daha fonksiyonel olarak kullanılabilirliğini sağlayacaktır. Bu çalışmada bu denli yüksek öneme sahip karbonelyaf takviyeli polimer kompozit malzemeyi çift atlamalı (twill) şeklinde hasır yapısına sahip plaka şeklinde üretilen bu plakalarda 0.2, 0.3 ve 0.4 mm/dev. ilerleme hızlarında, 50, 70 ve 90 m/dak. kesme hızlarında, farklı parametreler kullanılarak delme işlemi yapılmış delik içi yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Çıkan sonuçlara göre plakalarda ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmakta olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Karbonelyaf, polimer kompozit, delik delme, yüzey pürüzlülüğü

SELECTION OF APPROPRIATE DRILLING METHODS AND OPTIMUM CUTTING PARAMETERS ON DRILLING OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES

Abstract

The research of processibility of the polymer composite material strengthened by carbon fiber which has gained importance remarkably among engineering materials lately will provide the utility of this material more functionally. The first way which comes to mind when the montage is mentioned is being holed of materials. In this research, the process of holing the polymer composite material strengthened by carbon fiber which has such great importance has been done by producing that material in the shape of a plaque which has two different structures of straw as twill and using in this plaque different parametres in the expansion speed of 0.2, 0.3 and 0.4 mm/dev, in the cutting speed of 50, 70 and 90 m/min, in the The surface roughness decreases as the mouth number increases. The surface roughness decreases as the angle of cutting team of peak increases

Keywords: Carbon fiber, polymer composite, drilling, surface roughness.

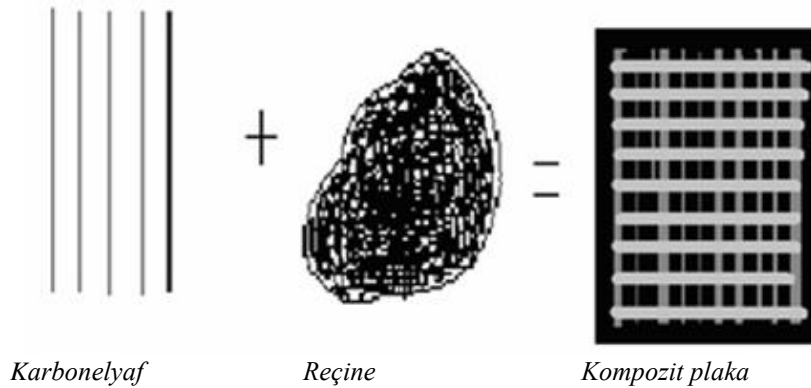
1. GİRİŞ

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin makro düzeyde birleşmesine denir. Kompozit malzeme, kendisini oluşturan malzemelerin her birinden farklı özelliklere sahip bir bileşik malzemedir. Günümüzde en çok kullanılan kompozitlerden biri betondur, çimento ve kumdan meydana gelen matris malzemesi, çelik çubuklar ile desteklenir. Bir diğer tanınmış kompozit ise kerpiçtir. Çamur ve samanın karıştırılmasıyla oluştuğuru bu malzeme eskiden beri bilinen belki de insanlık tarihinin en eski yapı malzemesidir ve halen Türkiye’de kırsal kesimde kullanılır.

Karbonelyaf ilk defa karbonun çok iyi bir elektrik iletkeni olduğu bilinmesinden dolayı üretilmiştir. Karbonelyaf çok yüksek ısı işlem uygulandığında elyaflar tam anlamıyla karbonlaşırlar ve bu elyaflara grafit elyafı denir. Günümüzde ise bu fark ortadan kalkmaktadır. Karbonelyaf epoksi matrisler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özellikleri gösterir. Karbonelyaf üreticileri devamlı bir gelişim içerisinde çalışmalarından dolayı karbonelyaflarının çeşitliliği sürekli değişmektedir. Karbonelyaf piyasada sürekli elyaflar ve dokuma olarak iki türlü bulunmaktadır. Bütün reçinelerle kombine edilebilirler.

Bugün yaygın olarak uçak, roket, füze gövdeleri, yüksek kalitede spor malzemeleri gibi maliyetin yüksek olmasının pek önemli olmadığı alanlarda kullanıldığı gibi lastik, otomotiv sanayi, beyaz eşya, basınca dayanımlı boru gibi daha düşük maliyet gerektiren sektörlerde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Önümüzdeki yıllarda uzay ve havacılık başta olmak üzere robotik ve gelişen diğer teknolojilerde kompozit malzemelere daha çok ağırlık verilecektir. Bu amaçla hem daha güçlü ve sağlam elyaflar, hem de daha yüksek ısı dayanımlı, çatlak oluşturmayan, darbe dayanımı yüksek ve sert polimer matrisler üzerinde çalışmalar dünyada ve ülkemizde devam etmektedir.

Polimer matrisli kompozit malzemede polimer malzeme reçinelerdir takviye elemanları ise elyaflardır. Kimyasallar ve diğer katkıları matrise niteliklerine göre özelliklerin geliştirilmesi amacıyla ilave edilirler. Polimer matrisli kompozit malzemeler, Klasik Laminasyon Tekniğiyle (KLT) üretilir. Bu yüzden polimer matrisli kompozit malzemelerin görünüşleri tabakalar şeklindedir. Karbonelyaf takviyeli polimer kompozit plakanın üretim aşamasının basit şeması Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Polimer matrisli kompozit malzeme

Polimer matrisli kompozitlerin bir bütün olarak üretilmesi ve montajları esnasında delme işlemi sırasında oluşan hasarlardan dolayı yüksek mali kayıplar meydana gelmektedir. Örneğin havacılık sanayisinde bu parçaların montaj esnasında yapılan delme işlemi sırasında oluşan hatalar %60’dır. Delme işlemi esnasında delik yüzeyinde oluşan yüksek gerilimlerin ve karbonelyaf malzemenin sahip olduğu mekaniksel özelliklerin neden olduğu kuvvetler sebebi ile delik duvar yüzey giriş ve çıkış bölgelerinde hasar oluşumu meydana gelmektedir. Uygun olmayan kesme parametrelerinin sebep olduğu hasarlar sonucunda karbonelyaf malzemelerin mekaniksel özellikleri büyük oranda etkilenmektedir. Karbonelyaf malzemelerin delinmesi teknolojik gelişmeler paralelinde CNC tezgahlarda geleneksel matkap tezgahlarına oranla daha hassas ve hasarsız yapılabilmekte buna rağmen istenilen kalitede delik yüzeyleri elde edilememektedir. Son yıllarda karbonelyaf malzemelerinde oluşan hasarların azaltılması ve hasar oluşumuna neden olan faktörlerin belirlenmesi üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda karbonelyaf malzemelerin delinmesi esnasında oluşan gerilim mekanizmalarının sebep olduğu hasarın azaltılmasında kesme parametrelerinin ve uygun geometride kesici takımların seçimi ile azaltılabileceğine dair sonuçlara ulaşılmıştır.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Delik delme talaşlı imalatı en çok kullanılan işlemdir. Montaj denince akla ilk önce delik operasyonları gelmektedir. Örneğin, Airbus A380 uçağının tek parça haline gelmesi esnasında 55.000 delik delme işlemi gerçekleştirilir.

Bu çalışmada çift atlamalı (twill) hasır yapısına sahip karbonelyaf takviyeli polimer kompozit plakalarda farklı kesme parametreleri ile (ilerleme, kesme hızı) delik delme işlemi yapılmış delik içi yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Kesme parametrelerinin delik içerisindeki yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde optimum kesme parametreleri belirlenerek yüzey pürüzlülüğünü azaltacak parametreler tavsiye edilmiştir.

Lin ve ekibi [1] yüksek kesme hızlarında camelyaf takviyeli hasır örgülü kompozit malzemelerin işlenmesi üzerine yapmış oldukları çalışmada, kesme hızlarında 50 m/dak ya oranla 100 m/dak gibi daha yüksek kesme hızlarında kesme hızının artışına paralel olarak takım aşınmasının da arttığı sonucuna varmışlardır.

Santhanakrishnan ve ekibi [2] karbonelyaf takviyeli polimer kompozitlerin işlenmesi üzerine bir çalışma ortaya koymuşlardır. 50 m/dak ve 60 m/dak gibi düşük kesme hızlarında yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri fakat 90 m/dak ve 100 m/dak gibi yüksek kesme hızlarında ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de düştüğü sonucuna ulaşmışlardır.

Faraz ve ekibi [3] KETP malzemelerinin karbür takımlarla değişik kesme parametreleriyle (kesme hızı, ilerleme, ağız sayısı) delinmesini incelemişlerdir. Çalışmalarında tüm kesme kenarı boyunca eşit ve düzgün dağıtılmış bir aşınma gözlemlemişlerdir. Az sayıdaki araştırmacılar ise sadece kesme kenarı aşınmasına sebebiyet veren çalışmayı yapmışlardır. Matkapları aşınma durumlarını göz önünde bulundurarak uygulanabilirliğini ve uygunluğunu değerlendirmek için test etmişlerdir. Mekanik yükleri (delme, itme ve tork) kaydedip, delik giriş ve çıkışlarının delaminasyonlarını ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini ölçmüşlerdir.

Tsao ve ekibi [4] KETP delmede uygun kesici takımların tespitine yönelik çalışmalarında delme işleminde iş parçasının matkap çıkışında delaminasyon sık görülür sonucuna ulaşmışlardır. Bunlara bağlı olarak endüstriyel deneyimleri, çekirdek matkap (twist drill) daha iyi delme kalitesini gösterir demişlerdir. Konvansiyonel bileşik çekirdek özel matkaplar delme talaş kaldırma yapışmasını önlemek için tasarlanmıştır. Ama dış matkap ve iç matkap arasındaki kesme hızı oranı, geleneksel bileşik çekirdek özel matkaplar için düşünülemez sonucuna ulaşmışlardır. Buna ek olarak, çalışmalarında, delme parametreleri (kesme hızı, kesme derinliği, iç matkap tipi ve delik çapı) bileşik çekirdek özel matkap kesici takımlarının itme kuvvetine olan etkisini incelemişlerdir.

Koplev ve ekibi [5] karbonelyaf takviyeli polimer kompozitlerde elyaf dizilişinin ve takım geometrisinin belli başlı kesme mekanizmalarıyla bağlantılı olduğu ve işlenebilirlik açısından kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme, uç açısı) yüzey pürüzlülüğüne etki ettiği kanısına varmışlardır.

Shing ve ekibi [6] karbonelyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin işlenmesinde kritik itme kuvvetlerinin teorik modellenmesi, kesici takım geometrisi ve işleme operasyonları değişkenlerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. karbonelyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin işlenmesini sonlu elemanlar analiz yöntemi ile belirlenmiştir. Tek atlamalı karbonelyaf takviyeli polimer kompozit plakaların işlenmesinde kesici takım geometrisinin talaş kaldırmanın neden olduğu hasar faktörü üzerine etkilerini sonlu elemanlar ile belirlenmiş ve optimum bir kesici takım geometrisi geliştirilerek karbonelyaf kompozit plakaların işlenmesinde fayda sağlamışlardır.

Zhang ve ekibi [7] dik kesmelere bağlı olarak tek taraflı karbonelyaflarla desteklenmiş epoksi reçineli kompozitlerin işlenebilirliğinden bahsederek talaşlı imalatı yapılmış bir parçanın mekanizmalarının büyük oranda elyaf oryantasyon açısından etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Farklı elyaf oryantasyon açıları olan numuneler, farklı kesme derinliklerinde, sabit kesme hızlarıyla işlenerek deneysel işlem gerçekleştirilmiştir. Deneylerin sonucunda 90° elyaf oryantasyon açısı kritik bir değer olarak değerlendirilmiş ve bunun üzerindeki bir açıda yüzey pürüzlülüğünün yüksek olacağını belirlemişlerdir. Bunlara ilave olarak, kesici takım talaş açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir.

Shyha ve ekibi [8] deneylerini tungsten karbür (WC) matkaplar kullanarak 3 mm kalınlığında KETP plakayı 1,5 mm çaplı delikler delerek gerçekleştirmişlerdir. Kesme parametreleri olarak (kesme hızı, ilerleme, uç açısı) ve KETP malzeme de tek atlamalı (plain) plakalar üzerinde ilerleme değerleri olarak (0.2 ve 0.4 mm/devir) ile

birlikte 12 delik delme işlemi yapmışlardır. Tepki değişkenleri olarak, deliklerinin sayısı, itme gücü ve tork delik giriş ve çıkış delaminasyonu ve delik çapı üzerinde durmuşlardır. En iyi sonuçları ise dokuma MTM44-1/HTS fırınlanmış malzeme ile elde etmişlerdir.

Krishnamoorthy ve ekibi [9] KETP malzemeler havacılıkla sanayisinde, spor ve ulaşım sektörlerinde önemli bir kullanım alanına sahip olmasını değerlendirmişlerdir. Endüstride en çok kullanılan operasyonun delik delme olduğunu delik delmede KETP malzemelerde hasara yol açtığını incelemişlerdir. Çalışmalarında Kesme hızının büyüklüğü (112 m/dak ve 120 m/dak) matkap türü parametreleri üzerinde durmuşlardır. delik giriş ve çıkışındaki delaminasyon ele alınması gereken en önemli kusurlardan biridir bu durumda kesme hızının yüksek değerlerde (100 m/dak ve 110 m/dak) ve ilerlemenin düşük değerlerde tutulmasında (0,15 ile 0,2 mm/dev) delik giriş ve çıkışında hasarın azaldığını ve delik içerisinde yüzey pürüzlülüğünün azaldığının sonucuna ulaşmışlardır.

Davim ve ekibi [10] karbonelyaf takviyeli kompozit katmanların delindikten sonra dijital resim analiz yöntemi yardımı ile tabakalara ayırma faktörünün belirlenmesi için yeni bir yaklaşım getirmeye çalışmışlardır. Deneysel çalışmalarında 13 katmanlı 3 mm kalınlığında karbonelyaf takviyeli malzemesi 5 mm çapında K20 helisel matkap ucu kullanılmış ve kullanılan kesme hızı 50, 60, 70 m/dak ilerleme 0,25 - 0,30 - 0,35 mm/dev olarak belirlenmişlerdir. Çalışmalarında belirlenen kesme parametrelerine bağlı olarak delinen karbonelyaf takviyeli katmanların giriş ve çıkış bölgelerindeki azami hasar bölgesinin alanı buna bağlı olarak delik giriş ve çıkış bölgesinde oluşan hasar ve tabakalara ayırma faktörü hesaplamışlardır. Kesme hızlarına bağlı olarak her iki tabakalara ayırma faktörü için oluşan değerler karşılaştırılmışlardır. Deneysel çalışma ile işleme parametreleri değiştirilerek oluşan hasar değerleri ölçülmüş ve matematiksel bir yaklaşım ile kompozitlerin delinmesinde hasarın karakteristik özellikleri belirlenmişlerdir. Kompozitlerin delinmesinden sonra hasar bölgesinin minimum değerlerde olduğunu gözlemlenmişlerdir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerde POLİTEK A.Ş. tarafından üretilen çift atlamalı (twill) hasır oryantasyonlu karbonelyaf takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır. Kompozit malzeme %95 elyaf %5 epoksi reçine karışım oranında 10 mm kalınlığında (30 katman) plakalar şeklinde hazırlanmıştır.

Üretilen KETP plaka 200x100x10 mm ebatlarına sahip çift atlamalı (twill) hasır yapısına sahiptir. Şekil.2.1'de çift atlamalı hasır yapısına sahip KETP plakanın fotoğrafı verilmiştir.



Şekil.2.1. KETP plakanın fotoğrafı Çift atlamalı (Twill)

Deneylerde kullanılan KETP malzemenin fiziksel özellikleri Çizelge 2.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. KETP Plakanın fiziksel özellikleri.

Reçine Tipi	Epoksi E201(hot-cured)
Dokuma Tipi	Twill2/2
Laminat yoğunluğu	1.55 g/cm ³
Elyaf oranı	(%) 55-60
Gerilme Direnci	760 MPa
Elastiklik Modülü, E	70 GPa

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Eğilme Dayanımı	780 Mpa
Kayma Modülü, G	55 Gpa
Reçine Geçiş sıcaklığı, Tg	140 °C
Karbonelyaf tipi	HT (Yüksek mukavemetli) Elyaf
Fitil tipi	12K(DIN65184)
Laminat kalınlığı ortalama kat sayısı	16
Laminatın kat kalınlığı	0,63 mm

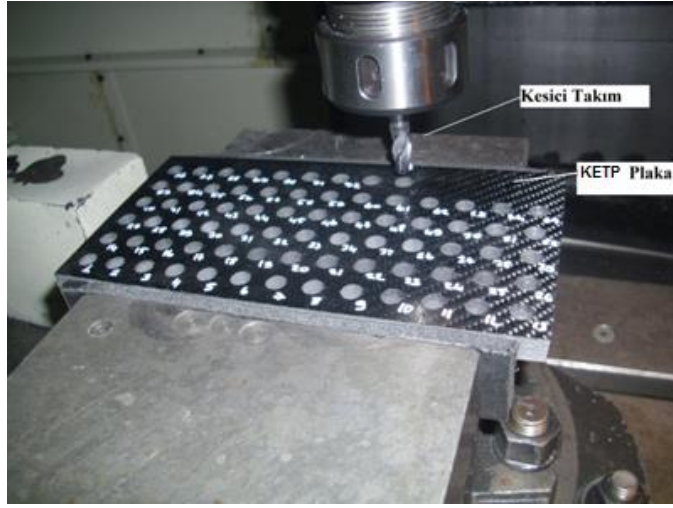
DeneySEL çalışma esnasında kesici takım firması tarafından imal edilmiş olan 8 mm çapında 2, 3, 4 ağızlı kaplamalı karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Üretici firma tarafından uç açıları istenilen özelliklerde bilmiş kaplamalı karbür kesici takımların mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Kaplamalı karbür kesici takımların mekanik özellikleri

Çap	8 mm
Boy	70 mm
Sertliği	14-24 Gpa
Basma mukavemeti	4100 - 5850 MPa
Darbe mukavemeti	0,34 - 1,35 j
Yoğunluğu	10 - 15 g/cm ³
Elastisite modülü	520 - 600 Gpa

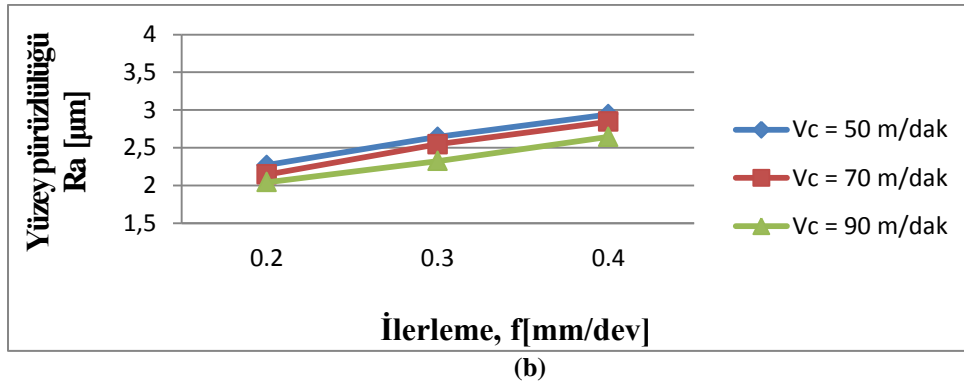
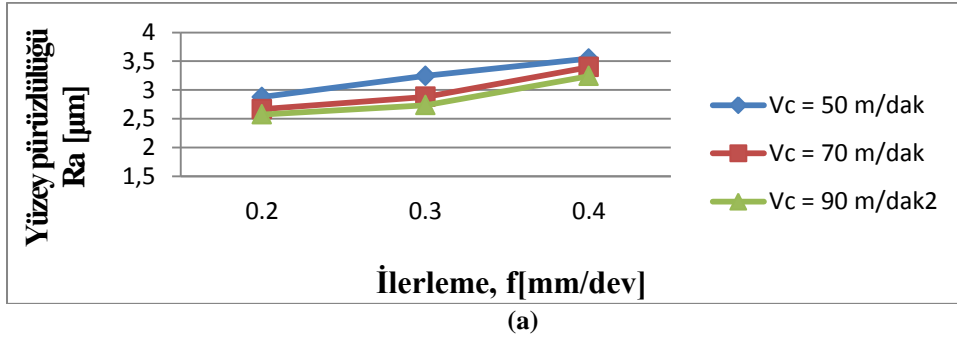
3. DENEYLERİN UYGULANIŞI

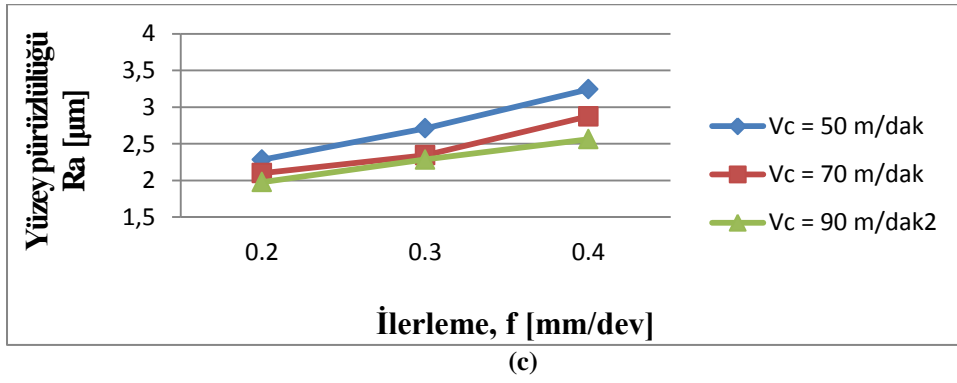
Hasır yapıda karbonelyaf takviyeli kompozit malzemeden 200x100x10 mm ebatlarında plaka halinde hazırlanan Twill (çift atlamalı hasır) şeklindeki deney numuneleri kullanılmıştır. Delme işlemi esnasında oluşan gerilme kuvvetlerinin oluşturması muhtemel etkilerinden dolayı deliklerin uzak mesafede konumlandırılması yapılmıştır. Böylece delik hasarlarının birbirlerini etkilememesi hedeflenmiştir. Farklı ağız sayısına (2, 3 ve 4) sahip olan kesici takımlar 8 mm çapında delikler delmek suretiyle yapılmıştır. Olası hataların doğuracağı yanlış sonuçları en aza indirmek için deneyler 3 kez tekrar edilmiştir. Takım aşınmasından dolayı net sonuçlar elde etmek için her 9 deneyde bir takım değiştirilmiştir. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri daha önce yapılmış çalışmalar ve ön deneyler göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Yüzey Pürüzlülüğünün kabul edilebilir değerler çerçevesinde incelenebilmesi için Davim ve ekibinin [10] yaptıkları çalışma dikkate alındığında kesme hızının artışının yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Bu yüzden tercih edilen kesme hızı değerleri HSM (Yüksek hızda işleme) uygulamalarındaki kesme değerlerinden daha düşük alınarak, yüzey pürüzlülüğü değerleri incelenebilir değerler seviyesine çekilmiştir. İncelenen literatürler ışığında tercih edilen kesme hızları 50, 70, 90 m/dak, ilerleme değerleri 0.2, 0.3, 0.4 mm/dev. olarak belirlenmiştir. Oluşturulan deney düzeneği Şekil 3.1'da görülmektedir.



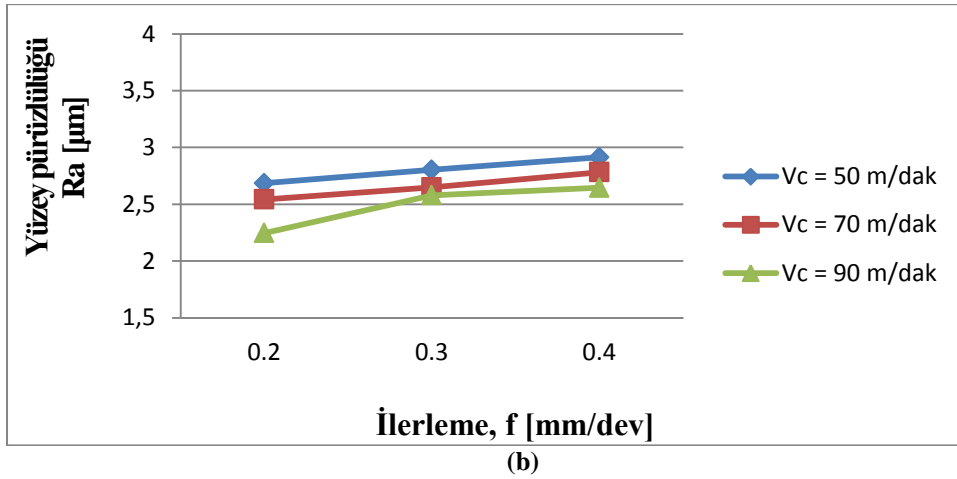
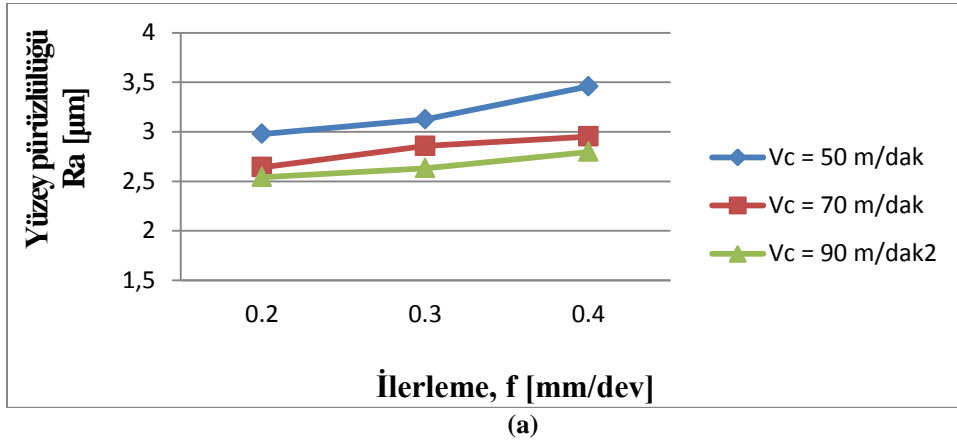
Şekil 3.1. KETP 'nin delinmesi

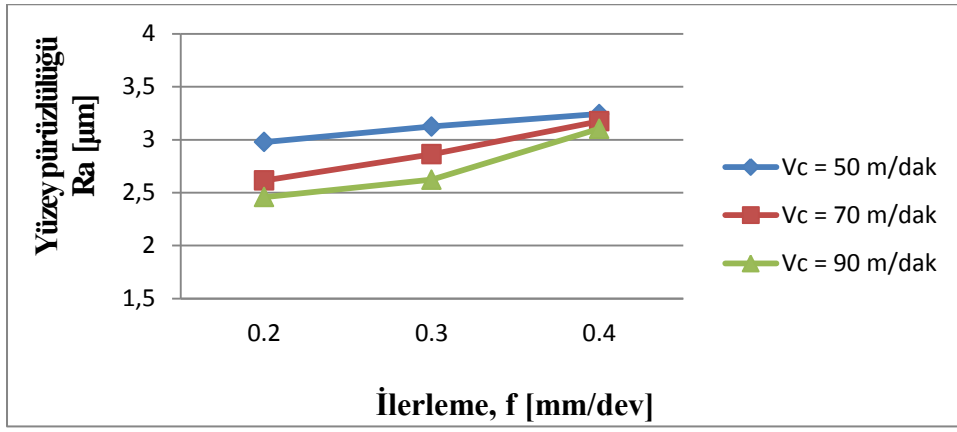
3.1. Çift Atlamalı (Twill) Kompozit İçin Yüzey Pürüzlülüğü - İlerleme Kıyaslama Grafikleri.





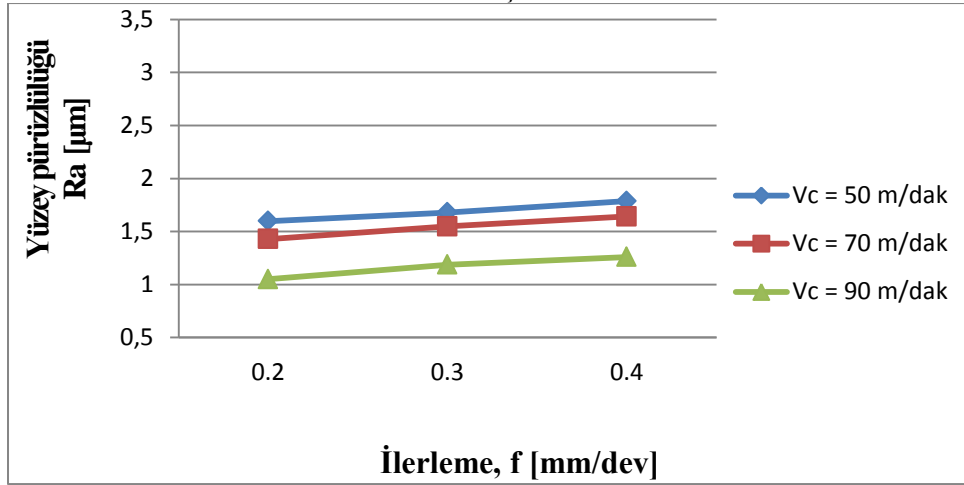
Şekil 3.2. İki ağızlı takımında yüzey pürüzlülüğü - ilerleme kıyaslama grafikleri a) $\Psi = 60^\circ$, b) $\Psi = 90^\circ$, c) $\Psi = 120^\circ$ için.



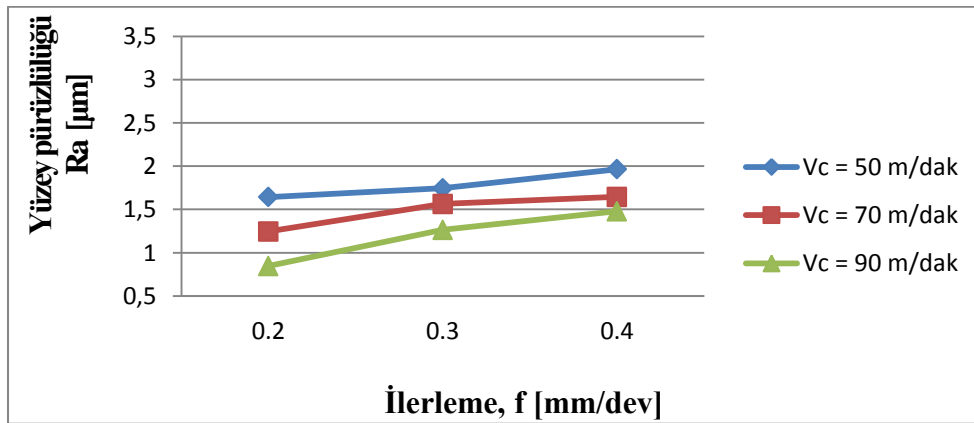


(c)

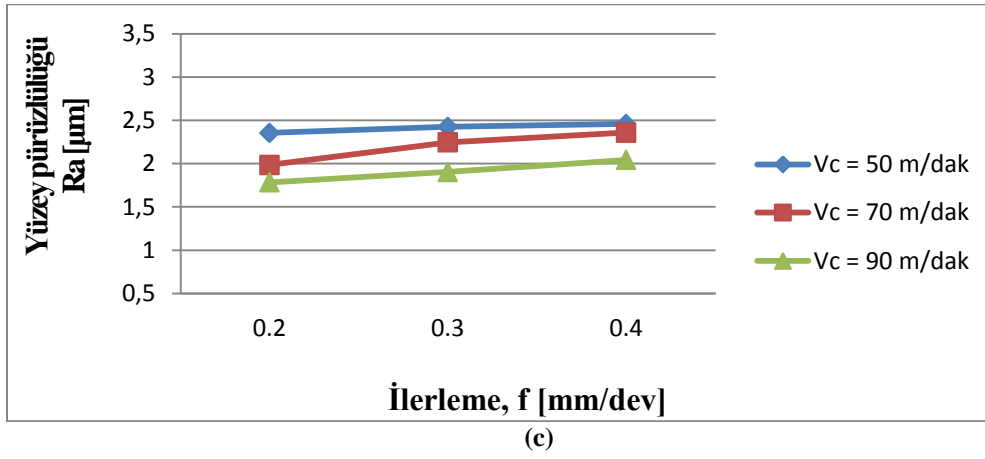
Şekil 3.3. Üç açılı takımda yüzey pürüzlülüğü - ilerleme kıyaslama grafikleri a) $\Psi = 60^\circ$, b) $\Psi = 90^\circ$, c) $\Psi = 120^\circ$ için.



(a)



(b)



Şekil 3.4. Dört ağızlı takımında yüzey pürüzlülüğü - ilerleme kıyaslama grafikleri
a) $\Psi = 60^\circ$ b) $\Psi = 90^\circ$ c) $\Psi = 120^\circ$ için.

Şekil 3.2'de iki ağızlı takımında ilerleme değeri arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerleri yükselmektedir ve yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonuçlar 0,2 mm/dev değerlerinde elde edilirken kesme hızına bağlı artışlarda ise düşük ilerlemelerde düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki artışlar tüm takım geometrilerinde ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğünde artış şeklinde olmakta fakat artışlar keskin artış şeklinde olmamaktadır.

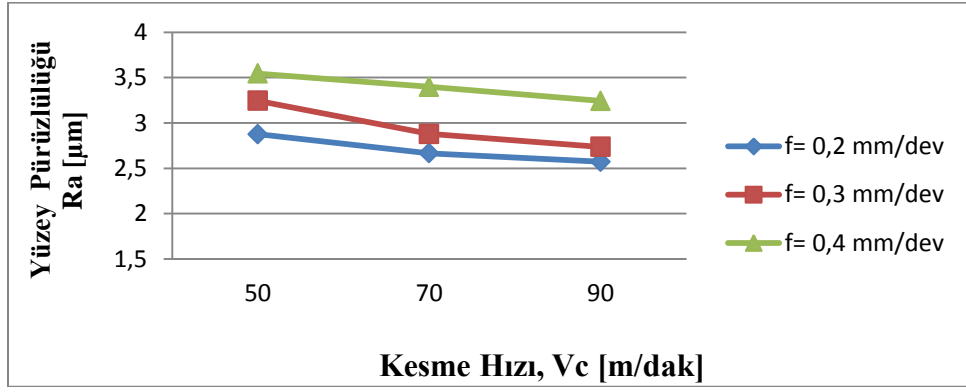
Şekil 3.2'de iki ağızlı takım 120⁰ uç açıda 90 m/dak 0,4 mm/dev ilerleme değerinde yüzey pürüzlülüğü çok az bir değerde daha yüksek çıkmaktadır bu durumun ilerleme değerinin diğerlerine göre daha yüksek olmasından kaynaklandığı görülmektedir.

Şekil 3.3'de üç ağızlı takımında iki ağızlı takıma kıyasla yüzey pürüzlülüğünde çok küçük düşüşler gözlenirse de ilerlemenin düşük değerlerde tutulması durumunda yüzey pürüzlülüğü değerleri de düşük çıkar gerçeğinde bir değişiklik gözlenmemektedir. 120o uç açılı takımında ilerleme değerinde 0.3 mm/dev den 0.4 mm/dev ilerlemeye geçildiğinde yüzey pürüzlülüğü değeri daha ani yükselmektedir.

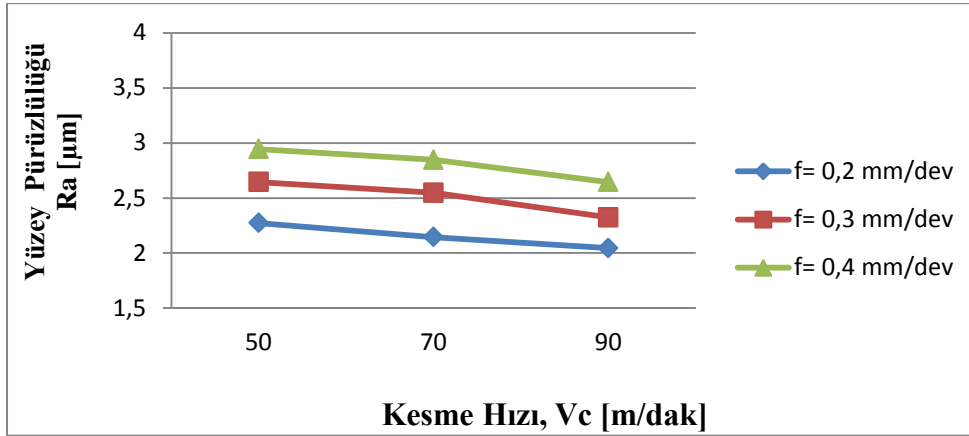
Şekil 3.4'de dört ağızlı takımında ise iki ve üç ağızlı takıma kıyasla yüzey pürüzlülüğünde çok küçük miktarda azalma yaşansa da 90o uç açılı takımında 0.3 mm/dev ile 0.4 mm/dev arasında hızlı bir artış gözlenmektedir ama bu durum bile genel sonuç olan düşük ilerleme yüksek kesme hızı gerçeğini değiştirmemektedir.

Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 incelendiği zaman tek atlamalı (plain) polimer kompozitlerde ortaya çıkan sonuçlardaki kesme hızı arttıkça düşük ilerleme değerlerinde yüzey pürüzlülük değerlerinin de düşük çıktığı sonucuna paralel sonuçlar görülmektedir. Çift atlamalı (twill) KETP malzemelerde kesme hızını düşürdüğümüzde ilerleme değerlerini de arttırdığımızda yüzey pürüzlülüğü değerleri hızla yükselmektedir.

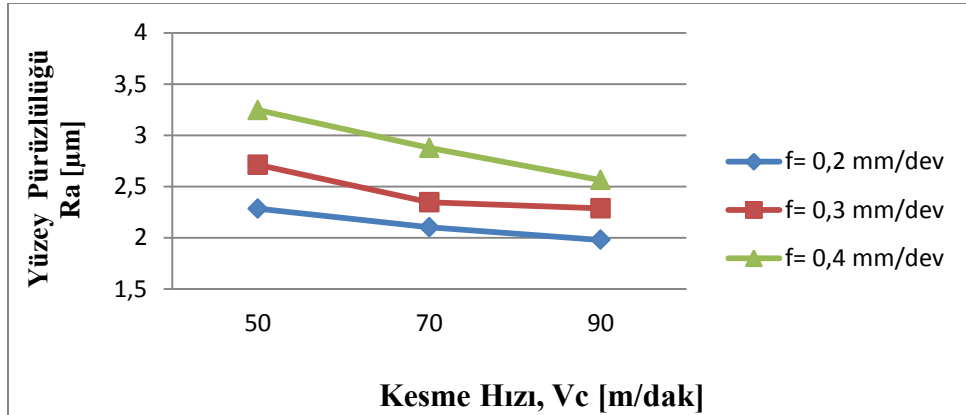
3.2. Çift Atlamalı (Twill) Kompozit İçin Yüzey Pürüzlülüğü - Kesme Hızı Kıyaslama Grafikleri.



(a)



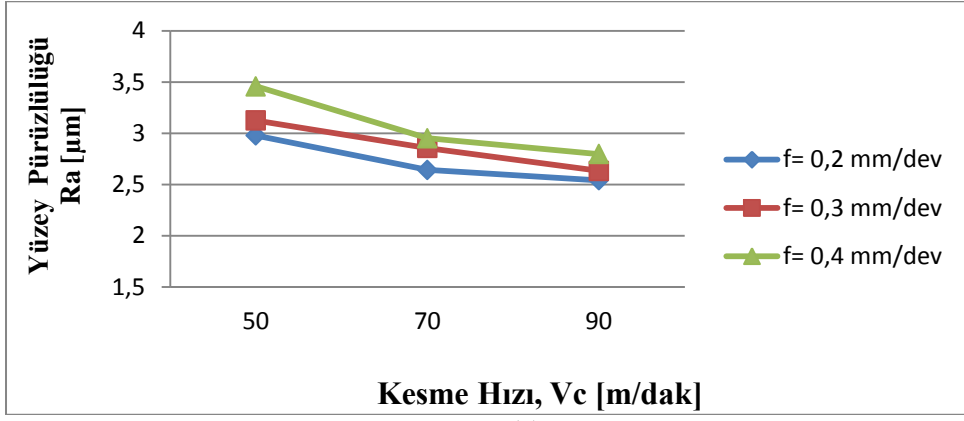
(b)



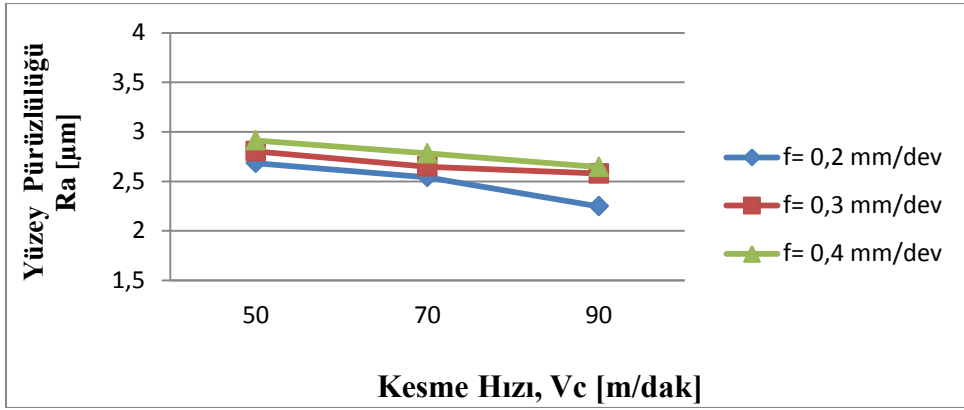
(c)

Şekil 3.5. İki ağızlı takımında yüzey pürüzlülüğü - kesme hızı kıyaslama grafikleri

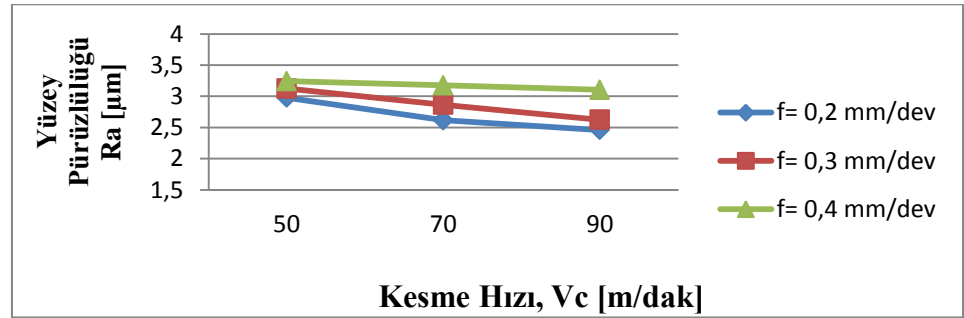
a) $\Psi = 60^\circ$, b) $\Psi = 90^\circ$, c) $\Psi = 120^\circ$ için.



(a)

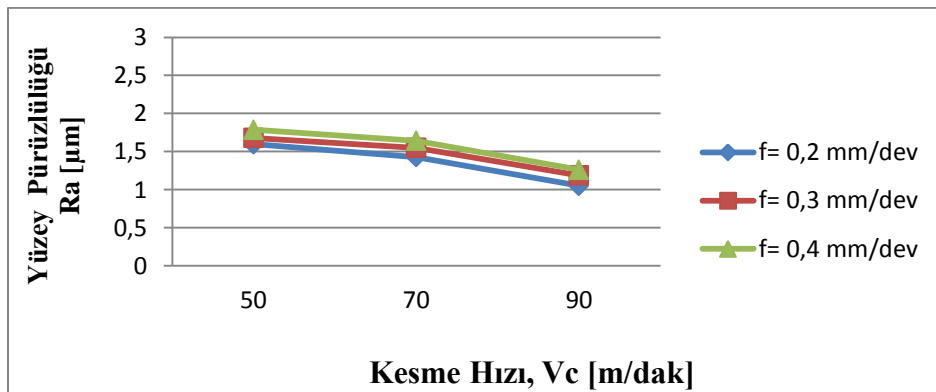


(b)

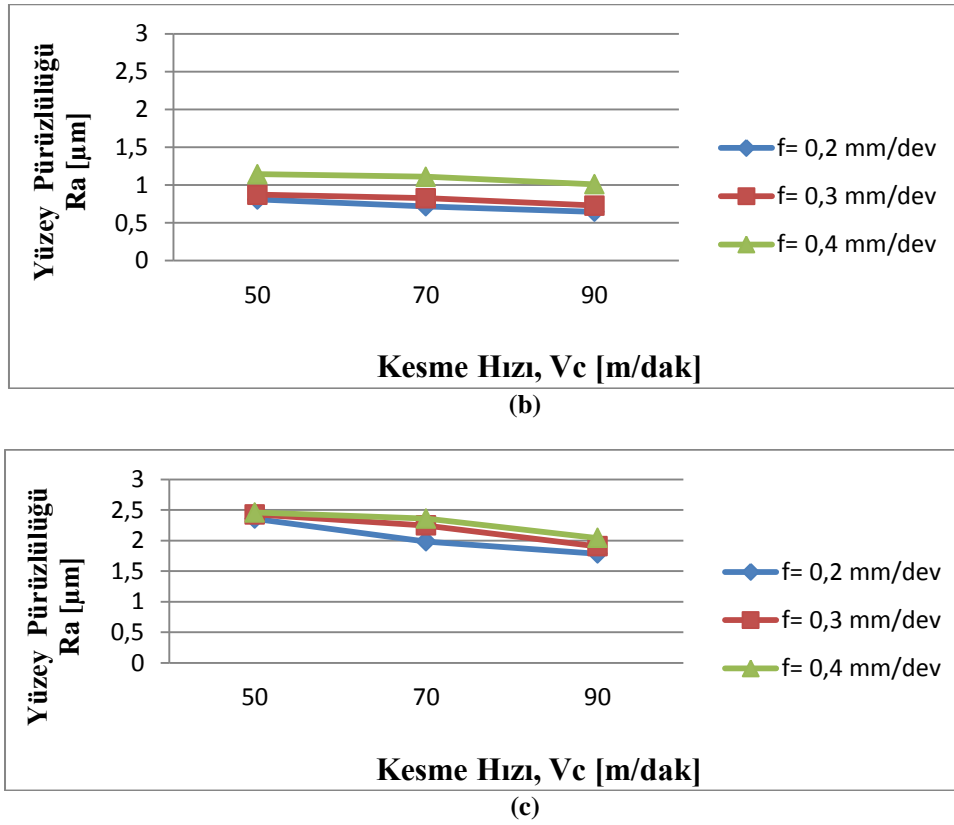


(c)

Şekil 3.6. Üç ağızlı takımda yüzey pürüzlülüğü - kesme hızı kıyaslama grafikleri a) $\Psi = 60^\circ$, b) $\Psi = 90^\circ$, c) $\Psi = 120^\circ$ için.



(a)



Şekil 3.7. Dört ağızlı takımında yüzey pürüzlülüğü - kesme hızı kıyaslama grafikleri
a) $\Psi = 60^\circ$, b) $\Psi = 90^\circ$, c) $\Psi = 120^\circ$ için.

Şekil 3.5'da iki ağızlı takımında kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değeri düşmektedir. 50 m/dak kesme hızında 70 ve 90 m/dak kesme hızlarına oranla yüksek yüzey pürüzlülük değerleri ortaya çıkmaktadır. Kesme hızlarını arttırdıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de düştüğü gerçeği bir kere daha ortaya çıkmaktadır. Yalnız uç açılarının artışında ise bu oran kadar olmasa da küçük oranlarda düşmeler gözlenebilmektedir.

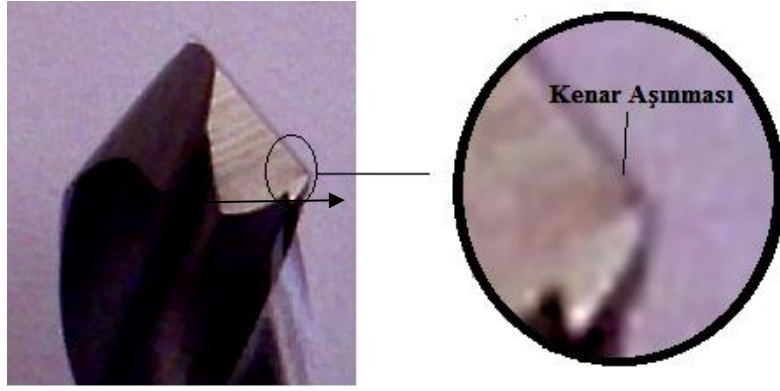
Şekil 3.6'de üç ağızlı takımında ise 60° uç açılı takımında 90° ve 120° ye oranla daha yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri olsa da kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değeri de azalır gerçeğinde bir değişiklik olmamaktadır. Kesme hızının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerleri düşmektedir fakat çok ani düşüşler gözlenmemektedir.

Şekil 3.7'de dört ağızlı takımında ise 90° uç açılı takımında 60° ve 120° ye oranla daha düşük yüzey pürüzlülüğü değeri tespit edilse de gerek 60° uç açılı takımında gerekse de 90° ve 120° uç açılı takımında kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerleri düşmektedir. Kesme hızının artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerinde düşüşler görülmekte fakat çok ani düşüşler gözlenmemektedir.

Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'deki sonuçlar göz önünde tutulduğunda ise Kesme hızı ağız sayısı 2, 3 ve 4 ağızlı takımlarda düşük ilerlemede yüksek kesme hızında düşük pürüzlülük vermektedir.

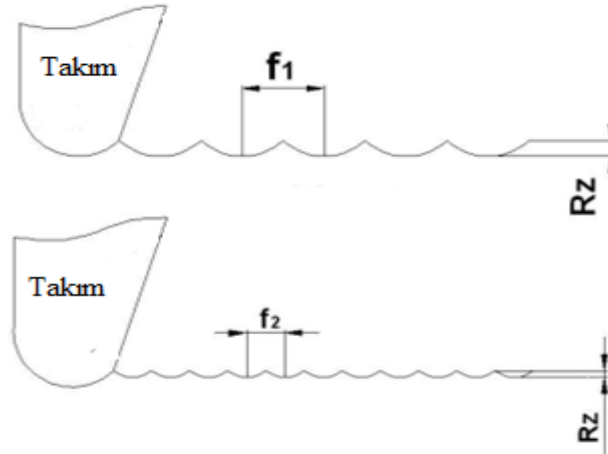
4. TARTIŞMA

Karbonelyaf takviyeli plastik kompozitlerin delinmesi işleminde karbon oranının yüksek olması (% 95 oranında karbon) sebebi ile etken talaş davranışını karbon yönlendirmiştir. Reçinenin etkisi yok denebilecek kadar azdır. Karbon iş parçası yüzeyi ile takım arasına gelmesi sonucunda kesici takımlarda kenar aşınmaları oluşmuştur. Kenar aşınması Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Kesici takımda oluşan kenar aşınması.

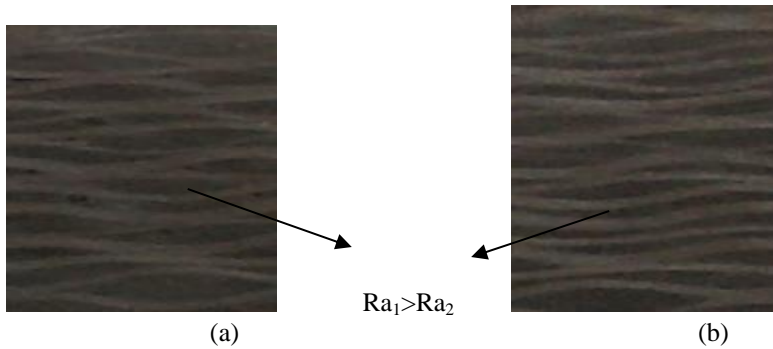
Deneysel sonuçlar bölümündeki grafiklerden yüzey pürüzlülüğüne en çok etkide bulunan kesme parametrelerinin sırasıyla ilerleme, kesme hızı ve ağız sayısı olduğunu, yüzey pürüzlülüğüne etki eden başlıca faktör olan ilerleme, metallerin işlenmesinde olduğu gibi artışıyla beraber pürüzlülük değeri artmış, ilerlemenin azalmasıyla birlikte pürüzlülük azalmıştır. Şekil 4.2'de kesici takımın işlenen yüzey üzerinde bıraktığı izler gösterilmiştir. Bu izlerin birbirine yakın olması durumunda Yüzey Pürüzlülüğü değeri düşük değerlerde gerçekleşmekte, uzak olması durumunda ise artış eğilimi göstermektedir. f_1 ilerlemesi büyük ilerlemeleri (0,3 ve 0,4 mm/dev), f_2 ilerlemesi ise küçük ilerlemeyi (0,2 mm/dev) simgelemektedir. $f_1 > f_2$ olduğundan f_1 ilerlemesindeki Rz değeri daha büyüktür. Azami yüzey pürüzlülüğü değerinin (Rz) artışı Ra'yı da arttırmaktadır.



Şekil 4.2. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

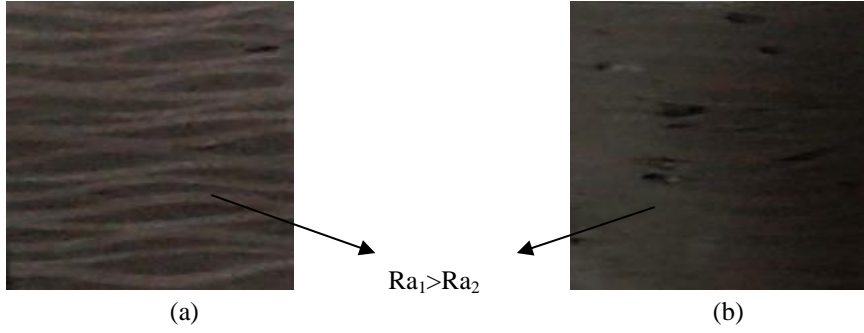
İlerlemenin artması ile ilerleme kesme kuvveti daha etkin bir kuvvet olur. Sonuç olarak delik içerisindeki temiz ve az hasarlı olması istenen deliklerin yüksek ilerleme değerleri ile delinmesi önerilmektedir. İlerlemeye bağlı olarak delik içerisinde oluşan hasar Şekil 4.2'de görülmektedir.

Yapılan çalışmada ilerlemenin artması ile delik içerisinde oluşan pürüzlülük değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.2. 2 Ağızlı 60° uç açılı takımında farklı kesme hızı değerlerinde delik içerisinde oluşan yüzey kalitesi a) 50 m/dak, b) 90 m/dak için.

Kesme hızının artması ile iç bölgede yüzey pürüzlülüğünün azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç Santhanakrishman [2] çalışmaları ile paralellik göstermektedir.



Şekil 4.3. 2 Ağızlı takımda farklı uç açılarında delik içerisinde oluşan yüzey pürüzlülüğü a) 90°, b) 60° için.

5. ÖNERİLER

Kesme hızının artışıyla yüzey pürüzlülüğü azalma eğilimindedir. Bunun nedeni plastik deformasyon hızının kesme hızının artışına bağlı olarak artmasıdır. Sonuç olarak yüksek kesme hızlarında (70 ve 90 m/dak) plastik deformasyon hızının artışıyla malzemeden ayrılan talaşlar delinen yüzeyden daha çabuk ayrılarak daha düzgün bir yüzey elde edilmesine imkan tanımıştır. Bu sonuçlarda Davim [10] in çalışmalarıyla paralellik göstermektedir.

Çift atlamalı (twill) polimer matrisli kompozit malzeme için;

Kesme hızlarındaki artış delik içerisindeki yüzey pürüzlülüğü değerlerini düşürmektedir.

İlerleme artışına bağlı olarak delik içerisindeki yüzey pürüzlülüğü değerlerinde yükselme görülmektedir.

Bu sonuçlar göz önünde tutulduğu zaman ise;

Çift atlamalı (twill) polimer matrisli kompozit malzeme yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşük olması isteniyorsa kesme hızının yüksek ilerlemenin de düşük seçilmesi gerekmektedir. Bu sonuçlara dayanarak;

- Dört ağızlı takım ile kesme hızı 90 m/dak, İlerleme 0,2 mm/dev ve kesici takım uç açısının 120° seçilmesi gerekir.

Yapılan deneysel çalışma sonucunda genel olarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- İlerleme arttıkça yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.
- Kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Lin, SC. and Chen, IK. "Drilling of carbon fiber-reinforced composite material at high speed", International Journal of Machine Tools Manufacturing, 156–62 (1996).
- [2] Santhanakrishnan G, Krishnamurthy R, Malhotra SK. Machinability characteristics of fibre reinforced plastics composites. J Mech Working Technol 17:195–204. (1988) drilling composite laminates", Composites Science and Technology, 67(9): 1939–1945 (2007).
- [3] Faraz, A., Biermann, D., Klaus, W., Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling KETP composite laminates, International Journal of Machine Tools & Manufacture 49: 1185–1196 (2009).
- [4] C. C. Tsao "Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (KETP)", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 37 (1-2): 23-28 (2007b).
- [5] Koplev, A., Lystrup, A., Vorm, T., The cutting process, chips and cutting forces in machining KETP. Composites ;14 (4) : 371– 6 (1983).
- [6] Singh, I., Bhatnagar, N. and Viswanath, P., "Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastics: Experimental and finite element study", Materials and Design, 29 : 546-553 (2008).
- [7] Zhang, L.C, Wang, X.M, " An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics", International Journal of Machine Tool & Manufacture, 43 : 1015-1022 (2003).
- [8] Shyha, S., "Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in KETP" International Journal of Machine Tools & Manufacture, 12(49): 1008 - 1014 (2009).
- [9] Krishnamoorthy, A. "Delamination prediction in drilling of KETP composites using artificial neural network" Journal of Engineering Science and Technology, 6 (2): 191-203 (2011).
- [10] Paulo, J.Dawim., Campos Rubio, J. and Abrao, A.M., "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after

ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN DELİNMESİNDE ÇİFT AÇILI MATKAP UÇLARIN İTME KUVVETİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ali Ünüvar^a, Halil Burak Kaybal^a ve Ahmet Avcı^a

*a, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Konya/TÜRKİYE,
aunuvar@selcuk.edu.tr
halilburak@selcuk.edu.tr
aavci@selcuk.edu.tr*

Özet

Elyaf takviyeli polimer kompozitler, üstün özelliklerinden dolayı yapısal endüstride tanınan malzemelerdir. Bununla birlikte, bu malzeme üzerinde, montaj imkanı sağlamak için oluşturulacak deliklerde bir takım hasarlar meydana gelmektedir. Delaminasyon olarak nitelendirilen bu son derece ciddi hatalar, malzeme çalışma ömrünü azaltmaktadır. İtme kuvveti delaminasyonun oluşumu ve dağılımı için önemli bir faktördür. İtme kuvveti ve buna bağlı olarak delaminasyon uygun bir matkap ucu geometrisi ile kontrol altına alınabilir. Bu çalışmanın amacı takım geometrisinin itme kuvveti ve delaminasyona etkisini incelemektir. Delme deneyleri katkısız cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeler ve nanokil katkılı cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler üzerinde farklı çift uç açılı matkap uç ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak takım ucu geometrisinin itme kuvveti ve delaminasyon oluşumuna etkisi olduğu ve en az delaminasyon bölgesinin 118° -90° uç açılı matkapta meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kesme parametreleri Taguchi tekniği ile analiz edilerek optimum kesme parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Nanokil, Cam Elyaf kompozit, Çift Açılı Matkap Ucu, Taguchi yöntemi

INVESTIGATION OF INFLUENCE OF THE DOUBLE CONE DRILL GEOMETRY ON THE THRUST FORCE IN DRILLING OF FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES

Abstract

Fiber reinforced polymer composites are recognized for structural engineers due to their superior properties. However several kinds of damages are occurred on this materials while creating holes for assembly. The most serious damage which called delamination is reduced service life of the component. Thrust force is an important factor for degree of delamination. Thrust force and delamination can be restrained by proper drill point geometry. The aim of this study is investigated the impact of double cone drill point geometry on thrust force and delamination. Drilling experiments were performed on glass fiber reinforced epoxy polymer composites and nanoclay added glass fiber reinforced polymer using carbide drills with different point geometries. The results shows that double cone drill point has significant influence on thrust force and delamination. Moreover 118° -90° angles present the least delamination. Also, the experiments which utilizes Taguchi Method was used and an optimal combination of parameters were determined.

Keywords: Nanoclay, Glass Fiber composite, Taguchi method, double cone Drill geometry

1. GİRİŞ

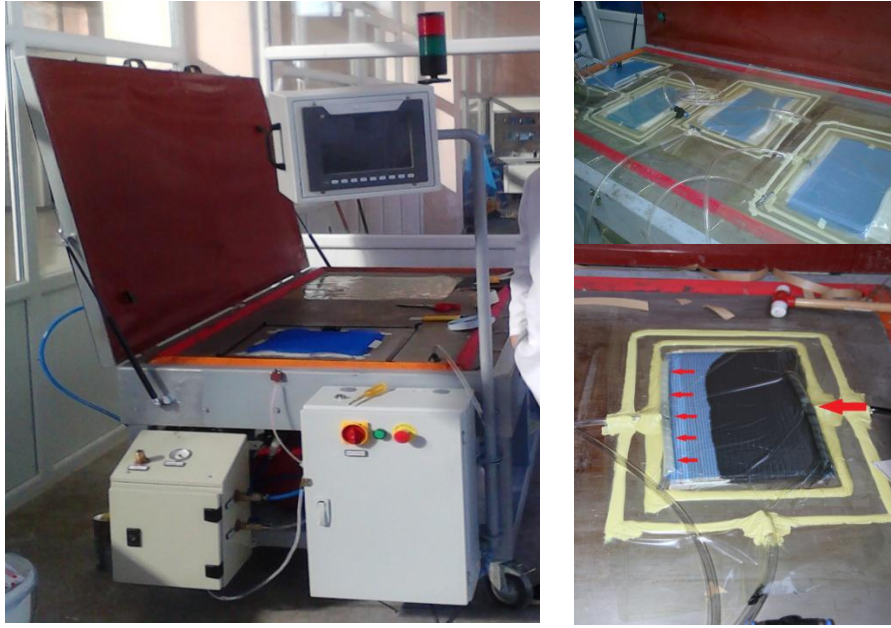
Kompozit malzemeler mühendislikte, birçok uygulamada metal ve alaşımların yerini almışlardır. Özellikle fiber takviyeli kompozit malzemeler doğasından gelen özelliklerinden dolayı, uzay, havacılık, otomotiv ve birçok alanda uygulanabilir hale getirilmiştir. Kompozit malzemelerin işlenmesinde normal metal ve alaşımlarının işlenebilirliğinin dışında farklı birçok durum söz konusudur [1]. Malzemenin işlenebilirliğe davranışı, malzemenin anizotropik yapısı, homojen olup olmasının yanında, takviye malzemesine, matris özelliklerine ve elyaf hacim oranına da bağlıdır. Takım ucu sırasıyla işlemeye karşı farklı davranan matris ve takviye malzemesi ile karşılaşır. Matrisin ve takviye malzemesinin takım ucuna farklı etkilerde davranışı kompozit malzemelerin işlenmesinde farklı geometride ve aşınma direnci yüksek takım uçlarına olan tercihi arttırmıştır [2]. İşleme operasyonları arasında, delme işlemi malzemelerin hızlı ve kolayca montaj edilebilmesi için çokca takip edilen işleme tekniğidir. Delme operasyonları esnasında birtakım matris çatlağı, elyaf çekmesi, elyaf kopması, tabakalar arası çatlak ve tabaka ayrışması gibi hasar mekanizmaları, buna ilave olarak takım geometrisine bağlı hatalar yaygın olarak bulunur. Delaminasyon hataları bunların yanında özellikle daha zararlı olabilir çünkü malzemenin ömrünün kısalmasına sebep olan çıkış noktalarından biridir. Bu durumu ortaya çıkarabilecek birtakım mekanizmalar vardır. Takım ucunun malzemenin kalınlığı boyunca hareketinden sonra en üst tabakada sıyrılma vasıtasıyla meydana gelen delaminasyon, yüksek termal gerilmeler ve çıkış kenarlarında meydana gelen delaminasyonlar bahsi geçen mekanizmaların en önemlileridir [3]. Bu sebeple bu çalışmada, cam elyaf takviyeli epoksi polimer matrisli kompozit malzemenin delinmesi esnasında meydana gelen delaminasyon ve itme kuvvetlerinin etkileri üzerine araştırma gerçekleştirilmiştir. Birçok araştırmacı bu konu üzerinde araştırma gerçekleştirmiştir fakat farklı uç açıları ile yapılan çalışmalar sınırlıdır.

Fiber takviyeli kompozitlerin delinmesinde delaminasyonları kontrol edebilmek için özel takımlara ve tekniklere ihtiyaç vardır. Yapılan çalışmalarda delaminasyon seviyesi direk olarak kesme parametreleri değerleriyle özellikle de ilerleme ile ilişkilendirilmiştir [4]. Ayrıca delaminasyon seviyesinin itme kuvveti ile de bağlantılı olduğu, itme kuvvetinin kritik değerinin altında delaminasyonun ihmal edilebileceği de gözlenmiştir [5]. Chen yaptığı çalışmada uygun delme parametrelerinde ve uygun takım geometrisi seçimiyle neredeyse hasarsız delikler elde edilebileceğini göstermiştir [6]. Işık ve arkadaşları 8 mm'lik karbür matkap ucu ile yaptıkları çalışmada üç farklı uç açısı kullanarak cam elyaf üzerindeki hasar faktörleri üzerinde çalışmışlardır [7]. Murthy ve arkadaşları, cam elyaf kompozit malzemelerin delinmesinde takım açısının, itme kuvvetini ve yüzey pürüzlüğünü en fazla etkilediğini ve bunun üzerine malzeme kalınlığı, elyaf hacim oranı, kesme hızı ve ilerlemenin daha az etkili olduğu yönünde görüş bildirmiştir [8]. Yapılan çalışmalar işlenebilirlik prosesi için çok önemli faktörler üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. İtme kuvvetinin takım geometrisi ve ilerleme ile kontrol altına alınabileceği tespit edilmiştir. Takım ucu geometrisi parametreleri içinde de kesme kenarı ve uç açısının itme kuvveti üzerine en fazla etkiyi gösterdiği vurgulanmıştır. Sunduğumuz bu çalışmada farklı uç geometrisine sahip matkap uçlarının itme kuvvetine ve delaminasyona etkisi üzerinde araştırılma yapılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

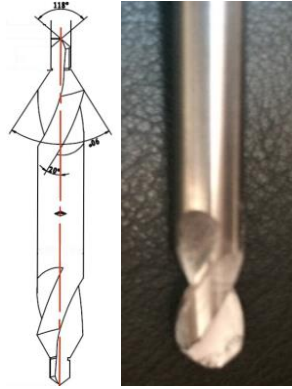
Delme işleminde kullandığımız nanokil katkılı (ağırlıkça % 1) cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzeme, vakum infzyon tekniği ile üretilmiştir. Üretimde kullanılan cam elyaflar 200 g/m² özgül ağırlığa sahip olup Dost Kimya Ltd. Şirketinden temin edilmiştir. Kullanılan epoksi reçine ticari olarak bulunan ve Momentive firması tarafından sağlanmış olan MGS-L285 laminasyon reçinesidir. Reçine kürleştiricisi ise yine Momentive firması tarafından sağlanan MGS-H285 dir. Kürleşme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve jelleşme zamanı firmanın belirttiği oranlarda (ağırlıkça % 25) yaklaşık 3-4 saattir.



Şekil 1. Vakum infüzyon üretim tezgahı

Öngörülen ebatta 12 katman olacak şekilde kesilen cam elyaf lar vakum infüzyon tezgahına Şekil 1. deki gibi bağlanarak, epoksi emdirme işlemleri tamamlanıp katılma sürecini tamamladıktan sonra delme işlemine hazır hale getirilmiştir.

2.2. Kesici Takım ve Ekipmanlar



Şekil 2. Çift açılı matkap ucu

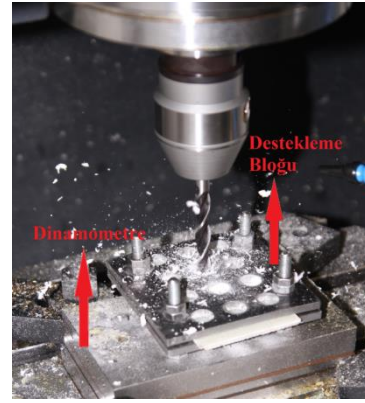
Kompozit malzemeler, özel olarak Taegutec firması tarafından üretilen, farklı çift uç açılına sahip sinterlenmiş karbür uç ile 8 mm çapta delinmiştir (Şekil 2). Çizelge-1 de deneylerde kullanılan çift uç açılı matkap uçları ve açı değerleri verilmiştir. Delme esnasında meydana gelen itme kuvvetlerinin ölçülmesi için KISTLER marka 9257B model dinamometre kullanılmıştır. Delme işlemleri, malzemelerin destekleme blokları arasında sıkıştırılıp dinamometre üzerine bağlanmasıyla, Mazak Varyaxis 500 CNC işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Dinamometre üzerinden alınan itme kuvveti verileri Dyoneware yazılımı vasıtasıyla bilgisayarda grafik ve numerik olarak kaydedilmiştir. Dokuz farklı çift uç açısına sahip matkap uçları ile yapılan delme prosesinin kesme parametreleri Çizelge-2 deki gibidir. Delme işleminin gerçekleştiği Mazak marka CNC tezgahı ve malzemelerin tezgah üzerine bağlandığı destekleme bloğu ve dinamometre Şekil 3. de gösterilmiştir.

Çizelge-1. Matkap ucu açıları

Takım No	ϕ	ϕ'
1	100	60
2	100	75
3	100	90
4	118	60
5	118	75
6	118	90
7	140	60
8	140	75
9	140	90

Çizelge-2. Kesme Parametreleri

Parametreler	Değerler		
Kesme Hızı (m/dk)	50	67	90
İlerleme (mm/dev)	0.05	0.1	0.2
Matkap Ucu	K15 kalite Sinterlenmiş Karbür		
Matkap Ucu Çapı	8 mm		



Şekil 3. Delme prosesi ekipmanları

2.3. Taguchi Metodu

Endüstriyel şartlar altında uygulanan klasik deney tasarım yöntemleri verimli olamamaktadır. Sistemi etkileyen faktörlerin sayısı arttıkça gerekli olan deney sayısı artmaktadır. Bununla birlikte maliyetler yükselmekte ve uygulamalar zorlaşmaktadır. Böyle durumlarda Taguchi Metodu uygulanması daha verimli ve kolay olacaktır. Karar vermeyi gerektiren birçok durumda Taguchi Metodu başarı ile uygulanmaktadır. Deney öncesi yapılan çalışmalar sonucunda deney sayılarında önemli derecede azalma gözlenmiştir. Taguchi yönteminin esas amacı hedef değer etrafındaki değişkenlerin azaltılmasıdır. Temeli deney tasarımına dayanmaktadır. Taguchi deney tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları Sinyal/Gürültü (S/N) oranına çevirilerek değerlendirilmektedir. S/N oranı değeri küçük olan değer iyi, büyük olan değer iyi, nominal değer iyi olarak kalite değerlerinin hedeflediği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir [9].

$$S/N \text{ Oranı} = -10 \cdot \log[\sum Y^2/n] \quad (1)$$

S/N oranı denklem (1) deki gibi tanımlanmaktadır.

Kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle kullanılacak olan gerçek ve kodlanmış seviyeleri Çizelge-3 de gösterilmiştir. Bu kodlanmış değerler Taguchi tekniği L9 ortogonal deneysel planı içerisine aktarılmıştır (Çizelge-4).

Çizelge-3. Kodlanmış Değişkenler

Parametreler	Seviyeler		
	-1	0	1
V (m/dk)	50	67	90
f (mm/dev)	0,05	0,1	0,2
ϕ (°)	100	118	140
ϕ' (°)	60	75	90

Çizelge-4. L9 Ortogonal dizi deney planı

Deney No	V	f	ϕ	ϕ'
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	1	1	1
4	0	-1	0	1
5	0	0	1	-1
6	0	1	-1	0
7	1	-1	1	0
8	1	0	-1	1
9	1	1	0	-1

3. DENEYSEL BULGULAR

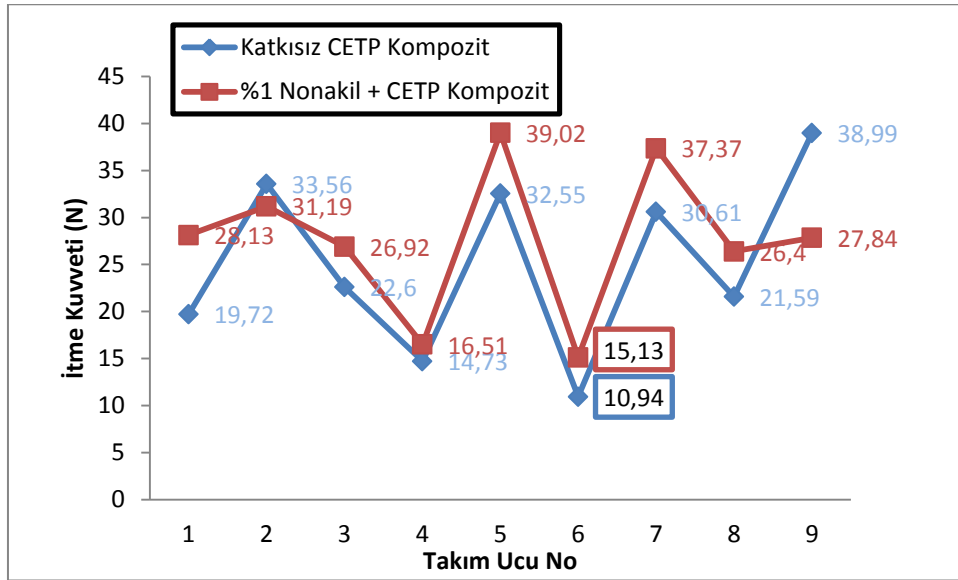
Malzemelerin deneysel planlara göre delme prosesi sonucu elde edilen veriler esas alınarak, itme kuvvetlerine takım geometrisi ve kesme parametrelerinin etkilerini ve katkı derecelerini incelemek için Taguchi metodu uygulanmıştır.

3.1. Taguchi Metodu ile İtme Kuvveti Analizi

Malzemelerin kullanım ömrünü farklı kılan en önemli sebeplerden biri montaj işlemleridir. Montaj işlemlerinin vazgeçilmez proseslerinden delme işlemi, malzeme işlenebilirliğinde sıkça ön plana çıkmaktadır. Civatalı ve perçinti bağlantılar için kullanılan delme işlemi ve bu işlemlerde kullanılan kesme parametreleri malzeme güvenirliliği ve ömrü açısından önem arz etmektedir. Bu amaçla yapılan bu çalışmada, Taguchi tekniği ile deneysel planı oluşturulmuş deney düzeneği ile katkısız cam elyaf takviyeli (CETP) ve işlenebilirliği iyileştirdiği yönünde araştırmalar yapılan %1 nanokil katkısıyla üretilen CETP kompozitlerin delme parametrelerinin itme kuvvetine etkisi incelenmiştir. Deneysel plana göre elde edilen itme kuvveti sonuçları Çizelge-5 te gösterilmiştir. Bu değerlerin daha rahat bir biçimde okunması için grafik üzerine döküldüğünde (Şekil.3) %1 nanokil katkılı kompozit itme kuvvetinin değerinde farklılıklar meydana geldiği gözlenmiştir. L9 ortogonal dizisine göre her deney için 9 farklı uç geometrisine sahip matkap ucu kullanılmaktadır.

Çizelge-5. Kodlanmış kesme parametreleri ve takım geometrileri ile elde edilen İtme Kuvveti Sonuçları

Deney No	Kesme Hızı	İlerleme	ϕ	ϕ'	İtme Kuvvetleri	
					Katkısız CETP	%1 Nanokil + CETP
1	-1	-1	-1	-1	19,72	28,13
2	-1	0	0	0	32,55	39,02
3	-1	1	1	1	38,99	27,84
4	0	-1	0	1	10,94	15,13
5	0	0	1	-1	30,61	37,37
6	0	1	-1	0	33,56	31,19
7	1	-1	1	0	21,59	26,4
8	1	0	-1	1	22,6	26,92
9	1	1	0	-1	14,73	16,51



Şekil 4. Matkap Ucuna göre itme kuvvetleri

Elde edilen itme kuvveti değeri grafikte (Şekil 4.) %1 nanokil katkılı malzemede katkısız malzemeye göre genelde artış göstermiştir. 2 ve 9 nolu takımın haricinde, takım uçları nanokil katkılı kompozit malzemenin delinmesi sırasında katkısız malzemeye göre malzeme içinde daha zor hareket etmiş yine malzemenin delinmesi için daha fazla bir itme kuvvetine ihtiyaç duymuştur. 2 ve 9 numaralı matkap ucunda ise bunun tam tersi bir durum söz konusudur. Farklı uç geometrisine sahip takımlar malzemelerde farklı bir tepkiyle karşılaştığı görülmektedir. Örneğin her iki malzeme için 6 numaralı matkap ucunda en az itme kuvveti meydana gelmişken, katkısız malzeme için bu değer en yüksek 9 nolu matkap ucunda, nanokil katkılı malzeme içinde en yüksek değer 5 numaralı matkap ucunda meydana gelmiştir.

Çizelge-6. Kodlanmış kesme parametreleri ve takım geometrileri ile İtme kuvvetleri için S/N oranı

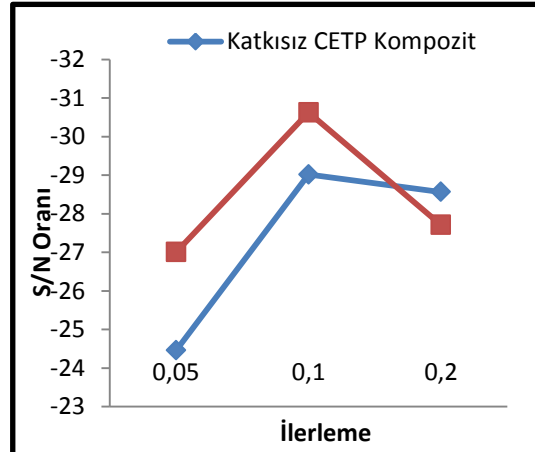
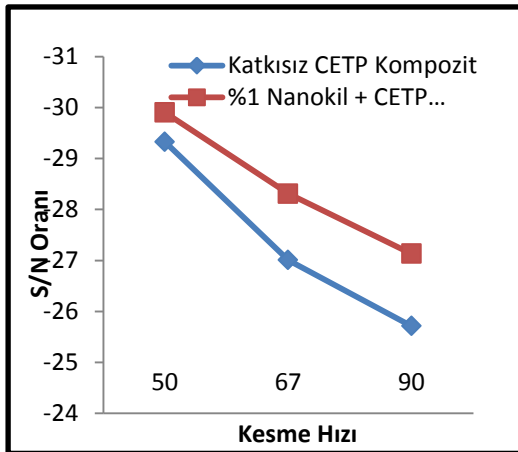
Deney No	Kesme Hızı	İlerleme	ϕ	ϕ'	S/N Oranları	
					Katkısız CETP	%1 Nanokil + CETP
1	-1	-1	-1	-1	-25,9	-28,98
2	-1	0	0	0	-30,25	-31,83
3	-1	1	1	1	-31,82	-28,89
4	0	-1	0	1	-20,78	-23,6
5	0	0	1	-1	-29,72	-31,45
6	0	1	-1	0	-30,52	-29,88
7	1	-1	1	0	-26,69	-28,43
8	1	0	-1	1	-27,08	-28,6
9	1	1	0	-1	-23,36	-24,35

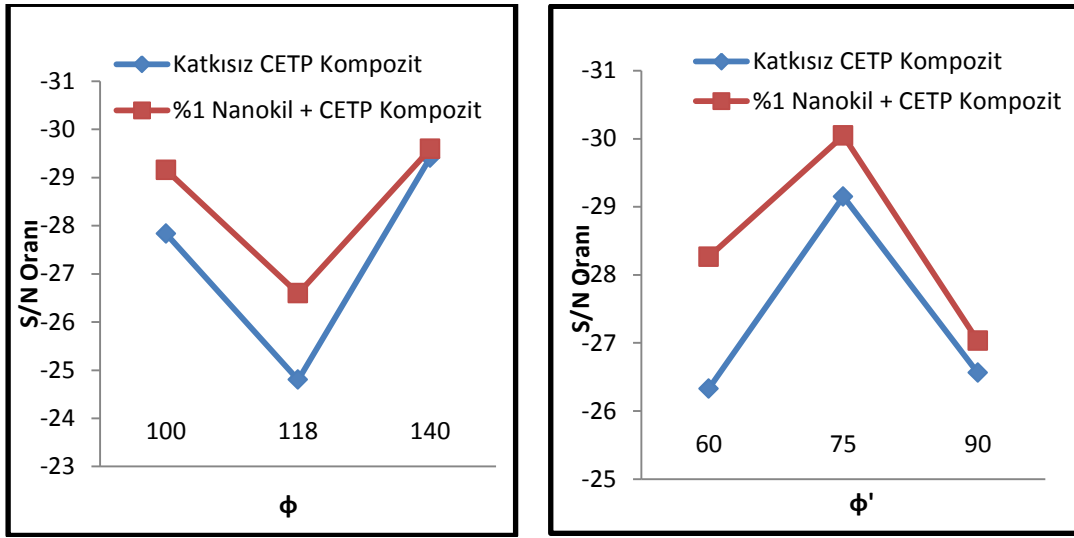
Her iki malzeme için, İtme kuvveti değerleri için, sinyal gürültü oranı (S/N) oranı hesaplanarak Çizelge-6 verilmiştir. Elde edilen S/N oranlarının cevaba etki dereceleri Çizelge-7 de belirtilmiştir.

Çizelge-7. Malzemelerin ortalama ve S/N için cevap tablosu

Katkısız CETP Kompozit					%1 Nanokil Katkılı CETP Kompozit				
Ortalama için Cevap Tablosu					Ortalama için Cevap Tablosu				
Seviye	Hız	İlerleme	ϕ	ϕ'	Seviye	Hız	İlerleme	ϕ	ϕ'
1	30,42	17,42	25,29	21,69	1	31,66	23,22	28,75	27,34
2	25,04	28,59	19,41	29,23	2	27,9	34,44	23,55	32,2
3	19,64	29,09	30,4	24,18	3	23,28	25,18	30,54	23,3
Fark	10,78	11,68	10,99	7,55	Fark	8,39	11,22	6,98	8,91
Derece	3	1	2	4	Derece	3	1	4	2
S/N Oranı için Cevap Tablosu					S/N Oranı için Cevap Tablosu				
Seviye	Hız	İlerleme	ϕ	ϕ'	Seviye	Hız	İlerleme	ϕ	ϕ'
1	-29,32	-24,46	-27,83	-26,33	1	-29,9	-27,01	-29,16	-28,26
2	-27,01	-29,02	-24,8	-29,15	2	-28,31	-30,63	-26,59	-30,4
3	-25,71	-28,57	-29,41	-26,56	3	-27,13	-27,71	-29,59	-27,03
Fark	3,61	4,56	4,61	2,82	Fark	2,77	3,62	2,99	3,02
Derece	3	2	1	4	Derece	4	1	3	2

Malzemelerin; kesme hızı, ilerleme, ϕ ve ϕ' uç açıları göz önüne alınarak itme kuvvetine etki dereceleri, hem ortalama hem de S/N oranı için Çizelge-7 deki gibi hesaplanmıştır. Burada 'Derece' satırında dörte kadar sıralanmış değerler, faktörlerin kesme kuvvetine etki dereceleridir. Tabloda malzemeler için ilerleme ve ϕ uç açısının itme kuvveti üzerine etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. En az etkinin ise ϕ' uç açısında meydana geldiği görülmektedir. Ortalama cevap tablosu dikkate alındığında Katkısız CETP malzemesi için "En düşük daha iyidir" kuralına göre, kesme hızı 3. seviyede (90 m/dk), ilerleme 1. seviyede (0,05 mm/dev), ϕ açısı 2. seviyede (118°), ϕ' açısı 1. seviyede (60°) optimum kesme parametreleri elde edilmiştir. Yine %1 nanokil katkılı CETP kompozit malzemesinin ortalama cevap tablosu dikkate alındığında, kesme hızı 90 m/dk (3. seviye), ilerleme 0,05 mm/dev (1. seviye), ϕ açısı 118° (2. seviye), ϕ' açısında 90° (3. seviye) kesme parametreleri ve takım geometrisi değerlerinde optimum olarak bulunmuştur.





Şekil 5. Faktörler için S/N oranı grafikleri

Kesme parametrelerinin etkileri Şekil 5. te S/N oranına bağlı olarak grafiğe aktarılmıştır. Grafikler kesme faktörlerinin etkisini her iki malzemede herbir seviye için açıkça göstermektedir. Bu değerler ile kesme parametrelerinin seviyelerinde cevaba katkısı tahmin edilebilmektedir. Örneğin kesme hızında malzemeler için en küçük daha iyidir kuralına göre 90 m/dk da optimum değer olarak tespit edilebilir. İlerleme için 0,05 mm/dev, φ açısı için 118°, φ' açısı için 60°, katkısız malzeme için 60°, nano katkılı malzeme için 90° de optimum kesme parametreleri olarak tayin edilmektedir.

Kesme parametrelerinin ve matkap çift uç açısı katkı oranlarını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) oluşturulmuştur. Çizelge-8 Faktörlerin katkı derecelerini göstermektedir.

Çizelge-8. Ortalama ve S/N oranı için Varyans Analizi

Katkısız CETP Kompozit					%1 Nanokil Katkılı CETP Kompozit				
Ortalama İtme Kuvveti için Varyans Analizi					Ortalama İtme Kuvveti için Varyans Analizi				
Kaynak	S. D.	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	% Katkı	Kaynak	S. D.	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	% Katkı
Kesme Hızı	2	87,156	87,156	24,694	Kesme Hızı	2	105,868	52,934	20,379
İlerleme	2	261,37	130,685	37,028	İlerleme	2	215,341	107,671	41,453
φ	2	181,477	90,738	25,709	φ	2	78,942	39,471	15,196
φ'	2	88,722	44,361	12,569	φ'	2	119,335	59,667	22,972
Hata	0				Hata	0			
Toplam	8	705,882	352,941	100	Toplam	8	519,486	259,743	100
Ortalama İtme Kuvveti için S/N Oranı					Ortalama İtme Kuvveti için S/N Oranı				
Kaynak	S. D.	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	% Katkı	Kaynak	S. D.	Kareler Toplamı	Kareler Ort.	% Katkı
Kesme Hızı	2	20,097	10,049	19,016	Kesme Hızı	2	11,605	5,803	18,342
İlerleme	2	37,926	18,963	35,885	İlerleme	2	22,12	11,06	34,961
φ	2	32,924	16,462	31,152	φ	2	15,755	7,877	24,9
φ'	2	14,741	7,371	13,948	φ'	2	13,791	6,896	21,797
Hata	0				Hata	0			
Toplam	8	105,688	52,844	100	Toplam	8	63,272	31,636	100

S.D.:Serbestlik Derecesi

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Her iki malzemeninde kesme parametrelerinin cevaba yüzde olarak katkı derecesi Çizelge-8 de “ % Katkı ” sütunu altında listelenmiştir. Malzemeler için tüm varyans analizleri incelendiğinde ilerlemenin cevaba yani itme kuvvetine katkı derecesi sırasıyla büyüktür küçüğe ilerleme, ϕ açısı, kesme hızı ve ϕ' açısı olarak sıralanmaktadır.

3.2. Doğrulama Deneyleri

Taguchi metoduna göre buraya kadar optimum kesme parametreleri katkısız CETP kompozit malzeme için $V=90$ m/dk $f=0,05$ mm/dev $\phi=118^\circ$ $\phi'=60^\circ$ ($v3f1\phi2\phi'1$), %1 nanokil katkılı CETP kompozit malzeme için $v=90$ m/dk, $f=0,05$ mm/dev, $\phi=118^\circ$; $\phi'=90^\circ$ ($v3f1\phi2\phi'3$) optimum kesme parametreleri bulunmuştur. Hem $v3f1\phi2\phi'1$ için hem de $v3f1\phi2\phi'3$ deney tasarımıımızda bu deneylere ait itme kuvveti değeri bulunmamaktadır. Bu sebeple bu kesme parametreleri değerini içeren deneyler, optimum itme kuvvetini bulmak amacıyla tekrar yapılmalıdır ve buna doğrulama deneyleri adı verilmektedir.

Çizelge-9. Doğrulama deneyi sonuçları

Katkısız CETP Kompozit				%1 Nanokil Katkılı CETP Kompozit			
	İlk itme Kuvveti	Optimum İtme Kuv.		İlk itme Kuvveti	Optimum İtme Kuv.		
		Deneysel	Tahmin		Deneysel	Tahmin	
Seviye	$v1f1\phi1\phi'1$	$v3f1\phi2\phi'1$	$v3f1\phi2\phi'1$	Seviye	$v1f1\phi1\phi'1$	$v3f1\phi2\phi'3$	$v3f1\phi2\phi'3$
İtme Kuvveti	19,72	10,726	9,175	İtme Kuvveti	28,13	13,993	13,209
S/N Oranı	-25,898	-20,61	-19,252	S/N Oranı	-28,983	-22,918	-22,417

S/N oranı değişimi:6,646 (CETP) S/N oranı değişimi: 6,566 (%1 Nanokil+CETP)

Optimum kesme parametrelerinin bulunduğu değerlerdeki deney sonuçları Çizelge-9 daki gibi bulunmuştur. Katkısız CETP kompozit malzeme için en düşük itme kuvveti 3. seviye kesme hızı, 1. seviye ilerleme, 2. seviye ϕ açısı, 1. seviye ϕ' açısı ($v3f1\phi2\phi'1$) değerlerinde 10,726 N; nano katkılı CETP kompozit malzeme için en düşük itme kuvveti 3. seviye kesme hızı, 1. seviye ilerleme, 2. seviye ϕ açısı, 3. seviye ϕ' açısı ($v3f1\phi2\phi'3$) değerlerinde 13,993 N olarak bulunmuştur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma içeriği neticesinde aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur;

- Taguchi metodunun kolay, sistematik ve verimli metodolojisiyle, uygun kesme parametreleri hem katkısız hemde nano katkılı malzemeler için tespit edilmiştir.
- L9 deney tasarımına göre en düşük itme kuvveti değeri her iki malzeme içinde $118^\circ-90^\circ$ çift uç açısına açısına sahip 6 numaralı takım ucunda oluşmuştur.
- İtme Kuvveti değerleri, S/N oranı içerisine taşındığında; faktörlerin cevaba etki dereceleri, sırasıyla ilerleme, ϕ açısı, kesme hızı ve ϕ' açısı olarak bulunmuştur. İki malzeme içinde ilerlemenin katkı derecesi en fazladır. ϕ kesme açısında neredeyse ilerleme kadar cevaba etki ettiğide söylenebilir.
- Katkısız CETP kompozit malzemede 3. seviye kesme hızı, 1. seviye ilerleme, 2. seviye ϕ açısı, 1. seviye ϕ' açısı ($v3f1\phi2\phi'1$) kesme parametre değerlerinde, nanokil katkılı CETP kompozit malzemede 3. seviye kesme hızı, 1. seviye ilerleme, 2. seviye ϕ açısı, 3. seviye ϕ' açısı ($v3f1\phi2\phi'3$) kesme değerlerinde optimum parametreler tespit edilmiştir.
- Varyans analizi sonucunda; katkı yüzdesi her iki malzemede de en az etkiyi ϕ' kesme açısı göstermiştir.
- Doğrulama deneyleri sonucunda; optimum kesme değerleri tekrarlandığında, katkısız CETP kompozit malzemede 10,726 N, nano katkılı CETP kompozit malzemede 13,993 N itme kuvveti oluşmuş ve bu değerler en düşük itme kuvveti olarak bulunmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] W.König, Ch. Wulf, Grab, H. Willercheid, Machining of fibre reinforced plastics, Ann.CIRP 34 (1985) 537-548
- [2] R.Teti, Machining of composite materials, Ann. CIRP 51 (2002) 611-624
- [3] A. Velayudham, R. Krishnamurrthy, Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites, Journal of Materials Tech. 185 (2007) 204-209
- [4] S.Jain, D.C.H.Yang, Effects of federate and chisel edge on delamination in composites drilling, Trans. ASME J. Eng. Ind. 115 (1993) 398-405
- [5] W. König,P.Grass, Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets, Ann. CIRP 38 (1989) 119-124
- [6] W.C.Chen, Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber reinforced plastic composite laminates Int. J. Mach. Tools Manuf. 37 (1997) 1097-1108
- [7] B.Isik, E.Ekici, Experimental Investigations of Damage Analysiz in Drilling of Wovwn Glass Fiber Reinforced Plastic Composites, Int.Journal of Adv. Manu. Tech., 49 (2010) 861-869
- [8] Murthy, B:R.N., L.L.Raj Rodrirues, N. Sharma, D.Anjaiah, Influence of process parameters on the quality of hole in drilling of GFRP composites-An experimental Investigation usin DOE, Int. Conference on Mech. And Elect. Tech., 2010, pp 87-90
- [9] Taylan D., 2009, Taguchi Deneý Tasarımı Uygulaması, Yüksek Lisans, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta

TALAŞLI İMALATTA ÖZEL UYGULAMALAR

MINİMUM MİKTARDA YAĞLAMA TEKNİĞİNİN DELME VE TAŞLAMA OPERASYONLARINDAKİ UYGULAMALARI ÜZERİNE BİR DERLEME

Cağrı Vakkas Yıldırım^a, Turgay Kıvak^b, Fehmi Erzincanlı^c

^aAbant İzzet Baysal Üniversitesi Bolu MYO. Makina Prog.14300 Bolu/TÜRKİYE, cagriyildirim@ibu.edu.tr

^bDüzce Üniversitesi, Tek. Fak., İmalat Müh. Böl., 81620, Düzce/TÜRKİYE, turgaykivak@duzce.edu.tr

^cDüzce Üniversitesi, Müh. Fak., Makine Müh. Böl., 81620, Düzce/TÜRKİYE, fehmiertzincanli@duzce.edu.tr

Özet

Delik delme işlemleri, imalat sektöründe yoğun olarak uygulanan delik içi işleme operasyonlarına verilen genel bir isimdir. Delme işlemleri içerisinde; delik delme, kılavuz çekme, raybalama, broşlama, havşa açma vb. gibi işlemleri barındırmaktadır. Delme esnasında kesme işleminin, yarı kapalı bir alanda meydana gelmesi ve kesme bölgesine kesme sıvısı iletiminin zor olmasından dolayı soğutma-yağlama yönteminin seçimi son derece önemlidir. Bunun yanında sanayileşmiş ülkelerde talaşlı imalat maliyetinin yaklaşık %20-25'ini oluşturan taşlama işlemi, diğer talaş kaldırma işlemlerinin aksine yüzey hassasiyeti ve oluşan ısı nedeniyle soğutma-yağlama sıvısının kullanımını zorunlu kılan bir diğer talaş kaldırma yöntemidir. Belirtilen bu sebeplerden dolayı bugün hala delme işlemleri ve taşlama işleminde yoğun olarak konvansiyonel soğutma-yağlama sistemleri tercih edilmektedir. Ancak, gerek üretim maliyetleri gerekse çevresel baskılardan dolayı işletmeler konvansiyonel yağlama-soğutma sistemine alternatif seçenekler arama yoluna gitmektedirler. Bu noktada, kuru işleme ve Minimum Miktarla Yağlama (MMY) sistemi öne çıkan alternatif yöntemler arasındadır. Ancak gerek delme işlemlerindeki soğutma-yağlama sisteminin kullanılması zorunluluğu gerekse de taşlama işleminde kuru işlemin istenilen kaliteyi olanaksız kılması MMY sistemini bir adım öne çıkarmaktadır. Bu çalışmada; dünyada ve Türkiye’de MMY sisteminin delik delme işlemleri ve taşlama işlemlerindeki uygulamaları üzerine yapılan araştırmalar incelenmiş olup inceleme sonunda MMY sisteminin kullanımı ile elde edilen araştırma sonuçlarına ait bulgulara yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler: MMY Sistemi, Kesme Sıvıları, Delme Operasyonları, Taşlama İşlemi

A REVIEW ON APPLICATION OF DRILLING AND GRINDING PROCESSES OF MINIMUM QUANTITY LUBRICATION SYSTEM

Abstract

Drilling operations is a general name given to hole machining operations which are widely used in the manufacturing industry. Drilling operation includes processes such as tapping, reaming, broaching and counter boring. In drilling, selection of cooling-lubricating method is very important because the cutting operation occurs in an half covered area and transmission of cutting liquid to the cutting area is difficult. Besides, the grinding operation having approximately 20-25% of the machining cost in the industrialized countries ,unlike the other machining processes,is another machining method (due to surface sensitivity and heat formation) making the usage of cooling-lubricating liquid compulsory. Because of the fore-mentioned reasons, conventional cooling-lubricating systems are still preferred in drilling and grinding operations. However, companies had to seek alternative ways to conventional lubricating-cooling system because of both production cost and environmental conditions. At this point, dry processing and minimum quantity lubrication (MQL) system are among the prominent alternative methods. But, either the obligatory usage of cooling-lubrication system in drilling operations or making of the desired quality impossible through dry processing is putting the MQL system one step forward. In this study; the investigations of MQL system (in the world and in Turkey) on the applications of drilling operations and grinding processes were examined and at the end of the examinations the informative results obtained by using MQL system were given.

Keywords: MQL system, Cutting liquids, Drilling Operations, Grinding Process

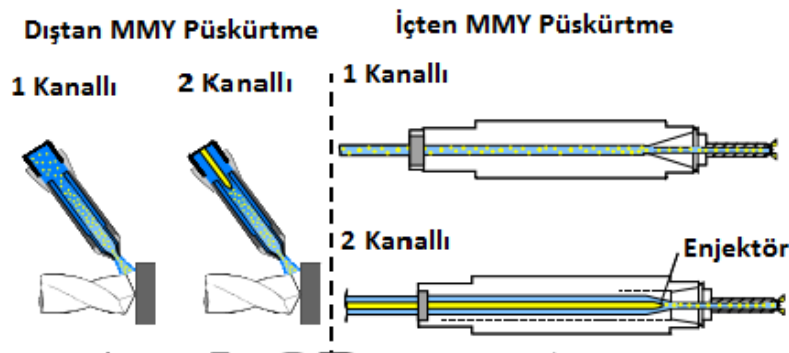
1. GİRİŞ

Endüstriyel gelişmenin getirdiği kolaylıklar insanlık tarafından büyük bir memnuniyetle kabul görünken bu gelişme ile beraber bir takım sorunlar da ortaya çıkmıştır. Bu sorunlardan biri olan çevre kirliliği, insan sağlığını doğrudan etkilemesi nedeniyle modern yaşamın en önemli araştırma konularından biri olmuştur. Günümüzde çevre kirliliğini azaltıcı önlemler almak adına sanayi kuruluşları, araştırma merkezleri ve üniversiteler her zamankinden daha fazla çaba sarf etmektedirler [1]. Çevre kirliliği ve artan üretim maliyetleri sanayi kuruluşlarını bir takım önlemler almaya itmiştir. Özellikle imalat sektöründe her ne kadar üretim maliyetlerinin önemli bir kısmının kesici takım maliyeti olduğu düşünülse de bazı durumlarda soğutma-yağlama sıvısının maliyeti kesici takım maliyetini geçmektedir [2-5]. Avrupa otomotiv endüstrisinde yapılan araştırmalara göre imalat sürecinde kullanılan kesici takım maliyeti toplam üretim maliyetinin yaklaşık yüzde 8'ine denk gelirken kesme sıvısı maliyeti toplam üretim maliyetinin yüzde 8 ila 16'sını oluşturmaktadır [6,7].

Konvansiyonel soğutma-yağlama sisteminin kullanıldığı uygulamalarda maliyetin yanında kesme sıvısının takım-talaş yüzeyine tam etki etmemesinden dolayı verimli bir talaş kaldırma yapılamamaktadır [8]. Ayrıca çevreye zararlı etkilerinden dolayı birçok işletme, kesme sıvısını minimize etme ya da tamamen ortadan kaldırma yoluna gitmektedir [9]. Bu noktada kuru işleme, çevreyi kötü yönde etkileyecek herhangi bir eleman kullanmadığından en öne çıkan çevre dostu işleme yöntemidir [10,11]. Ancak, yüksek işleme verimliliği, daha iyi yüzey kalitesinin yanı sıra ağır kesme koşullarında kuru işleme verimli bir işleme yöntemi değildir. Bu nedenlerden dolayı minimum miktarda kesme sıvısı kullanımını benimseyen ve yarı-kuru işleme diye de tabir edilen soğutma-yağlama sisteminin önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Minimum miktarda yağlama adı verilen bu sistem hali hazırda bir takım uygulamalarda bir süredir kullanılmaktadır [12-14].

MMY, metalik ve kompozit parçaların konvansiyonel ve yüksek hızlarda işlenmesinde ekonomik, teknolojik ve çevresel faydaları kanıtlanmış bir soğutma-yağlama teknolojisidir [15-17]. Genelde bitkisel yağ kullanılan yöntem minimum miktarda yağlama adıyla anılırken; su bazlı kesme sıvısı kullanılan yöntem ise minimum miktarda soğutma olarak adlandırılmaktadır [15]. MMY uygulamalarının temel prensibi, çok küçük miktarlardaki yağlama-soğutma sıvılarının kesme bölgesine püskürtülmesi sonucu kesmeye etki etmesi üzerine kurulmuştur [18]. Ancak bu püskürtme miktarı 10 µm'den daha büyük olmak zorundadır, aksi halde sıvı haldeki partiküller sağlık sorunlarına neden olabilmektedirler [19].

Minimum Miktarda Yağlama tekniği sabit nozullarla dışarıdan püskürtme ve kesici takım içerisine açılmış kanallarla püskürtme olmak üzere iki şekilde uygulanabilir (Şekil 1) [15,20].



Şekil 1- MMY'nin dıştan ve içten püskürtülmesinin şematik gösterimi [20].

Bu sistemlerin her ikisi de belirli konularda üstünlüğü olan sistemlerdir. Ayrıca bu sistemler kendi içinde tek kanallı ve çift kanallı olmak üzere ikiye ayrılır. Tek kanallı sistemlerde, yağ-hava karışımı dışarıda hazırlanarak püskürtülürken, çift kanallı sistemlerde yağ ve hava ayrı kanallarla nozul içine veya takım içine getirildikten sonra karıştırılarak püskürtülmektedir [21].

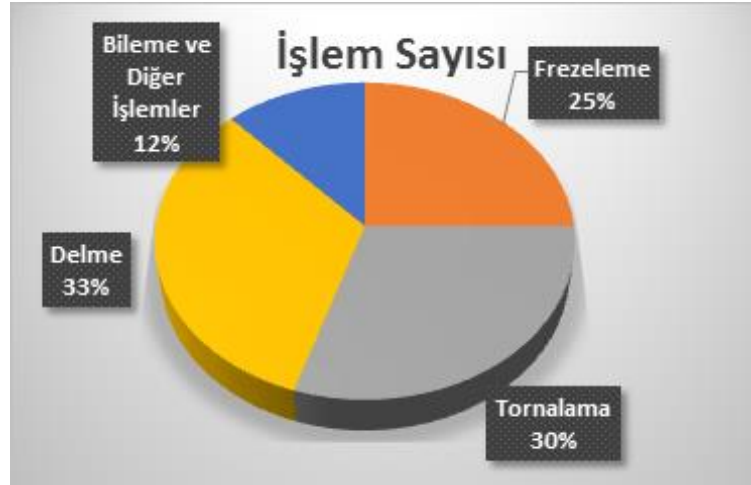
MMY sistemi delme [22, 23] frezeleme [24, 25] ve tornalamada [26-28] yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak taşlama işlemlerinde yeni bir uygulamadır [29-31]. Daha önce Yıldırım ve arkadaşları MMY sisteminin tornalama ve frezelemedeki uygulamalarını bir makalede toplamıştır[32]. Yukarıda sayılan teknikler içerisinde olan ve bu araştırmanın dışında kalan delme ve taşlama işlemleri talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık %45'ine denk gelmektedir. Kesici takımlarla yapılan talaş kaldırma işlemlerinde harcanan toplam zamanın yaklaşık %40'ının delme ve taşlama işlemleri esnasında meydana geldiği bilinmektedir [33]. Bu sebeple, yapılan bu çalışmada MMY sisteminin talaş kaldırma teknikleri içerisinde önemli bir yeri olan delme uygulamaları (delik delme, raybalama, kılavuz çekme) ve taşlama tekniklerindeki uygulamaları üzerinde durulmuştur. Böylece MMY sisteminin etkilerinin daha kapsamlı değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. DELME OPERASYONLARINDA MMY

2.1. Kullanılan Sistem

Delme işlemi, silindirik bir takımla iş parçasından talaş kaldırmak suretiyle delik açarak şekil verme işlemlerinin tamamına verilen isimdir. Bu terim delik delme işlemleri kadar delik yüzeylerine uygulanan broşlama, raybalama, havşa açma ve ovalama gibi çeşitli operasyonlar için de kullanılır. Bütün bu işlemlerin ortak noktası, ana dönme hareketinin doğrusal bir ilerleme hareketiyle beraber yapılmasıdır [34].

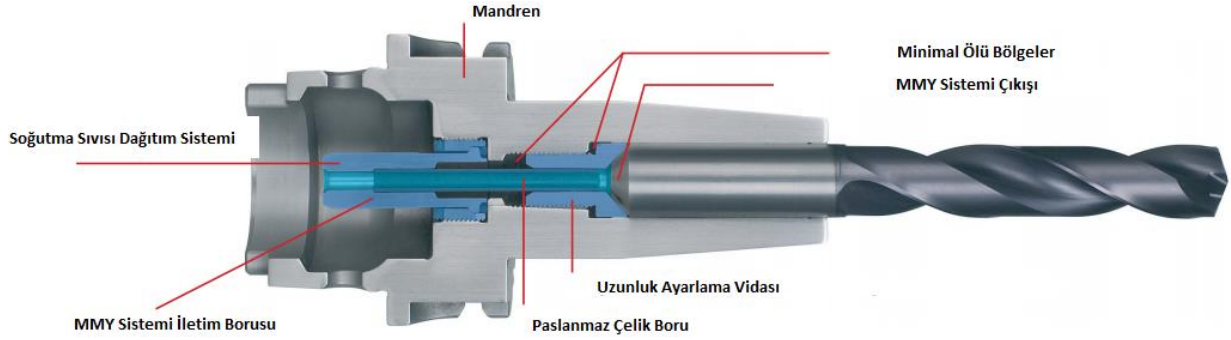
Delme işlemi, en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biridir ve talaş kaldırma işlemlerinin %33'ünü içermektedir (Şekil 2). Çoğunlukla talaş kaldırma işlemlerinin sonucusu olan delme işlemi, tornalama ve frezeleme gibi işlemlerle karşılaştırıldığında işlemlerin dinamik ve kinematik yapısı benzer olmasına rağmen yarı kapalı alanda gerçekleştiği için talaş akışı ve kesme sıcaklığının dağılımı açısından daha kapsamlı bir talaş kaldırma yöntemidir [34].



Şekil 2- İşlem sayısına göre delme işleminin diğer talaş kaldırma işlemleriyle karşılaştırılması [34].

Delik operasyonları arasında yer alan ve yoğun olarak kullanılan kılavuz çekme işlemi, çevresinde istenilen formda dişleri bulunan bir veya birden fazla kesici eleman tarafından delik içine dış açma işlemi olarak tanımlanabilir. Kılavuzlar temelde el ve makine kılavuzları olmak üzere iki tipte bulunmaktadır. Makine kılavuzları seri imalatta tercih edilirken farklı form ve tipte üretilmektedirler [35]. Kılavuzla vida açma işlemleri kılavuzun kesici kısımlarında oluşan ısı artışı, kılavuzun kırılmaya karşı hassasiyeti, arzulanan vida hassasiyeti ve açılan vidanın kalitesi gibi etkenler nedeniyle zor ve zahmetli bir talaş kaldırma yöntemidir. Yine delik içi operasyonlar arasında gösterilen raybalama, tıpkı honlama ve parlatma gibi delik yüzeylerinin kalitesini geliştirmek ve ölçü tamlığını yakalamak için kullanılan delik içi operasyon yöntemlerindedir. Raybalama, tıpkı diğer talaş kaldırma operasyonları gibi yüksek kesme kuvveti gerektiren ve bu nedenle de yoğun bir işlem olarak görülen talaş kaldırma operasyonudur [36].

Çoğu zaman kesme sıvısı takım ömrünü arttırması ve işlenmiş yüzeyin kalitesine verdiği katkıdan dolayı hem işlem verimliliği hem de takım ömrü açısından büyük önem taşır. Ayrıca, delik delme gibi operasyonlarda oluşan talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırmasından dolayı yoğun olarak tercih edilir [11, 37]. Kullanılan matkabın bu fonksiyonları etkin olarak yerine getirebilmesi için genellikle içten soğutmalı kesici takımlar tercih edilir (Şekil3).



Şekil 3- İçten soğutma fonksiyonuna sahip matkap [38].

Delme operasyonlarında işlemin durumu ve iş parçası-kesici takım malzemesine göre değişik soğutma-yağlama yöntemleri tercih edilebilir (Tablo-1). Örneğin; Alüminyum-Slikon gibi yüksek sünekliğe sahip malzemelerde konvansiyonel soğutma-yağlama yöntemi tercih edilirken [22], dökme demir gibi malzemelerde kuru işleme tercih edilmektedir [39]. Ayrıca, gerek çevresel, gerek maliyet gerekse de işlenmiş yüzeyin kalitesi açısından MMY sistemi tercih edilebilmektedir. MMY sistemi günümüzde süper alaşımların delinmesinde yoğun olarak kullanılan bir sistemdir [40].

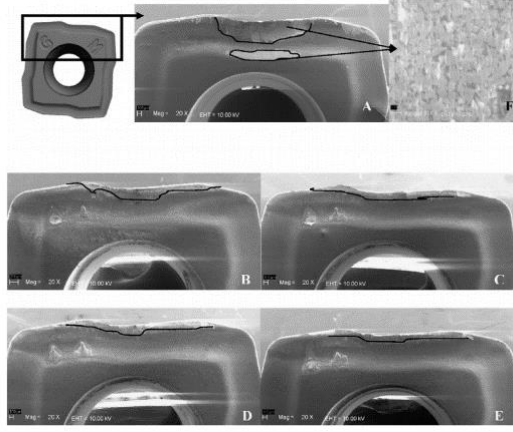
Tablo 1- Kuru işleme ve MMY sisteminin uygulama alanları [22-39]

Malzeme	Alüminyum		Çelik		Dökme Demir
	Döküm Alaşımları	Dövülebilir Alaşımlar	Yüksek Alaşımlı Yatak Çeliği	Tavlanmış, Temperlenmiş Çelik	
İşlem					GG20-GGG70 Arası
Delme	MMY	MMY	MMY	MMY, Kuru	MMY, Kuru
Raybalama	MMY	MMY	MMY	MMY	MMY
Diş Açma	MMY	MMY	MMY	MMY	MMY
Kılavuz Çekme	MMY	MMY	MMY	MMY	MMY
Derin Delik Delme	MMY	MMY	MMY	MMY	MMY
Frezeleme	MMY,Kuru	MMY	Kuru	Kuru	Kuru
Tornalama	MMY,Kuru	MMY,Kuru	Kuru	Kuru	Kuru
Broşlama	-	-	MMY	Kuru	Kuru

Minimum Miktarda Yağlama sistemi, daha ekonomik ve çevre dostu bir üretim için, konvansiyonel soğutma-yağlama sistemleriyle karşılaştırıldığında özellikle derin delme operasyonlarında yoğun olarak tercih edilir [15, 41-43]. Çalışmanın bu bölümünde, delik delmenin yanında yine delik operasyonları içerisinde yer alan raybalama, broşlama ve havşa açma gibi işlemlerde MMY tekniğinin kullanılması sonucu ortaya çıkan yayınlar incelenmiştir.

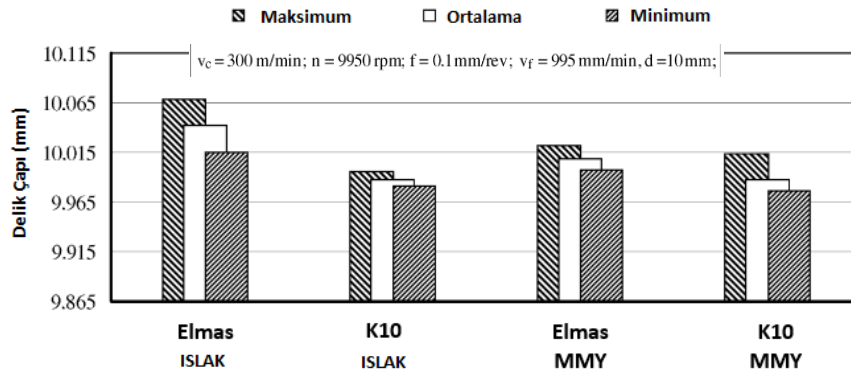
2.2. Delik Operasyonlarında MMY Sistemi Uygulamaları

Tasdelen ve arkadaşları ani sertleştirilmiş çeliğin delinmesinde ıslak, basınçlı hava ve farklı yağ miktarlarına sahip MMY sistemi kullanmanın takım aşınması, talaş-takım teması, kesme kuvveti ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Analizler 272 delik sonrası ve 315 delik sonrası diye ikiye ayrılmıştır. Kısa deliklerin delinmesi deney sonuçları, takım aşınması açısından en faydalı sistemin MMY olduğunu en az fayda gösteren sistemin ise ıslak işleme olduğunu göstermiştir. Yüzey kalitesi açısından MMY ve ıslak işleme birbirine yakın sonuçlar verirken basınçlı hava daha kötü sonuçlar vermiştir. Kesme kuvveti açısından en yüksek kuvvet basınçlı hava ile delmede ortaya çıkarken en düşük kuvvet ise ıslak işlemede ortaya çıkmıştır [44]. Şekil 4'te 272 delik sonrası ıslak (A), hava (B), MMY 5ml/s (C), MMY 15ml/s (D), MMY 23ml/s (E) soğutma-yağlama şartları altında kesici takımında meydana gelen aşınmaya ait SEM fotoğrafları görülmektedir.



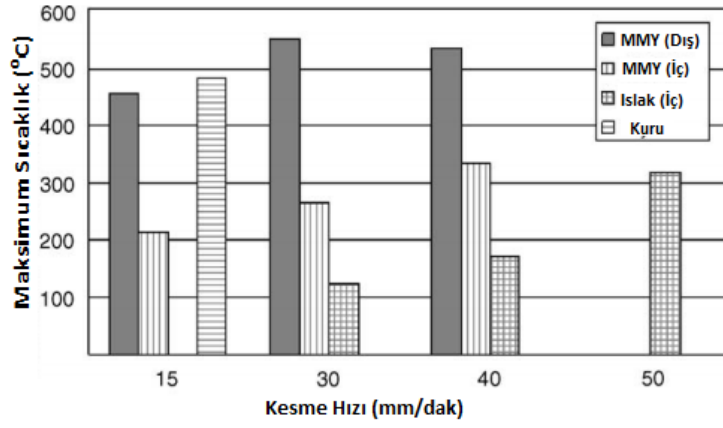
Şekil 4- 272 delik sonrası ıslak (A), hava (B), MMY 5ml/s (C), MMY 15ml/s (D), MMY 23ml/s (E) soğutma-yağlama şartları altında kesici takımında meydana gelen aşınmaya ait SEM fotoğrafları [44].

Braga ve arkadaşları Alüminyum-Slikon alaşımının (A356) kaplamasız ve elmas kaplamalı karbür takımlar kullanarak ıslak ve MMY (10 ml/s 72 m³/s ve 4.5 bar basınç) soğutma-yağlama sistemleri altında delinmesinin işlenebilirlik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, kesici takımlardaki kaplama ve soğutma-yağlama yönteminin ortalama delik çapı üzerindeki etkisi incelendiğinde kaplamalı takımlar için MMY sisteminin daha iyi sonuçlar verdiği görülürken kaplamasız takımlarla delmede ıslak işleme ve MMY sistemi birbirine yakın sonuçlar vermiştir (Şekil-5). Ayrıca kesme kuvveti, takım aşınması ve delik kalitesi açısından hem elmas kaplamalı hem de kaplamasız karbür takımların çalışmasında MMY ve ıslak işlemenin birbirine yakın sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Ayrıca MMY sisteminin kullanımında harcanan enerji 0.70 kW olurken ıslak işlemede harcanan enerji 0.80kW olmuştur. Tüm bunların sonucu olarak da gerek işleme kalitesi gerekse de üretim maliyeti açısından MMY tekniğinin kullanımının daha faydalı olacağına karar vermişlerdir [22].



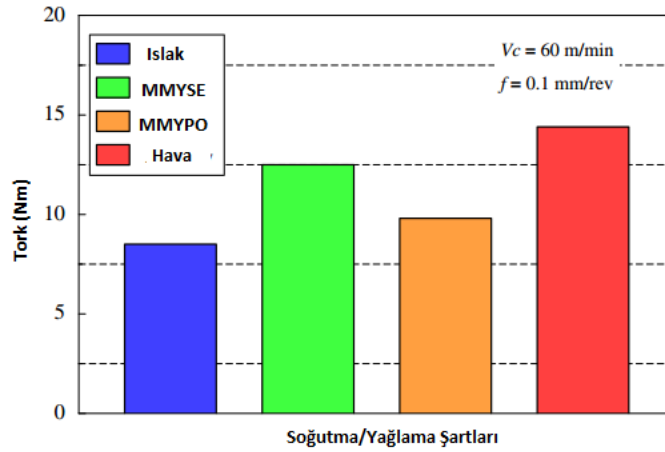
Şekil 5- Takım malzemesi ve soğutma-yağlama durumuna göre delik çaplarındaki değişim [22].

Zeilmann ve Weingaertner kaplamalı ve kaplamasız karbür takımları kullanarak farklı MMY şartları altında Ti6Al4V'nin delinmesi sırasındaki sıcaklık oluşumunu araştırmışlardır. Deneyler esnasında MMY sistemi için hem dış (12 l/dak) hem de iç (50 ml/s) nozul kullanmışlardır. Kaplamasız takımlar için içten soğutma sonucu oluşan ısının dıştan soğutma sonucu oluşan ısıya göre %50 daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Araştırmacılar, farklı kaplamalar için sıcaklık oluşumunu analiz etmişlerdir [45]. Şekil 6'da farklı yağlama-soğutma şartları altında kesme hızı ile maksimum sıcaklık arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 6- Farklı yağlama-soğutma şartları altında kesme hızı ile maksimum sıcaklık arasındaki ilişki [45].

Rahim ve Sasahara Ti-6Al-4V Titanyum alaşımının yüksek hızda delinmesinde hurma yağının soğutma-yağlama sıvısı (MQLPO) olarak kullanıldığı MMY sisteminin etkisini araştırmışlardır. Araştırma esnasında MQLPO'yu karşılaştırmak için hava ile kesme, ıslak kesme ve sentetik esterin kesme sıvısı olarak kullanıldığı MMY sistemini (MQLSE) kullanmışlardır. İnceleme sonunda, MQLPO'nun kesme kuvveti, sıcaklık, güç ve özgül kesme enerjisi açısından MQLSE'den daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşler ve hurma yağının sentetik estere alternatif bir kesme sıvısı olduğunu açıklamışlardır. Şekil 7'de farklı yağlama-soğutma şartları altında kesme hızı ile maksimum sıcaklık arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekil 7'de Ti-6Al-4V Titanyum alaşımının çelişli soğutma-yağlama şartları altında delinmesi esnasında meydana gelen torka ait grafik verilmiştir [46].

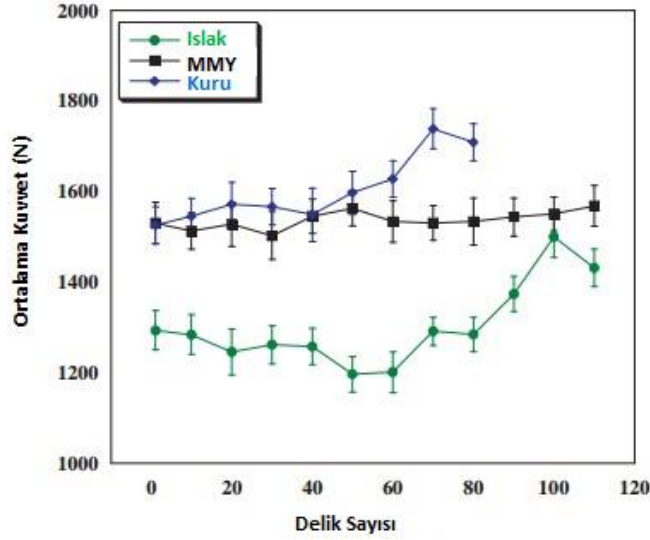


Şekil7- Ti-6Al-4V Titanyum alaşımının çelişli soğutma-yağlama şartları altında delinmesi esnasında meydana gelen torka ait grafik [46].

Heinemann ve arkadaşları helisel matkaplarla 15 mm derinliğindeki deliklerin delinmesi esnasında MMY sisteminin (18 ml/s) takım ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneylerde iş parçası malzemesi olarak sade karbonlu çelik (%0.45 C) kullanılmıştır. Deneyler esnasında %20 alkol içeren asit bazlı yağ kullanılmıştır. Araştırmacılar, deney sürecinde sürekli MMY sisteminin kullanıldığı durumlarda takım ömründe iyileşmeler gözlemlerken MMY sisteminin kesikli bir şekilde kullanıldığı durumlarda takım ömründe önemli bir düşüş gözlemlenmiştir. TiN kaplamalı takımlardaki kaplamanın sıcak sertlik yetersizliği nedeniyle kuru işleme için uygun olmadığını gözlemlenmişler ancak yüksek su içeriği (%40) ve düşük viskoziteli bir MMY sistemi ile daha etkili bir takım ömrünün açığa çıktığını rapor etmişlerdir. Ayrıca kuru işleme ile karşılaştırıldığında MMY sistemi kullanılarak yapılan işlemede daha az kuvvet gerektiği tespit edilmiştir [47]. Klocke ve arkadaşları alüminyum döküm alaşımının (AlSi9Cu3) delinmesinde MMY sistemi ve ıslak işlemenin etkisini araştırmışlardır. MMY sistemi için 10 ml/s debi ile sentetik kesme sıvısı kullanmışlardır. Kesici takım olarak TiCN, TiAlCN, MoS₂, ve Me-C:H kaplamalı matkaplar kullanılmıştır. Tork, kesme kuvveti ve delik çapı açısından MMY ve ıslak işleme arasında önemli farklar

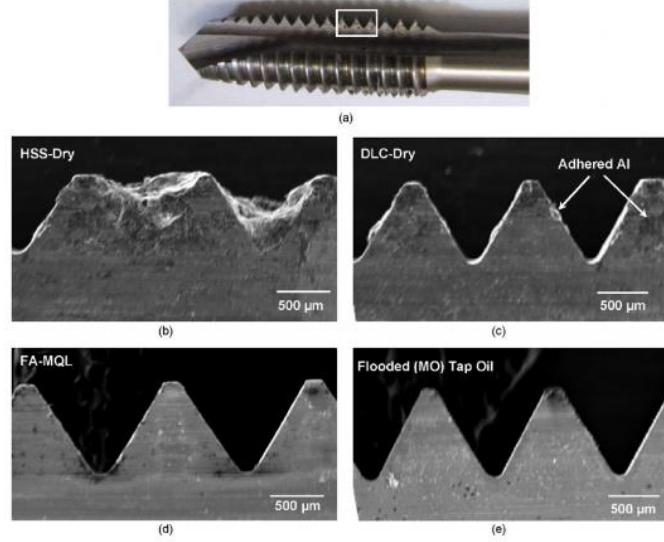
6. ULUSAL TALAŞLI İMALAT SEMPOZYUMU 5-7 KASIM 2015 SABANCI ÜNİVERSİTESİ, İSTANBUL

oluşmadığını görülmüştür. Delik yüzeyi açısından ise en iyi sonucun 15-35 µm ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ile MMY olduğu gözlenirken, kuru kesme de bu oranın 25-65 µm düzeyinde oluştuğunu tespit edilmiştir [48]. Meena ve El Mansori araçlardaki piston kolu ve krank mili gibi parçaların yapımında kullanılan sertleştirilmiş küresel grafitli dökme demirin (ADI) ıslak işleme, kuru işleme ve MMY sistemi altında delinmesini araştırmışlardır. Deneyle esnasında TiAlN kaplamalı tungsten karbür takımlar kullanılmış ve sonuçlar kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından incelenmiştir. İnceleme sonunda, MMY sisteminin ağırlıklı olarak kesme bölgesindeki sıcaklığı azaltması nedeniyle kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [49]. Şekil 8’de soğutma-yağlama şartlarına bağlı olarak ortalama kuvvete ait grafik gösterilmektedir.



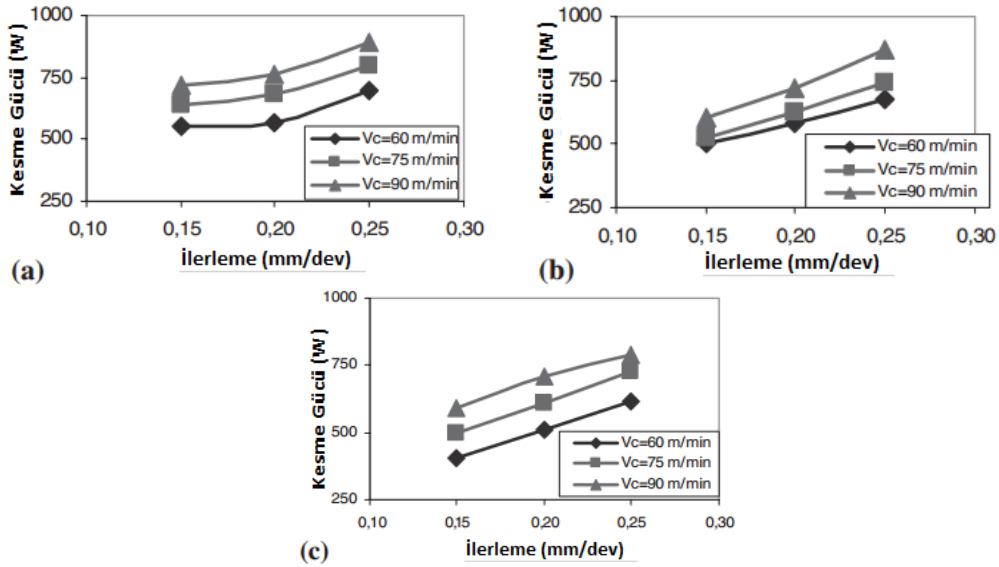
Şekil 8- Soğutma-yağlama şartlarına bağlı olarak ortalama kuvvete ait grafik [49].

Kelly ve Cottarel 5080 alüminyum alaşımının delinmesi esnasındaki ıslak (5.2 l/dak debi ile çözülebilen mineral yağ), MMY (20 ml/s debi ile bitkisel yağ) ve kuru işlemenin kesme kuvveti, tork ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, 25-105 m/dak kesme hızı ve 0,15-0,30 mm/dev ilerlemede MMY ve ıslak işlemenin kesme kuvveti ve tork açısından daha faydalı olduğunu göstermiştir. MMY sistemi ve ıslak işleme yüzey pürüzlülüğü açısından birbirine benzer sonuçlar verirken kuru işleme daha kötü sonuçlar vermiştir [50]. Bhowmick ve arkadaşları Al-%6.5Si (319 Al) alaşımına kılavuz çekilmesini konvansiyonel ıslak işleme, kuru ve MMY şartları altında yaparak sonuçları karşılaştırmışlardır. MMY ve kuru işlemeyi konvansiyonel ıslak işleme ile karşılaştırmak için iki tip deney yapılmıştır. Birinci tip deneyde kaplamasız HSS ve DLC kaplamalı karbür kılavuz takımları ile kuru ortamda kılavuz çekilmiştir. HSS takımlar 20 delikten daha az bir sürede adhezyon nedeniyle ömürlerini tamamlamışlardır. DLC kaplamalı takımlar ise küçük torklar üretmiş ve takım ömrü biraz daha uzun sürmüştür. İkinci tip deneyde ise MMY sistemi altında sadece kaplamasız HSS takımlar kullanılmıştır. MMY sisteminin 80 ml/s debi ile kullanımı esnasında ıslak işlemeye benzer tork üretilmiş ve daha yüksek diş kalitesi gözlemlenmiştir. Kuru işleme sırasında sıcaklık 75°C ölçülürken MMY sistemi altında sıcaklık 55°C olarak ölçülmüştür. Deneylede kullanılan deliklerdeki mekanik özellikler ölçüldüğünde kuru işlemede bir değişim gözlenirken MMY sisteminde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Sonuç olarak sülfür ve fosfor takviyeli kesme yağları ile MMY sisteminin adhezyonu azaltmada faydalı olduğu gözlemlenmiştir [51]. Şekil 9’da HSS kılavuzların kuru ortamda, DLC kaplamalı kılavuzların kuru ortamda, MMY ve ıslak ortamda çalışması sonucundaki takım aşınmalarının SEM fotoğrafları görülmektedir [51].



Şekil 9- HSS kılavuzların kuru ortamda, DLC kaplamalı kılavuzların kuru ortamda, MMY ve ıslak ortamda çalışması sonucundaki takım aşınmalarının SEM fotoğrafları [51].

De Chiffre ve arkadaşları farklı kesme şartları altında MMY sisteminin delik raybalama üzerindeki etkilerini incelemişleridir. Bu araştırma için deney malzemesi olarak östenitik paslanmaz çelik seçilmiştir. Delik karakteristiği açısından işleme performansının yanı sıra tork ve kesme kuvveti metrolojik bir yaklaşım kullanılarak analiz edilmiştir. Düşük bir ilerleme oranının daha düşük ve tekrarlanabilir bir pürüzlülüğe yol açtığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, raybalama işleminde MMY sistemi delik ölçüleri ve yüzey kalitesi açısından iyi sonuçlar vermiştir [52]. Lugscheider ve arkadaşları kaplamalı karbür takımlar ile alüminyum alaşımları ve gri dökme demirin raybalanması işleminde MMY sistemini kullanmışlardır. MMY sistemi kuru işleme ile karşılaştırıldığında özellikle delik yüzey kalitesinde iyileşme ve takım aşınmasının azalmasında önemli bir rol oynamıştır [53]. Davim ve arkadaşları AA1050 Alüminyumun kuru, ıslak ve MMY sistemleri altında delinmesini incelemişleridir. Kesme kuvveti açısından MMY ve ıslak işleme birbirine yakın sonuçlar verirken kuru işlemede daha yüksek kesme kuvveti açığa çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ilerleme ve kesme hızının farklı varyasyonlarında çok fazla değişiklik göstermezken en iyi yüzey kalitesi MMY sistemi ile elde edilmiştir. Yine araştırma sonuçları, kesme parametrelerinin doğru seçimiyle birlikte MMY sistemi ve ıslak işleminin birbirine benzer sonuçlar verdiğini göstermiştir [54]. Şekil 10'da farklı soğutma-yağlama şartları altında AA1050 malzemesinin delinmesi esnasında kesme hızına bağlı olarak kesme kuvveti ve özgül kesme kuvvetindeki değişimlere ait grafikler verilmektedir.



Şekil 10- Farklı soğutma-yağlama şartları altında kesme gücü değişimi a) Kuru işleme b) MMY (250 ml/h), c) Islak (120000 ml/h) [54].

Özçelik ve arkadaşları ayçiçek yağı ve kanola yağından geliştirilen bitkisel esaslı yağlar ile mineral esaslı endüstriyel kesme yağlarının AISI 304'un delinmesi esnasındaki performanslarının karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışma esnasında yağ çeşidi, ilerleme ve kesme kuvvetleri girdi olarak kullanılmış, çıktı olarak ise yüzey pürüzlülük değerleri incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre kanola esaslı kesme sıvılarının ayçiçeği esaslı kesme sıvılarından daha düşük pürüzlülük değeri vermiştir[55].

Kılıçkap ve arkadaşları AA 7075'i kuru, basınçlı hava ve MMY şartları altında delinmesini incelemiştir. Soğutma-yağlama şartlarının yanında girdi olarak ilerleme ve kesme hızı kullanılmıştır. Deney sonuçları ise yüzey pürüzlülüğü, çapak yüksekliği ve kesme esnasında ortaya çıkan ısı cinsinden değerlendirilmiştir. Deney sonuçları yüzey pürüzlülüğü açısından incelendiğinde en iyi sonuçları MMY sistemi verirken en fazla yüzey pürüzlülüğü kuru işlemede ortaya çıkmıştır. Kesme esnasında ortaya çıkan ısı sonuçlarına göre en yüksek ısı kuru kesmede ortaya çıkarken basınçlı hava ile kesmede yaklaşık %30, MMY ile kesmede ise yaklaşık %40 oranında bir azalma görülmüştür[56].

Ortaya konulan çalışmalar ışığında, takım aşınması, delik yüzey kalitesi, kesme kuvveti, ölçü tamlığı vb. gibi delik işleme için zorunluluk arzeden kalite parametrelerinin istenilen bir şekilde elde edilmesi için soğutma-yağlama sistemi kullanımı gözardı edilemez bir gereksinim olarak karşımızda durmaktadır. Öyle ki, yapılan çalışmaların hemen hepsinde MMY ve ıslak işleminin birbirine yakın sonuçlar verdiği ve bu sonuçların da kuru işlemeden daha iyi olduğu görülmektedir. İşleme kalitesi açısından MMY sistemi ve ıslak işleme tercih edilebilir sistemler olurken üretim maliyetinin devreye girmesi ile birlikte MMY sistemi delme operasyonlarında ön plana çıkan soğutma-yağlama sistemi olmaktadır.

3.

4. TAŞLAMA OPERASYONLARINDA MMY

3.1. Kullanılan Sistem

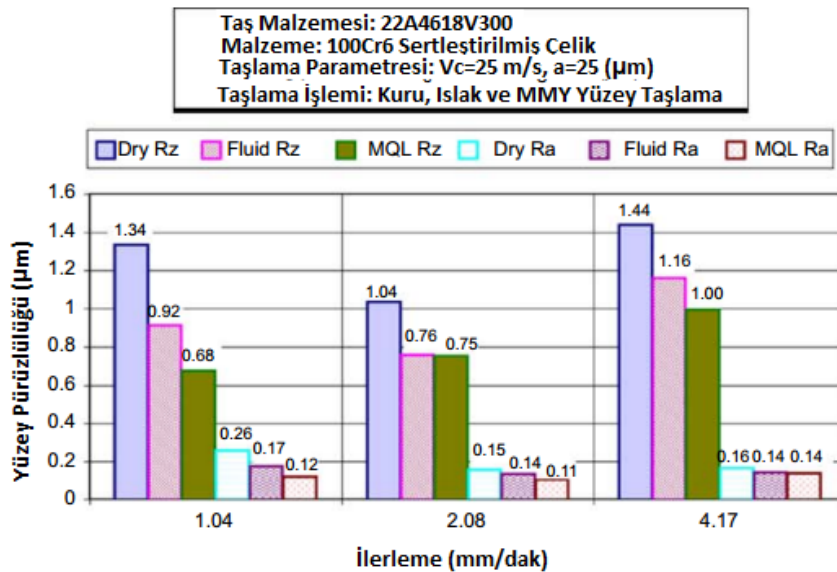
Taşlama; aşındırıcı taş taneleri aracılığıyla iş parçasından talaş kaldırarak istenilen şekil ve ölçü elde etme işlemi olarak tanımlanmaktadır [57]. Bir başka deyişle taşlama işlemi, iş parçalarının dar toleranslar içinde istenilen şekil ve ölçüde elde edilmesini sağlayan önemli bir imalat yöntemidir. Bu yöntem özellikle diğer imalat yöntemlerinin (tornalama, frezeleme vb.) ölçü tamlığı ve yüzey pürüzlülüğü açısından yetersiz kaldığı durumlarda yoğun olarak tercih edilmektedir [58]. Taşlama işlemi esnasında özellikle kesme bölgesinde yüksek ısı meydana gelmektedir. Bu yüksek ısı çoğunlukla negatif kesme açısı ve taşlama yüzeyindeki temas büyüklüğüyle ilgilidir [59,60]. Yeterli

yağlama-soğutma kullanmadan yapılan taşlama işlemleri sonucunda malzemede termal hasarlar ve boyutsal farklılıklar oluşabilir. Bu nedenle taşlama operasyonlarında kuru işleme endüstriyel uygulamalarda tercih edilen bir yöntem değildir [61]. Oluşan ısı, kesme sıvısı aracılığıyla kesme bölgesinden uzaklaştırmazsa iş parçası yüzeyinde yoğun termal problemler meydana gelebilir. Kesme sıvısı kullanımı ile kuru işleme karşılaştırıldığında kesme kuvveti, taşın aşınması, malzeme kaldırma oranı ve yüzey kalitesi açısından mutlak farklar gözlenebilir [62].

Minimum Miktarda Yağlama sistemi taşlama işlemleri için yeni bir soğutma-yağlama teknolojisi olsa da [29-31] kuru taşlamaya karşı bir alternatif olarak dikkatimizi çekmektedir. Taşlamada MMY sistemi, aerosol adı verilen hava-kesme sıvısı karışımının kesme bölgesine minimum miktarda püskürtülmesi prensibine dayanmaktadır [6]. Bir dizi çalışma göstermiştir ki; kuru işlemeye karşılaştırıldığında MMY sistemi taş ömrü ve taşlanmış yüzey kalitesi açısından çok daha iyi sonuçlar vermektedir [63]. Şekil 11'de MMY sisteminin CNC yüzey taşlama tezgahına eklenmiş hali gösterilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde, taşlama işlemlerinde MMY tekniğinin kullanılması sonucu ortaya çıkan yayınlar incelenmiş ve pozitif/negatif yönleri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

3.2. Taşlama Operasyonlarında MMY Sistemi Uygulamaları

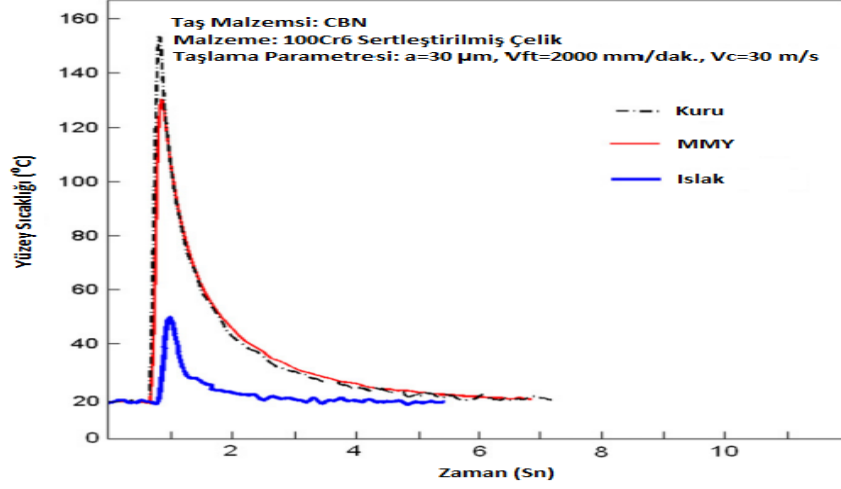
Shen, kuru, ıslak ve MMY şartları altında dökme demirin taşlanmasını incelemiştir. Araştırmacı MMY sisteminde su bazlı alümina ve elmas nano partiküllü sıvıları kullanarak saf su ile taşlamayı karşılaştırmıştır. Nano partiküllü sıvılar taşlama kuvvetini azaltarak yüzey pürüzlülüğünü azaltmış ve iş parçasının yanmasını önlemiştir. Kuru işlemin aksine MMY sistemi taşlama esnasında oluşan sıcaklığı düşürmüştüğü tespit edilmiştir [64]. Tawakoli ve arkadaşları 100Cr6 sertleştirilmiş çeliğinin taşlanmasında MMY sistemini kullanmışlar ve yağ debisi, hava basıncı, MMY nozul pozisyonu ve nozulun taşa olan uzaklığının yüzey pürüzlülüğü ve taşlama kuvvetine etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, nozul pozisyonu MMY sisteminin uygulanması açısından önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. MMY nozulu kesme bölgesine yaklaşık olarak 10-20° konumlandırıldığında iyi sonuçlar elde edilmiştir. MMY sisteminin kullanımı açısından nihai sonuç ortaya koymak gerekirse, MMY sistemi işlenmiş yüzeyin kalitesi ve taşlama kuvveti açısından büyük faydalar sağlamıştır [65].



Şekil 11- Aynı kesme parametrelerinde ve farklı soğutma-yağlama şartlarında (kuru, ıslak, MMY) taşlanan 100Cr6 sertleştirilmiş çeliğin yüzey pürüzlülüğüne ait değerler grafiği [65].

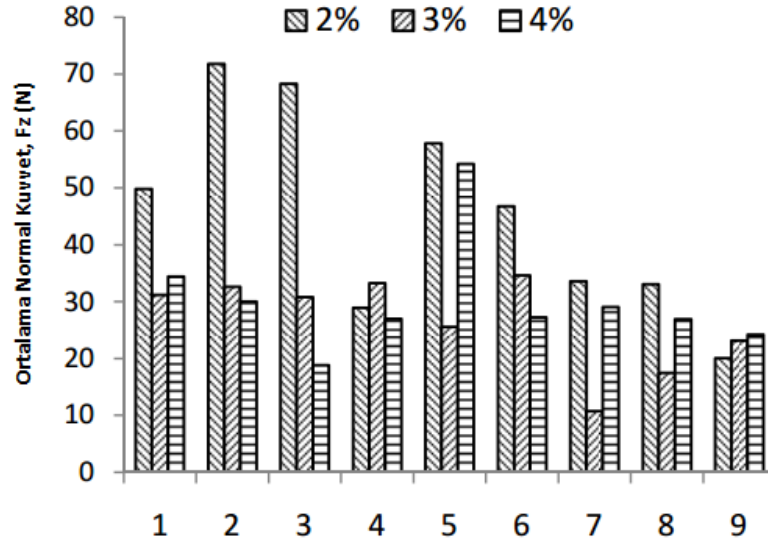
Hadad ve arkadaşları 100Cr6 sertleştirilmiş çeliği kuru, ıslak ve MMY teknikleri altına Al₂O₃ ve CBN aşındırıcılarla taşıyarak ortaya çıkan sıcaklık değişimlerini incelemişlerdir. Sonuçlar, taşlama esnasında oluşan sıcaklık aşındırıcı türüne ve yağlama-soğutma ortamına göre değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Al₂O₃ taşlar ve MMY sistemi eşliğindeki işlemede enerji bölümü %73 ila %77 arasında değişirken bu oran kuru işlemede %82'ye çıkmıştır. Aynı kesici ve ıslak işlemede ise enerji tüketimi %36 civarındadır. Aynı işlem CBN kesicilerle yapıldığında kesicinin yüksek termal iletkenliği sayesinde kuru işleme ve MMY için %52 ve %46 iken ıslak işleme

için %14 civarına düşebilmektedir [66]. Şekil 12’de CBN kesicilerle taşlama yapılırken iş parçası yüzey sıcaklığının kuru, MMY ve ıslak soğutma-yağlama şartları altındaki değişimini göstermektedir.



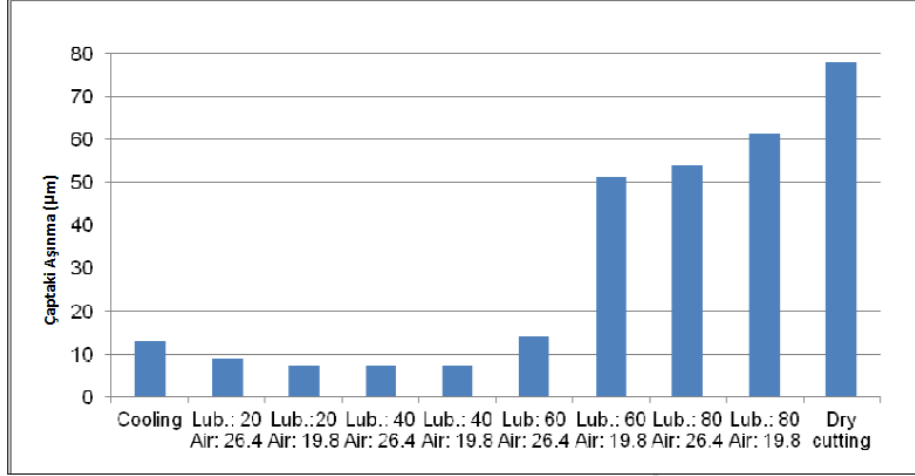
Şekil 12- CBN kesicilerle taşlama yapılırken iş parçası yüzey sıcaklığının kuru, MMY ve ıslak soğutma-yağlama şartları altındaki değişimi [66].

Barczak ve arkadaşları EN8, M2 ve EN31 çeliklerini kuru, ıslak ve MMY sistemi altında Alümina aşındırıcı ile taşlamışlar ve sonuçları kesme kuvveti, sıcaklık ve yüzey kalitesi açısından karşılaştırmışlardır. MMY sistemi ve ıslak taşlama birbirine yakın ve kuru taşlamadan daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu demektir ki MMY sistemi gerek maliyet gerekse çevresel etkilerden dolayı iyi bir soğutma-yağlama alternatifidir [67]. Emami ve arkadaşları Al₂O₃ mühendislik seramiğinin MMY sistemi altında dört farklı kesme sıvısı (sentetik yağ, hidrojenle parçalanmış yağ, bitkisel esaslı yağ, mineral esaslı yağ) ile taşıyarak kesme kuvveti, özgül enerji ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyler esnasında Taguchi L16 dizini kullanılmıştır. Sentetik yağ ve hidrojenle parçalanmış yağ kaba işlemede teknik ve çevresel açıdan tatmin edici sonuçlar verirken hidrojenle parçalanmış yağ sonuçları yüzey kalitesi açısından en iyidir. MMY sistemi sadece işleme sonuçları açısından değil aynı zamanda işçi sağlığı, üretim maliyeti ve çevre açısından da iyi bir alternatiftir [68]. Biswojyothi ve arkadaşları Titanyum (Ti-6Al-4V) alaşımını MMY sistemi altında taşlamışlardır. Taşlama esnasında iyi bir yüzey bütünlüğü yakalamak ve taşlanabilirliği artırmak için MMY sistemini farklı parametrelerde kullanmışlardır. MMY parametresi olarak sıvı yoğunluğu, sıvı debisi ve basınçlı hava miktarı belirlenmiş ve bunların taşlama kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylere göre, artan sıvı yoğunluğu, artan hava basıncı ve artan debi durumlarında taşlama kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünde bir azalma eğilimi vardır. Bu sonuçlardan yola çıkan araştırmacılar MMY sisteminin Titanyum alaşımının taşlanması için alternatif bir soğutma-yağlama sistemi olabileceğine karar vermişlerdir [69]. Şekil 13’te MMY sisteminde artan sıvı yoğunluğu ve hava basıncı altında ortalama normal kuvvetin (Fz) değişimi görülmektedir.



Şekil 13- MMY sisteminde artan sıvı yoğunluğu ve hava basıncı altında ortalama normal kuvvetin (Fz) değişimi [69].

Silva ve arkadaşları ABNT 4340 temperlenmiş çeliği Al₂O₃ ve CBN taşlarla MMY sistemi altında taşlamışlar ve kesme kuvveti, taş aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından sonuçlarını incelemişlerdir. Konvansiyonel soğutma-yağlama sistemi altında CBN daha iyi yüzey kalitesi verirken MMY sistemi altında Alüminyum Oksit daha iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır. Araştırmacılar, MMY sisteminin uygun yağlama parametreleri yakalandığında gerek ortaya konulan ürün gerekse çevresel etki açısından bir soğutma-yağlama sistemi alternatifi olabileceğini iddaa etmişlerdir [31]. Shen ve arkadaşları dökme demirin MMY sistemi altında taşlanmasında nanopartiküler tabanlı MoS₂ (Molibden Disülfür) kesme sıvısı kullanarak bu yeni kesme sıvısının kesme performansı ve tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Aktif MoS₂ nanopartiküllere ticari olarak kolay temin edilebilecek bazı yağlar (Parafin yağı, CANMIST yağı ve soya fasülyesi yağı) değişik miktarlarda eklenmiştir. Test sonuçları konvansiyonel soğutma ile karşılaştırılmıştır. Yeni MoS₂ partiküllü kesme sıvısı teğetsel taşlama kuvveti ve kesme bölgesindeki taşlama ısısını önemli ölçüde azaltmıştır [70]. Silva ve arkadaşları basınçlı hava aracılığıyla minimum miktarda kesme sıvısını kesme bölgesine gönderme metodu olarak tanımlanan MMY sisteminin davranışlarını analiz etmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmada biyolojik olarak parçalanabilen ve böylece sağlık ve çevre anlamında zararsız olan kesme sıvısı ve alüminyum oksit aşındırıcı kullanmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmalarını süresince AISI 4340 sertleştirilmiş çeliğin taşlanması sırasında konvansiyonel soğutma sıvısı, kuru işleme ve MMY sistemini karşılaştırmışlardır. Farklı soğutma sistemleri altındaki uygulamalar kesici aşınması ve yüzey bütünlüğü (pürüzlülük, mikroyapı ve mikrosertlik) açısından değerlendirilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki; taşlama işlemlerinde yağlama miktarı ve soğutma-yağlama metodu önemli bir etkiye sahiptir. Yani, MMY sistemi konvansiyonel sistemle karşılaştırılmış ve büyük ölçüde benzer özellikler sergilemiştir. Dolayısıyla araştırmacılar gerek maliyet gerekse çevresel anlamda olumlu etkilerinden dolayı MMY endüstri uygulamaları için iyi bir alternatif olabileceğini iddaa etmektedirler [71]. Şekil 14'te AISI 4340 sertleştirilmiş çeliğin farklı soğutma-yağlama şartları altında her biri 1mm'lik toplam 5 pasoda işlenmesinden sonra taşın çapında meydana gelen aşınma miktarlarını göstermektedir.



Şekil 14- AISI 4340 sertleştirilmiş çeliğin farklı soğutma-yağlama şartları altında her biri 1mm'lik toplam 5 pasoda işlenmesinden sonra taşın çapında meydana gelen aşınma miktarları [71].

Taşıma uygulamalarında ortaya konulan çalışmalar ışığında, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı, taşıma kuvveti ve taş aşınması açısından soğutma-yağlama metodu önemli bir etkiye sahiptir. Yapılan çalışmaların tamamına yakınında kuru işleme verdiği sonuçlar itibarıyla taşıma için düşünülen bir işleme yöntemi olmadığını göstermektedir. Bu nedenlerle birlikte gerek üretim maliyeti gerekse kesme bölgesine ıslak işlemeye göre çok daha fazla etki etmesinden dolayı MMY sistemi taşıma işlemleri için iyi bir soğutma-yağlama alternatifi olarak literatürde yer almaya başlamıştır. Ancak kesme bölgesine gönderilen sıvı miktarından dolayı kesme sıcaklığında ıslak işleme MMY sistemine göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir [64].

4. SONUÇLAR

MMY sisteminin delme ve taşıma operasyonlarındaki uygulamalarının incelendiği bu çalışmada ortaya çıkan ana sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- Takım ömrü açısından MMY sistemi ve ıslak işleme birbirine yakın sonuçlar verirken MMY sistemi kuru işleme göre daha iyi sonuçlar vermektedir.
- Tork, kesme kuvveti ve delik çapları açısından MMY sistemi ile ıslak işleme birbirine yakın sonuçlar verirken yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonucu MMY sisteminin verdiği vurgulanmaktadır.
- Özellikle delik operasyonlarında, kesme bölgesindeki ısıyı kontrol etme açısından, içten soğutmalı MMY sistemi dıştan soğutmalı MMY sistemine nazaran daha iyi sonuçlar vermektedir.
- Raybalama işlemlerinde MMY sistemi işlenebilirlik kriterleri açısından ıslak işlemeyle yakın sonuçlar verirken kuru işleme göre daha iyi sonuçlar vermektedir.
- Hem taşıma hem de delik operasyonlarında, işleme esnasında harcanan güç dikkate alındığında MMY sistemi hem ıslak işleme hem de kuru işleme göre daha az güç sarfiyatı sağlamaktadır.

Yukarıda sıralanan maddeler ışığında, MMY sistemi işlenebilirlik kriterleri açısından ıslak işlemeyle yakın sonuçlar verirken işleme maliyeti, çevre kirliliği ve işçi sağlığı dikkate alındığında iyi bir soğutma-yağlama alternatifi olarak ön plana çıkmaktadır. Yine yukarıda sıralanan maddeler ışığında MMY sistemi özel bir sistem ve ekstra soğutucu-yağlayıcı maddeler gerektirdiğinden daha maliyetli olmasına rağmen takım aşınması, kesme kuvveti, kesme bölgesinde oluşan ısı, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi sonuçlar vermesi sebebiyle kuru işleme nazaran daha tercih edilebilir olduğunu göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1]. Razak, N. H., Rahman, M. M., Noor, M.M., Kadirgama K., 2010, “A Review Of Minimum Quantity Lubricant On Machining Performance”, National Conference in Mechanical Engineering Research and Postgraduate Students, FKM Conference Hall , UMP, Kuantan, Pahang, Malaysia ; pp. 72 -85.
- [2]. Schirsch, R., Thamke, D., Zielasko, W., 1998, “Wirtschaftlichkeit der Trockenbearbeitung, Trockenbearbeitung prismatischer Teile”, VDIBerichte, 1375: 371-397.
- [3]. Weinert, K., Adams, F. J., Thamke, D., 1995, “Was kostet die Kühlschmierung?”, Technica, 44/7:19-23.
- [4]. Thamke, D., 1998, “Technologische Und Ökonomische Aspekte Der Trockenund Minimalmengensbearbeitung Am Beispiel Des Einlippentiefbohrens”, PhD-thesis, University of Dortmund, Germany
- [5]. Kissler, H., 2000, “KSS-bedingte Kosten in derspanenden Metallbearbeitung als Anreiz für die Trockenbearbeitung”, 12 th International Colloquium Tribology 2000 - Plus, Conference Proc., 2: 901-913.
- [6]. Astakhov V. P., 2008, “Ecological Machining: Near-Dry Machining”, In: Davim JP (ed) Machining: fundamentals and recent advances. Springer, London.
- [7]. Walker T., , 2013, “A Guide To Machining With Minimum Quantity Lubrication”, The MQL Handbook.
- [8]. Dhar, N.R., S., Paul. and Chattopadhyay, A.B., 2000., “Beneficial Effects Of Cryogenic Cooling Over Dry And Wet Machining On Tool Wear And Surface Finish in Turning AISI 1060 Steel”, Proceedings of ICAMT-2000, Malaysia, pp. 209-214.
- [9]. Sokovic, M. and Mijanovic, K., 2001, “Ecological Aspects Of The Cutting Fluids And Its Influence On Quantifiable Parameters Of The Cutting Process”, Journal of Materials Processing Technology, 109(1 -2): 181-189
- [10].Klocke F., Eisenblatter G., 1999, “Coated Tools For Metal Cutting–Features And Applications”, CIRP 48/2, 515–525.
- [11].Klocke F., and Eisenblatter G., 1997, “Proceedings Of The Opening Session Of The Dry Cutting”, CIRP. Annals, 46(2): 519-526.
- [12].Sutherland, J.W., 2000, “An Experimental Investigation Of Air Quality In Wet And Dry Turning”, Ann. CIRP, 49(1): 61–64.
- [13].Suda S., Hideo Y., Fujio K., Ichiro I. and Toshiaki W., 2001, “Evaluation Of Machinability With MQL System And Effectiveness In Production Lines”, Proceedings Of The International Tribology Conference, Nagasaki, 2: 203–208.
- [14].McCabe J. and Ostaraff M.A., 2001, “Performance Experience With Near-Dry Machining Of Aluminum”, Tribology and Lubrication Engineering, pp. 22–27.
- [15].Weinert K., Inasaki İ., Sutherland J. W., Wakabayashi T., 2004, “Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication”, CIRPAnnals – Manufacturing Technology 53(2):511–537.
- [16].Damir A., Lancereau S., Attia H., Hendrick P., 2010, “On the Performance of Minimum Quantity Lubrication in Milling Al 6061”, Proceedings CIRP-2nd International Conference on Process Machine Interactions, Vancouver, B.C., Canada.
- [17].Sadek A., Meshreki M., Shi Z., Attia H., 2010, “A Comparative Study on Conventional and Orbital Drilling of Woven Carbon Fiber Reinforced Epoxy Laminates”, Proceedings CIRP-2nd International Conference on Process Machine Interactions, Vancouver, B.C., Canada.
- [18].Park K., H., 2010, “A Study on Droplets and Their Distribution for MinimumQuantity Lubrication (MQL)”, International Journal of Machine Tools and Manufacture 50(9):824–833.
- [19].Thornburg J., Leith D., 2000, “Size Distribution of Mist Generated During Metal Machining”, Applied Occupational and Environmental Hygiene 15(8):618–628.
- [20].Klocke, F., Gerschwiler, K., 2003, “Minimalmengenschmierung – Systeme, Medien, Einsatzbeispiele und ökonomische Aspekte derTrockenbearbeitung”, Trockenbearbeitung von Metallen, Proc. of the VDI-Seminar, Stuttgart, Mar. 18: 2.1-2.20.
- [21].Suzuki, S., 2002, “Developments in Oil Supplying Systems for MQL Cutting”, Journal of Japanese Society of Tribologists, 47, 538-543.
- [22].Braga D.U., Diniz A.E., Miranda G.W.A. and Coppini N.L., 2002, “Using A Minimum Quantity Of Lubricant (MQL) And A Diamond Coated Tool In The Drilling Of Aluminum-Silicon Alloys,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 122, no. 1, pp. 127-138

- [23]. Filipovic A., and Stephenson D.A., 2006, "Minimum Quantity Lubrication Applications In Automotive Power-Train Machining," *Machining Science and Technology*, vol. No. 10, pp. 3-22.
- [24]. Lopez de Lacalle L.N., Angulo C., Lamikiz A., and Sanchez J.A., 2006, "Experimental 169 And Numerical Investigation Of The Effect Of Spray Cutting Fluids In High Speed Milling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, pp. 11-15.
- [25]. Su Y.L., Liu T.H., Su C.T., Yao S.H., Kao W.H., and Cheng K.W., 2006, "Wear Of 172CrC-Coated Carbide Tools In Dry Machining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, pp. 108-117.
- [26]. Wakabayashi T., Sato H., and Inasaki I., 1998, "Turning Using Extremely Small Amounts Of Cutting Fluids," *JSME International Journal*, vol. 41, pp. 143-148.
- [27]. Dhar N.R., Islam M.W., Islam S., and Mithu M.A.H., 2006, "The Influence Of Minimum Quantity Of Lubrication (MQL) On Cutting Temperature, Chip And Dimensional Accuracy In Turning AISI-1040 Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, pp. 93-99.
- [28]. Kamata Y., and Obikawa T., 2007, "High Speed MQL Finish-Turning Of Inconel 718 With Different Coated Tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 192, pp. 281-286.
- [29]. Baheti U., Guo C., and Malkin S., 1998, "Environmentally Conscious Cooling And Lubrication For Grinding," *Proceedings of the International Seminar on Improving Machine Tool Performance*, vol. 2, pp. 643-654.
- [30]. Hafenbraedl D., and Malkin S., 2000, "Environmentally-Conscious Minimum Quantity Lubrication (MQL) For Internal Cylindrical Grinding," *Transactions of NAMRI/SME*, vol. 28, pp. 149-154.
- [31]. Silva L.R., Bianchi E.C., Catai R.E., Füsse R.Y., and Franca T.V., 2005, "Study On The Behavior Of The Minimum Quantity Lubricant - MQL Technique Under Different Lubricating And Cooling Conditions When Grinding ABNT 4340 Steel," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. -192-199.
- [32]. Yıldırım Ç. V., Kıvık, T. ve Erzincanlı F., "Minimum Miktarla Yağlama Tekniğinin Tornalama Ve Frezeleme İşlemlerindeki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme", 2. Uluslar Arası Demir Çelik Sempozyumu (IISS'15), 1-3 Nisan 2014, Karabük, Türkiye
- [33]. Tonshoff H. L., Spintig, W., König, W., Neises, A., 1994, "Machining of Holes Developments in Drilling Technology", *Annals of the CIRP*, 43 (2): 551-560.
- [34]. Çakır, M.C., 2000, "Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri", Vipaş A.Ş, Bursa, 350-390.
- [35]. Avuncan G., "Talaş Kaldırma Ekonomisi ve Kesici Takımlar" Mavi Tanıtım ve Pazarlama Ltd. Şti., Gebze, 195-249 (1998)
- [36]. G.R. Booth, *Bore reaming can beat finish boring*, *Mach. Prod. Eng.* 1989, 28-30.
- [37]. Derflinger V., Brandle H., Zimmermann H., 1999, "New Hard/Lubricant Coating For Dry Machining", *Surf. Coat. Technol.* 113, 286-292.
- [38]. Guhring'10, 2010, Innovative solutions from the spindle to the cutting edge from Guhring's GM 300 program to optimize production.
- [39]. Trent E.M. and Wright P.K., 2000. "Metal Cutting", fourth ed., p. 312.
- [40]. Rahim E. and Sasahara H., 2009, "Application Of Minimum Quantity Lubrication When Drilling Nickel-Based Superalloy At High Cutting Speed", *Key Eng. Mater.* 407, 612-615.
- [41]. Min S., Inasaki I., Fujimura S., Wada T., Suda S., Wakabayashi T., 2005, "A Study on Tribology in Minimal Quantity Lubrication Cutting", *Annals of the CIRP*, 54/1, p. 105.
- [42]. Wakabayashi T., Suda S., Inasaki I., Terasaka K., Musha Y., Toda Y., 2007, "Tribological Action and Cutting Performance of MQL Media in Machining of Aluminum", *Annals of the CIRP*, 56/1, p. 97.
- [43]. Biermann D., Heilmann M., Randecker H., Fees A., 2011, "Minimalmengenschmierung beim Tief-bohren mit kleinen Durchmesser- Ein Verfahren wird trocken gelegt", *WB Werkstatt und Betrieb*, 144/10, p. 68.
- [44]. Tasdelen B., Wikblom T., Ekered S., 2008, "Studies On Minimum Quantity Lubrication (MQL) And Air Cooling At Drilling", *Journal Of Materials Processing Technology* 200, 339-346.
- [45]. Zeilmann R., P. And Weingaertner W., L., 2006, "Analysis Of Temperature During Drilling Of Ti6Al4V With Minimal Quantity Of Lubricant", *Journal of Materials Processing Technology*, 179, 124-127.
- [46]. Rahim E.A. and Sasahara H., 2011, "A Study Of The Effect Of Palm Oil as MQL Lubricant On High Speed Drilling Of Titanium Alloys", *Tribology International*, 309 -317.
- [47]. Heinemann R., Hinduja S., Barrow G., Petuelli G., 2006, "Effect Of MQL On The Tool Life Of Small Twist Drills In Deep-Hole Drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1-6.

6. ULUSAL TALAŞLI İMALAT SEMPOZYUMU 5-7 KASIM 2015 SABANCI ÜNİVERSİTESİ, İSTANBUL

- [48].Klocke F., Beck T., Eisenblatter G., Fritsch R., Lung D., Pohls M., “Application Of Minimal Quantity Of Lubrication (MQL) In Cutting And Grinding”, The British Library- The Worldis Knowledge, 967-980.
- [49].Meena A. and El Mansori M., 2011, Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications, *Wear* 271, 2412–2416
- [50].Kelly J., F. and Cotterell M., G., 2002, Minimal Lubrication Machining Of Aluminium Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 327-334.
- [51].Bhowmick S., Lukitsch M., J., Alpas A., T., 2010, “Tapping Of Al–Si Alloys With Diamond-Like Carbon Coated Tools And Minimum Quantity Lubrication”, *Journal of Materials Processing Technology* 210, 2142–2153.
- [52].De Chiffre L., Tosello G., Piska M., Muller P., 2009, “Investigation On Capability Of The Reaming Process Using Minimal Quantity Lubrication”, *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology* Vol.2, Pp.47-54.
- [53].Lugscheider E., Knotek O., Barimani C., Leyendecker T., Lemmer O. and Wenke R., 1997, “Investigations On Hard Coated Reamers In Different Lubricant Free Cutting Operations”, *Surf. Coat. Technol.*, 90: 172–177.
- [54].Davim, J. P., Sreejith, P.S., Gomes, R. and Peixoto, C, 2006, “Experimental Studies On Drilling Of Alumunium (AA0150) Under Dry, Minimum Quantity Lubricant, And Flooded-Lubricated Conditions”, *Proc. ImechE. Part B: Journal of Engineering and Manufacturing*, 220: 1605-1611.
- [55].Özçelik, B., Demirbaş, E., Kuram, E., Şik, E. Ve Tansel, İ.N., Geliştirilen Ayçiçeği Ve Kanola Esaslı Bitkisel Soğutma Yağlarının Aisi 304 Malzemenin Delinmesindeki Performansları, Yıldız Teknik Üniversitesi, I. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, UTIS 2009, S:121-129, 02-03 Ekim, Beşiktaş-İstanbul, (2009).
- [56].Kılıçkap, E., Hüseyinoğlu, M. ve Özel, C., e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences, 1A0052, 4, (4), 547-558.
- [57].Gülmez S., Aykut Ş., Demetgül M., 2009, “Titanyum Alaşımli Ti6al4v Malzemenin Düzlem Yüzey Taşlanmasında Değişken Taşlama Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin Deneysel İncelenmesi” 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye,.
- [58].Kalpakjian S., 1991, “Manufacturing Process for Engineering Materials”, Addison-Wesley, New York, 120-121.
- [59].T. Tawakoli, M.J. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stockert, A. Rasifard, An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 924–932
- [60].Sadeghi M., H., Haddad M., J., Tawakoli T., Emami M., 2009, “Minimal Quantity Lubrication-MQL In Grinding Of Ti–6Al–4V Titanium Alloy”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 44, 487–500.
- [61].Malkin S., 2008, “Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives”, second ed., Industrial Press Inc.
- [62].Tawakoli T., Westkaemper E., Rabiey M., 2007, “Dry Grinding By Special Conditioning”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 33, 419–424.
- [63].M.J. Hadad M., J., 2010, “Minimum Quantity Lubrication-MQL Grinding Process & Investigation of Surface Quality”, Ph.D. Thesis, Manufacturing Engineering Division, School of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- [64].B. Shen, 2008, “Minimum Quantity Lubrication Grinding Using Nanofluids”, Ph.D.Thesis, The University of Michigan, Michigan, USA.
- [65].Tawakoli T., Hadad M., J., Sadeghi M., H., 2010, “Influence Of Oil Mist Parameters On Minimum Quantity Lubrication – MQL Grinding Process”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50, 521–531.
- [66].Hadad M.J., Tawakoli T., Sadeghi M., H., Sadeghi B., 2012, “Temperature And Energy Partition In Minimum Quantity Lubrication-MQL Grinding Process”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 54–55, 10–17.
- [67].Barczak L., M., Batako A., D., L., Morgan M., N., 2010, “A Study Of Plane Surface Grinding Under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Conditions”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 50, 977–985.
- [68].Emami M., Sadeghi M., H., Sarhan A., A., D., Hasani F., 2014, “Investigating the Minimum Quantity Lubrication in Grinding of Al₂O₃ Engineering Ceramic”, *Journal of Cleaner Production* 66, 632-643.
- [69].Biswojyothi M., Arunachalam S., S., B., Vijayaraghavan L., 2014, “A Study On The Minimum Quantity

6. ULUSAL TALAŞLI İMALAT SEMPOZYUMU 5-7 KASIM 2015 SABANCI ÜNİVERSİTESİ, İSTANBUL

Lubrication In Grinding Of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)", 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, IIT Guwahati, Assam, India.

- [70].Shen B., Malshe A., P., Kalita P. and Shih A. J., 2008, "Performance of Novel MoS₂ Nanoparticles Based Grinding Fluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding," Trans. NAMRI/SME, 36, pp. 357–364.
- [71].Silva L.,R., Corrêa E., C., S., Brandão J., R., de Ávila R., F., 2013, "Environmentally Friendly Manufacturing: Behavior Analysis Of Minimum Quantity Of Lubricant - MQL İn Grinding Process", Journal of Cleaner Production, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.01.033.

JANT ÜRETİM PROSESİ TORNALAMA AŞAMASINDA OLUŞAN AYAR FİRELERİNİN DÜŞÜRÜLMESİ

İsmail Çakırgöz, Mehmet Dağ, Murat Çetin, Macit Çağlar, Zafer Katı, Ömer Burak Çe, Uğur Aybarç

CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş., İzmir/TÜRKİYE,
icakirgoz@cms.com.tr
bce@cms.com.tr
uaybarc@cms.com.tr

Özet

Talaşlı imalat işlemleri, özellikle aynı hat üzerinde farklı tip ve modelde üretim yapılması sırasında, büyük bir özen gerektirmektedir. Yeni bir model üretimine geçiş aşamasında ayarların ilk seferde doğru yapılması hatasız ürünler elde edilmesini sağlarken ayarlarda yapılacak hatalar ürünlerin ayar firesi olarak ayrılmasına neden olmaktadır. 6 Sigma projesi olarak gerçekleştirilen bu çalışma, tornalama işleminde oluşan ayar firelerinin azaltılmasına yöneliktir. Çalışma sonunda özellikle jantların tornalama işlemi dikkat edilmesi gereken 3 temel girdi belirlenmiştir. Bu girdilerin kontrolü ile seri üretimde elde edilen fire değerlerinde ve ayar değişim sürelerindeki azalmalar gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Talaşlı imalat ayar fireleri, jant üretiminde talaşlı imalat ayarları, talaşlı imalat proses iyileştirme

DECREASING OF SETTING WASTAGE DURING THE FIRST MACHINING PROCESS

Abstract

Machining processes require careful attention especially during the production of different types of product models on the same production line-. If the present machines are set correctly at the first time prior to manufacturing, impeccable product could be produced. On the other hand, if the settings are not correct, high percentage of wastage will likely occur. The current study which is in the scope of 6 Sigma, is related to the reduction of wastages during the wheel machining operation setting. This study emphasizes three main points identified for wheel machining operation setting. As a result, the wastage of wheel can be decreased by controlling these three main operation steps.

Key Words: Machining wastages in pre-settings, machining settings in wheel production, machining process improvement

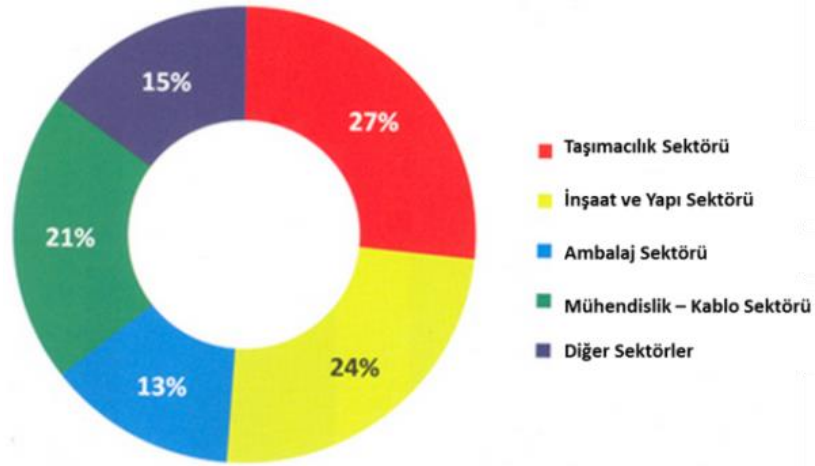
1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımları başta otomotiv sektörü ağırlıklı olmak üzere endüstrinin birçok alanında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Alüminyum, yüksek korozyon dayanımı, yüksek termal iletkenlik ve mukavemet özelliklerine sahip olmasına karşılık düşük yoğunluğu sayesinde nihai ürünlere ağırlık açısından kazandırdığı avantaj nedeniyle büyük ilgi görmekte ve sahip olduğu özellikler açısından tercih edilen bir malzeme haline gelmektedir [1-4]. Özellikle alüminyum malzemeden üretilen ürünler faydalı kullanım ömrü boyunca sağladıkları avantajların yanı sıra hurdada ayrıldıktan sonra da geri dönüşüm çalışmaları ile tekrar kullanılabilir ürünlere dönüştürülebilmektedir. Hurdadan geri kazanım yoluyla hammadde olarak kullanılması, cevher olarak alüminyumun elde edilmesi ile karşılaştırıldığında; 1 ton kullanılmış alüminyumdan alüminyum üretilmesi halinde;

- ✓ 1300 kg boksit bakiyesi,
- ✓ 15000 litre soğutma suyu,
- ✓ 860 litre proses suyu,
- ✓ 2000 kg CO₂ ve 11 kg SO₂ emisyonu

daha az oluşmaktadır/kullanılmaktadır [5]. Bu durum hem çevre kirliliğinin azaltılmasında önemli bir etki sağlamakta hem de mevcut alüminyum rezervlerinin daha uzun yıllar kullanılabilir olmasında katkıda bulunmaktadır.

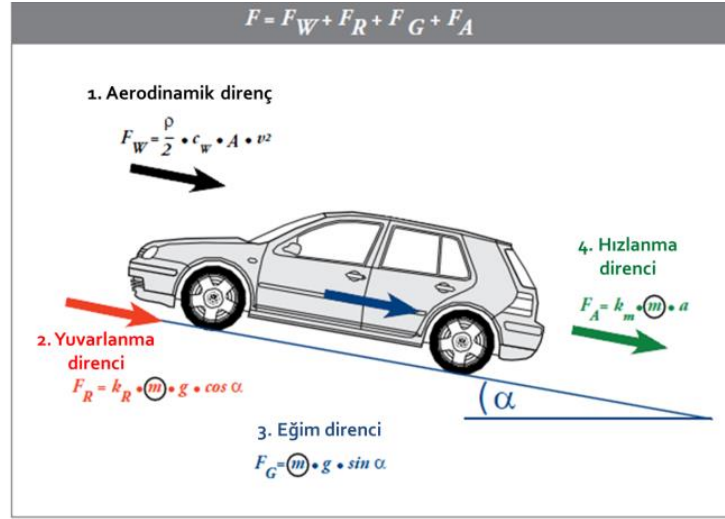
Grafik 1 alüminyumun kullanıldığı sektörlere göre % dağılımını göstermektedir.



Grafik 1. Alüminyumun kullanıldığı sektörler [6]

Grafik 1’den de görüldüğü gibi taşımacılık sektörü alüminyum ve alüminyum alaşımlarının en çok kullanıldığı sektördür. Bunun en önemli nedeni ürünlere sağladığı hafiflik sayesinde taşıtların toplam ağırlıklarında azalma meydana getirmesidir. Böylece daha az yakıt tüketimi ile doğal kaynakların tüketiminin azalması sayesinde çevrenin korunması açısından da olumlu katkı sağlanmaktadır.

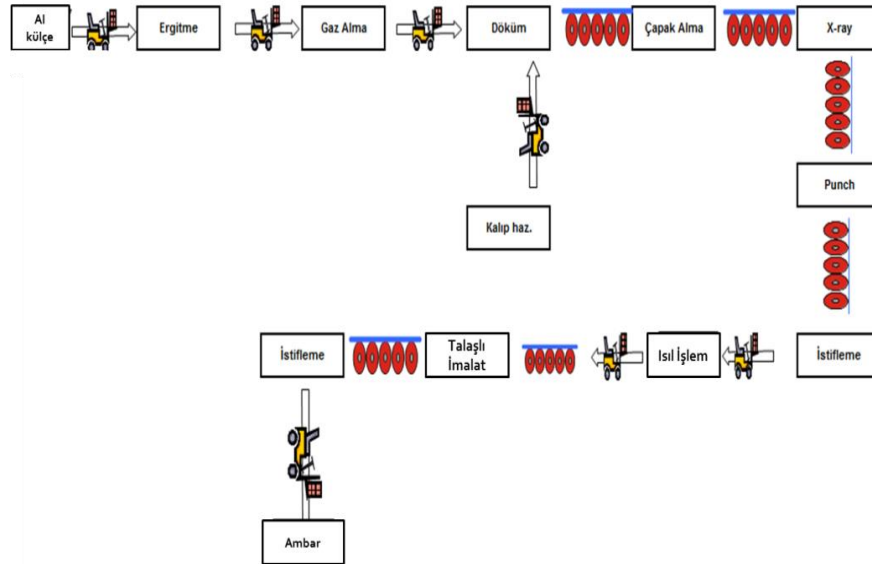
Şekil 1’de görüldüğü gibi bir aracı hareket ettirmek için gerekli olan enerji (aerodinamik direnç hariç) aracın ağırlığı ile doğrudan orantılıdır. Aracı oluşturan diğer bileşenlerin yanı sıra jantlarda elde edilecek bir ağırlık kazancı aracın toplam ağırlığında önemli bir azalma sağlanmasına imkan tanımaktadır. Bu nedenle jant üretim süreçleri ve üretilen jantlar önem kazanmaktadır. Şekil 2’de görüldüğü gibi jant üretim süreci ergitme, döküm, ısıtma işlemi, talaşlı imalat ve boya olmak üzere temelde 5 ana operasyondan oluşmaktadır.



Şekil 1. Araç hareketine etki eden kuvvetler [7]

Ergitme ve döküm proseslerinde sorunsuz olarak üretilen jantlar talaşlı imalat bölümünde belirlenen ölçülere göre işlendikten sonra boya işlemine alınmak için istiflenmektedir. Talaşlı imalat prosesinde yapılacak uygulamalar nihai üründe ürün yüzey kalitesini birebir etkilemektedir. Bu nedenle talaşlı imalat bölümünde yapılan çalışmalar ve iyileştirmeler izleyen proseslerde verimlilik artışı açısından önemli bir etkiye sahip olmaktadır.

Yapılan bu çalışmanın amacı; özellikle farklı model ve tasarıma sahip jant üretimi sürecinde talaşlı imalat proseslerinde bir ürün modelinin işlenmesi bitirilip yeni bir ürün modelinin işlenmesine geçildiği zaman oluşan ayar firelerinin düşürülmesi ve ilk seferde kalite olarak kabul edilir jantın üretilmesini sağlamaktır. Bu durum jantın tornalama operasyonunda ortaya çıkan veya çıkabilecek fire jant miktarlarının azalmasında avantaj sağlayacaktır. Ayrıca dolaylı olarak tornalama ayar dönüş sürelerinde de azalma sağlanacağı için proses verimliliğinde de artış elde edilmesi öngörülmektedir.



Şekil 2. Jant üretim süreci

2. UYGULAMA

Jant üretim süreçlerinde talaşlı imalat işlemleri sırasında tornalama işleminde meydana gelen firelerin azaltılması amacıyla yapılan bu çalışmanın uygulama kısmı iki başlıktan oluşmaktadır. İlk olarak mevcut durum analizi kapsamında yapılan çalışmalar ele alınmaktadır. İkinci kısımda ise yapılan iyileştirme çalışmaları ve bunların seri üretimdeki yansımaları özetlenmektedir.

2.1 Mevcut Durum Analizi

Mevcut durumda üretilen farklı jant modelleri göz önüne alınarak talaşlı imalat sürecinde ayar değişikliği sırasında oluşan fire miktarları belirlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sayısal veriler Tablo 1’de gösterildiği gibidir. Tablo 1’den elde edilen veriler ile tornalama işlemi sırasında ayar süresi, gerçek ayar süresi, ayar işleminde atılan fire ve ayar süreleri arasında oluşan fark değerlerinin ortalaması Tablo 2’de özet olarak gösterilmektedir.

Tablo 2’den de görüldüğü gibi her bir ayar dönüş işlemleri sırasında ortalama olarak 1,1 adet jant fireye ayrılırken yaklaşık olarak 8 dakikalık bir ayar süresi kaybı meydana gelmektedir. Bu kayıpların bertaraf edilerek tornalama firelerinin azaltılması kapsamında yapılan çalışmada başlangıç olarak süreç girdileri ve çıktıları Şekil 3’deki gibi tanımlanmaya çalışılmıştır.

Tablo 1. Mevcut durum analizi verileri

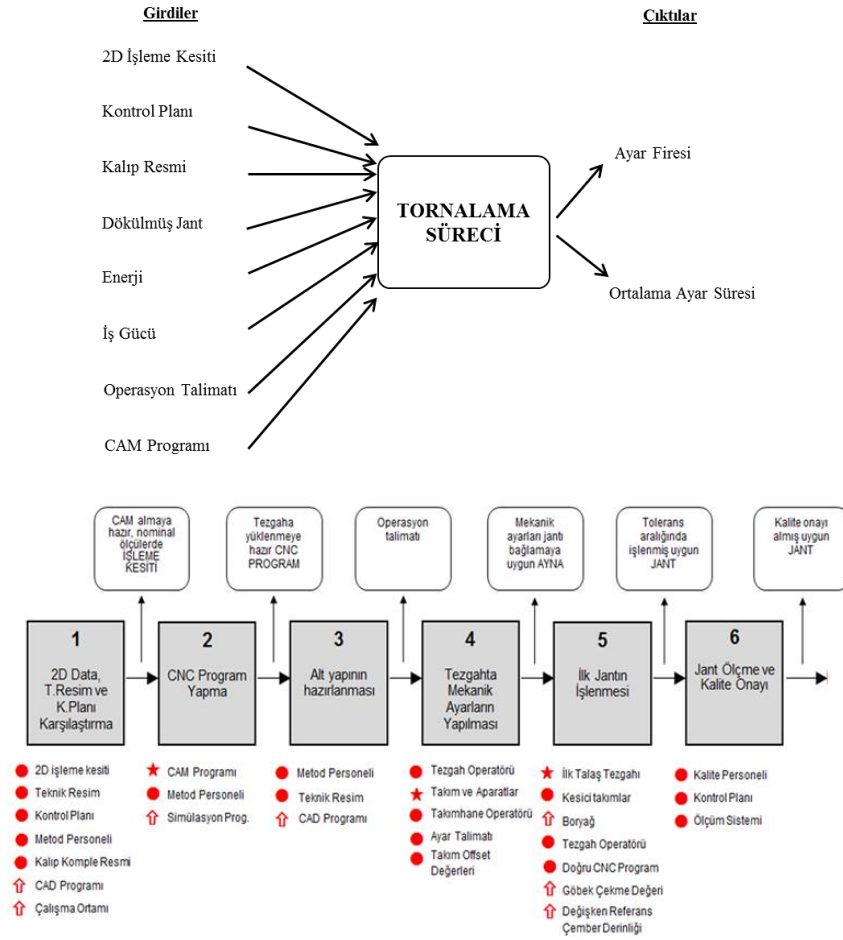
*CMS ref +: Firmamızda referans olarak belirlenen ayar süresi üzerine çıkılan miktarlar verilmiştir.

İşlenen Model	CMS-A	CMS-B	CMS-C	CMS-D	CMS-E	CMS-F	CMS-D	CMS-G	CMS-H	CMS-I	CMS-J
Ayar Dönülen Model	CMS-E	CMS-C	CMS-E	CMS-E	CMS-K	CMS-L	CMS-M	CMS-N	CMS-P	CMS-R	CMS-S
Ayar Süresi (dk.)*	10	13	22	21	14	24	0	25	21	12	20
Ayarlarda Atılan Parça Sayısı, (adet)	1	1	1	1	1	1	0	2	1	2	1

Tablo 2. Tornalama işleminde oluşan ayar süresi ve fire ortalama değerleri

	Ortalama
Gerçek Ayar Süresi (dk.)*	17,5
Ayarda Atılan Fire	1,1

*CMS ref +: Firmamızda referans olarak belirlenen ayar ayar süresi üzerine çıkılan miktarlar verilmiştir.

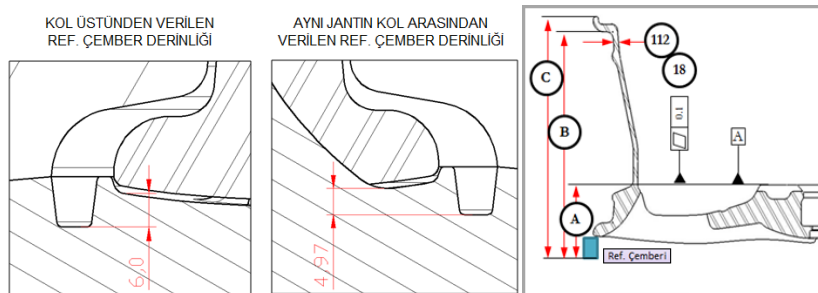


Şekil 3. Tornalama işlemi süreç girdi ve çıktıları

Tüm süreç girdi ve çıktıları göz önüne alındığında seri üretimde bir modelden başka bir modele ayar dönülmesi işlemi sırasında işlenen ilk jantın ölçüsel olarak neden uygun olmadığını tespit etmek amacıyla 3 önemli girdi incelemeye alınmıştır. Bu girdiler ve bu girdilere ait inceleme sonucu detay bilgileri aşağıda verilmiştir.

1. Kalıp Komple Resmi ve Kontrol Planı Etkileşimi

Jant üretiminde talaşlı imalat basamaklarını gerçekleştirebilmek için jantın imalat tezgahlarına güvenli bir şekilde sabitlenmesi gerekmektedir. Ancak jant, geometrisi gereği bir bağlama yüzeyine sahip değildir. Bu nedenle döküm kalıbı tasarlanırken jant üretiminde görevini tamamladıktan sonra talaşlı imalat basamaklarında işlenerek kaldırılmak üzere bir yüzey eklenir, bu yüzey referans çemberi olarak adlandırılmaktadır. Bu referans çemberinin sahip olduğu derinlik ölçüsünün doğru noktadan verilmemesi (feder arası, feder üstü) kontrol planındaki tam boy, offset mesafesi gibi ölçülerin hatalı olmasına sebep olacaktır. Şekil 5’de de görüldüğü gibi eğer bu derinlik kol üstünden verildiyse, resimde verilen ölçü referans çember derinliğini tam olarak yansıtmayacak ve ürüne ait üretim kontrol planındaki ölçüleri de olumsuz etkileyecektir (A, B ve C ölçüleri).

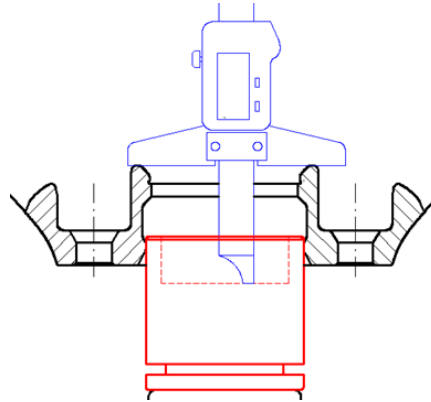


Şekil 5. Referans çember derinliği ölçüm farklılığı

2. Göbek Çekme Değeri

Alçak basınç döküm yöntemi kullanılarak üretilen alüminyum alaşım jantlarda, jant geometrisi, döküm sonrası soğutma süreçleri ve ısıtma süreçlerine bağlı olarak yöntemin doğası gereği bir takım şekilsel deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu deformasyonlar çoğunlukla aynı model jant için yakın değerlerde ortaya çıkmaktadır. Ancak döküm sonrası haliyle bu çekme-çarpılma miktarı ölçülememektedir.

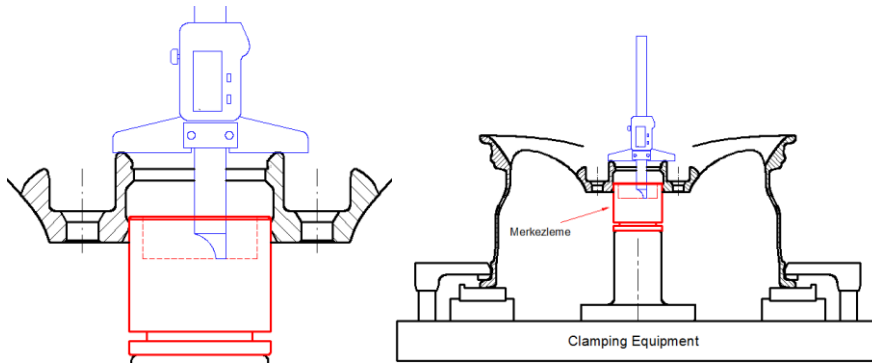
Seri üretim koşullarında yapılan incelemeler sonucu, tornalama işlemi için yapılan ayarlar fire olarak ayrılan jantların kapak derinliklerinin çoğunlukla tolerans dışı olduğu görülmüştür. İşlenecek ilk jantın göbek çekme değeri operatör tarafından ölçülmediği için (referans değer ne olması gerektiğine dair herhangi bir bilgi olmadığı için) jantlarda kullanılan göbek kapağı oturma yüzeyi derinliği tolerans dışı olmakta ve bu nedenle jant fireye ayrılmaktadır. Belirlenecek referans bir değere göre ilk işlenecek jantın göbek kısmındaki çekmenin ne kadar olduğunun ölçülmesinin gerekli olduğu görülmüştür. Şekil 6'da görüldüğü gibi her bir model için referans alınacak derinlik ölçüleri belirlenerek, operatörden ilk jantın bu değerden ne kadar farklı olduğunu ölçmesi beklenmekte ve bu farkı ilgili kesici takıma sapma (offset) değeri olarak yansıtması istenmektedir.



Şekil 6. Referans olarak belirlenecek derinlik ölçüsü

2.2 İyileştirme Çalışmaları ve Sonuçlar

Mevcut durum incelemesinde belirlenen ve yukarıda detayları ile anlatılan 3 önemli girdi göz önüne alınarak tornalama işleminde meydana gelen jant firelerini azaltmak amacıyla göbek çekme değeri için yeniden üretilebilirlik ve tekrarlanabilirlik (Gage R&R) çalışması ve yeni bir CNC işleme programı oluşturulmuştur. Şekil 7, ölçme kalıbı ile tespit çalışması detaylarını göstermektedir.



Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,0004762	1,13
Repeatability	0,0002801	0,67
Reproducibility	0,0001961	0,47
Operatör	0,0001961	0,47
Part-To-Part	0,0415731	98,87
Total Variation	0,0420493	100,00

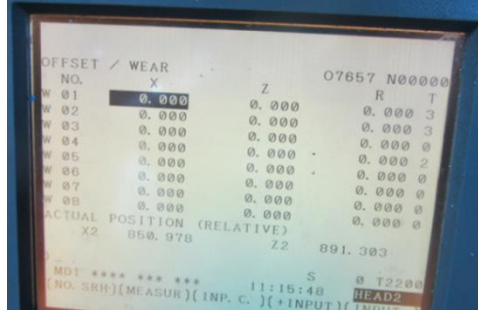
Gage R&R < %30
Ölçüm sisteminden kaynaklanan değişkenliğin Toplam değişkenliğe olan etkisi göz ardı edilebilir.

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0,021822	0,13093	10,64
Repeatability	0,016736	0,10041	8,16
Reproducibility	0,014004	0,08403	6,83
Operatör	0,014004	0,08403	6,83
Part-To-Part	0,203895	1,22337	99,43
Total Variation	0,205059	1,23036	100,00

Number of Distinct Categories = 13

Şekil 7. Ölçme kalıbı ile tespit çalışması

CMS-E jant modeli için yeni bir CNC işleme programı hazırlanmış ve ilk jant işlemeye alınmadan önce tüm kesici uçlar yenileri ile değiştirilmiştir. Ayrıca takım aşınması dikkate alınarak sapma (offset) değerleri için sıfırlamalar yapılmıştır. İşleme kesiti üzerinden, kapak derinliği için referans derinlik ölçüsü belirlenmiştir. Yarım olarak işlenen ilk jantın brüt kapak derinliği ölçüldü ve referans değere göre olan fark ilgili takıma offset değeri olarak yansıtılmıştır. Fotoğraf 1 yapılan çalışmalara ait detayları göstermektedir.



Fotoğraf 1. Uygulama çalışması detayları

Yapılan bu yeni düzenlemeler ile ayar değişimleri sonrasında işlenen ilk jantın ölçüsel olarak tolerans aralığında olduğu görülmüş ve geliştirilen prosedüre devam edilmiştir. Seri üretimden alınan verilerin güncel durumu Tablo 3'deki gibidir. Buna göre ayar fitesi oranı %1,1 değerinden %0,70'e çekilmiştir. Ayrıca ortalama ayar süreleri de CMS ref + 17,5 dakikadan ortalama olarak CMS ref + 4,2 dakikaya düşürülmüştür.

Yapılan çalışmalar ve önceki bölümlerde detaylı olarak bahsedilen dikkat edilmesi gereken unsurlar; 6 sigma projesinin gereği olarak, firma içi ilgili birimlere ve personele yaygınlaştırma süreci gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Seri üretimde, geliştirilen prosedürün uygulanması sonrası durum

	Oca.15	Şub.15	Mar.15	Nis.15	May.15	Haz.15	Ort.
Ort. Ayar süresi (dak.)*	3,6	4,5	4,3	4,3	4,4	4,1	4,2
Ayar firesi (adet)	205	248	225	232	297	286	1493
Ort. Ayar firesi	0,71	0,72	0,63	0,70	0,70	0,73	0,70

*CMS ref +: Firmamızda referans olarak belirlenen ayar süresi üzerine çıkılan miktarlar verilmiştir.

3. DEĞERLENDİRME

Talaşlı imalat işlemlerinde özellikle işleme öncesi model veya tip bazlı değişiklikler yapılması sırasında dikkat edilmesi gereken 2D işleme kesiti, kalıp komple resmi ve kontrol planı etkileşimi ve göbek çekme değeri olmak üzere 3 önemli girdi belirlenmiştir. Bu girdilerin kontrollerinin ve ayarlarının doğru yapılması durumunda tornalama işlemi sırasında meydana gelen veya gelebilecek olan firelerin sayılarının azaltılması sağlanabilecektir. Ayrıca talaşlı imalat operasyonlarında model bazlı ayar değişiklikleri işlemi sırasında yaşanacak zaman kayıplarının da önüne geçilmiş olacaktır. Böylece talaşlı imalat prosesinin proses verimliliğinin artırılması da dolaylı olarak sağlanmış olacaktır.

4. KAYNAKLAR

- [1] Timelli, G., Camicia, G., Ferraro, S., 2014, "Effect of Grain Refinement and Cooling Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Secondary Al-Si-Cu Alloys", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol: 23(2), P.611-621.
- [2] Büyükuncu, M.G., 2010, "Ötektik Altı Al-Si Döküm Alaşımlarında Bileşimin Optimizasyonu İle Döküm Kabiliyeti ve Mekanik Özelliklerin İyileştirilmesi", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [3] Özcömert, M., 2006, "Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum", İstanbul Ticaret Odası.
- [4] Alan, S., 2008, "Alüminyum Raporu", Orta Anadolu İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği.
- [5] Öztürk, M., 2005, Kullanılmış Alüminyum Malzemelerin Geri Kazanılması, Çevre Ve Orman Bakanlığı, Ankara.
- [6] Aybarç, U. (2014), Otomotiv Sektöründe Alüminyumu Önemi, Makine İhtisas, Sayı: 111, Sayfa: 44-50.
- [7] European Aluminium Association, 2008, Aluminium In Cars, www.alueurope.eu/pdf/Aluminium_in_cars_Sept2008.pdf (10.06.2015)

SERTLEŞTİRİLMİŞ RULMAN BİLEZİĞİNİN İŞLENMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KESME KUVVETİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

Mehmet Boy^a, İbrahim Çiftçi^b, Halil Demir^b ve Feridun Özhan^c

a, Karabük Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü Karabük/TÜRKİYE, mboy@karabuk.edu.tr

*b, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü, Karabük/TÜRKİYE, iciftci@karabuk.edu.tr
hdemir@karabuk.edu.tr*

c, Ortadoğu Rulman Sanayi A.Ş., Ankara/TÜRKİYE, plant@ors.com.tr.

Özet

İç rulman bileziklerinin yuvarlanma yolları çok sıkı tolerans ve yüzey kalitesi gerektirdiğinden genellikle taşlama yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Bununla birlikte, kesici takım ve takım tezgahlarındaki teknolojik gelişmeler sertleştirilmiş çelikleri taşlama işlemine gerek kalmadan doğrudan işlemeyi mümkün hale getirmiştir. Bu amaçla, sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğinden üretilen iç rulman bilezik yuvarlanma yolunun seramik ve kübik bor nitrür (CBN) kesici takımlarla işlenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Rulman iç bileziklerinin işlenmesinde oluşan kesme kuvvetleri piezoelektrik esaslı bir dinamometre kullanılarak ölçülmüştür. İç bilezik yuvarlanma yolunun seramik kesici takımlarla işlenmesinde oluşan kesme kuvvetlerinin CBN ile işlemede oluşan kesme kuvvetlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. CBN ve seramik ile işlemede en düşük yüzey pürüzlülük değerleri 0,04 mm/dev ilerleme miktarında elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: CBN kesici takım, kesme kuvveti, seramik kesici takım, sert tornalama, yüzey pürüzlülüğü

EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON CUTTING FORCE AND SURFACE ROUGHNESS IN THE MACHINING OF HARDENED BEARING RINGS

Abstract

As the inner bearing ring raceways require very tight tolerances and high surface quality, they are generally produced through the grinding method. However, recent technological developments in cutting tools and machine tools have made it possible to the directly produce hardened steels through hard turning. For this purpose, hardened AISI 52100 steel inner bearing ring raceways were hard turned using ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools. The influences of cutting parameters on cutting forces and surface roughness were investigated. The cutting forces developed when hard turning the inner bearing rings were measured using a piezoelectric dynamometer. The cutting forces obtained when machining hardened bearing rings with ceramic cutting tools were found to be higher than those with CBN cutting tools. The lower surface roughness values were obtained at 0.04 mm/rev feed rate when hard turning with CBN and ceramics.

Keywords: CBN cutting tool, cutting force, ceramic cutting tool, hard turning, surface roughness

1. GİRİŞ

Rulmanlar mekanik sistemlerin en önemli bileşenlerinden olup bu sistemlerin verimini önemli derecede etkilerler. Rulmanı oluşturan bileşenlerin uygun üretim yöntemleri ile üretilmesi gerekmektedir. İç ve dış bilezikler rulmanı oluşturan en önemli bileşenlerdendir. Rulmanların iç ve dış bilezikleri genel olarak yumuşak haldeki AISI 52100 rulman çeliğinden genellikle dövme, soğuk ovalama ve talaşlı imalat yöntemleriyle son şekline yakın geometride üretilirler. Daha sonra istenilen sertlik değerinin elde edilmesi için sertleştirme ve temperleme ısıl işlemleri uygulanır. Nihai geometrilerine ve yüzey kalitelerine taşlama ve süperfiniş yöntemleriyle getirilirler [1-3].

Rulman bilezikleri gibi yüksek boyutsal hassasiyet gerektiren sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde bu işlem sırası günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte sertleştirilmiş çeliklerin doğrudan tormalama (sert tormalama) ve frezeleme gibi talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi, kesici takımlar ve takım tezgahları alanında yapılan iyileştirmeler sonucu mümkün hale gelmiştir [4]. Son 25 yılda yapılan bilimsel araştırmalar ve teknolojik gelişmeler sonucu sertleştirilmiş çelikleri doğrudan tormalama ve frezeleme yöntemleriyle işleyebilecek kesici takımların geliştirilmesi bu malzemeleri taşlama işlemine gerek kalmadan şekillendirmeyi mümkün hale getirmiştir.

Sert tormalama yöntemiyle işlemenin geleneksel taşlama işlemine göre çok sayıda avantajı mevcuttur. Düşük üretim maliyeti, kısa üretim zamanı [5,6], yüksek miktarda talaş kaldırma kapasitesi, farklı geometrilerin tek bir kesici takımla oluşturulabilmesi [4,7], kesme sıvısının kullanımına çoğunlukla ihtiyaç olmaması [8,9] ve yüksek parça kalitesi [5,10-12] sert tormalama işleminin taşlama işlemine göre olan avantajlarındandır. Sert tormalama işleminde kullanılan talaş derinliği ve ilerlemenin geleneksel tormalamaya göre daha düşük olmasına rağmen taşlama işlemine göre % 60'a kadar işleme zamanını düşürdüğü ifade edilmektedir [13]. Sert tormalama işlemi, üretilen parça sayısının az olması durumunda daha da cazip olmaktadır [14]. Bunun nedenleri ise taşlama işleminde üretime başlamadan önce ayar zamanlarının uzun olması ve özel profilleri oluşturmak için özel taş geometrilerine ihtiyaç duyulmasıdır. Bununla birlikte, sert tormalama yöntemiyle üretilen parçaların yorulma dayanımlarının yüksek olması da yüksek sertlikteki çelik malzemeden üretim yapan imalatçıların ilgisini çekmektedir.

Sertleştirilmiş malzemelerin özellikleri nedeniyle kullanılan kesici takımların; yüksek sertlik, yüksek termal iletkenlik, yüksek aşınma direnci, fiziksel ve kimyasal kararlılık gibi gereksinimleri karşılaması gerekir. Sert tormalama ve frezeleme işlemleri için seramik ve kübik bor nitrür (CBN) en çok kullanılan kesici takım malzemeleridir [15]. CBN ve seramik uçlar, kesicilerin erken kırılmasını önlemek ve takımda güçlü bir kesici kenar oluşturmak için pah kırılarak ya da honlanarak üretilir [16-18]. Kesici takımlardaki kesici kenar durumu; deformasyon bölgesinin şeklini, kesme sırasındaki sıcaklık dağılımını, kesme kuvvetlerini, kesme sırasındaki gerilme dağılımını etkilemekte, bu etkiler de tormalamada talaş oluşumunu, talaş akışını, iş parçasının yüzey bütünlüğünü ve pürüzlülüğünü ve kesici takım aşınmasını etkilemektedir [19,20].

Kesme kuvvetleri, kesici takım geometrisi, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği ile yakından ilgili olup bunlardan büyük oranda etkilenmektedir. Bu konuda pek çok araştırmacı çeşitli istatistiksel ve deneysel yaklaşımlarda bulunmaktadır. Kesme kuvveti üzerine yapılan araştırmaların yoğunlaşmasının sebebi, kesme kuvvetinin, kesme esnasında oluşan ısıyı ve ısıya bağlı takım aşınmasını, iş parçasının yüzeyini ve işleme tamlığını doğrudan belirlemesidir. Kesme kuvvetlerinin artması takım hareketindeki tamlığın azalmasına ve dolayısıyla iş parçası ölçülerinin istenilenin dışına çıkmasına neden olur. Ayrıca, kesme kuvvetlerinin artması ince cidarlı parçaların bağlama sistemlerinde bir miktar yer değiştirmesine neden olmaktadır. Bu durum iş parçalarının bağlanmasında daha fazla sıkma kuvveti gerektirmektedir bu da ince cidarlı parçalarda ölçü hatalarına neden olmaktadır [21].

Talaşlı imalat yöntemi ile üretilen makine parçalarının düşük maliyetli, istenilen ölçü ve yüzey kalitesinde olması istenir. Yüzey pürüzlülüğü yüzey kalitesini belirleyen bir parametredir. Yüzey pürüzlülüğü sadece aşınma, sürtünme ve yağlama gibi tribolojinin geleneksel konularında değil aynı zamanda sızdırmazlık ve hidrodinamik gibi farklı alanlarda da dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Genellikle yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler, takım tezgahlarının yeterli rijitlikte olmaması, tezgahın kinematik mekanizması ve yataklama sistemi, kesici takım ve takım tutucunun rijit olmaması, takım konumlama ve

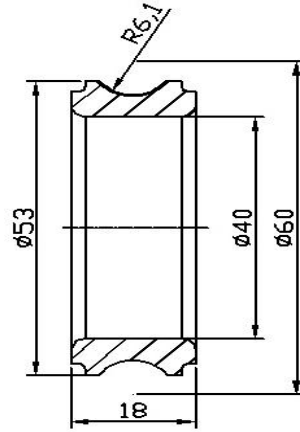
bağlama sistemi, takım aşınması ve ortamın etkisi ile oluşan hatalar biçiminde ifade edilebilir. İşleme yöntemi ve parametreleri de, işlenmiş yüzeylerin tribolojik özelliklerini ve yüzey dokusunu birinci derecede etkilemektedir [21-24].

Bu çalışmada; sertleştirilmiş ve temperlenmiş AISI 52100 çeliğinden üretilen iç rulman bileziğinin yuvarlanma yolu seramik ve CBN kesici takımlarla belirlenen üç farklı kesme hızı ve ilerleme miktarlarında işlenmiş ve kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. İş parçası malzemesi

Deneylerde AISI 52100 rulman çeliğinden üretilmiş 60 ± 2 HRC sertliğinde iç rulman bilezikleri kullanılmıştır. Sert tornalama deneylerinde kullanılan rulman iç bilezikleri sıcak dövme, küreselleştirme ısıl işlemi, soğuk ovalama, yumuşak tornalama, ısıl işlem ve alın taşlama işlemlerinden sonra sert tornalamaya uygun ölçü ve toleranslara getirilmiştir. Sert tornalama deneylerinde kullanılan rulman iç bilezik numunelerinin resmi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İç rulman bileziği

2.2. Kesici takım ve takım tutucu

Rulman iç bileziklerinin yuvarlanma yollarının sert tornalanmasında Sandvik Coromant tarafından üretilmiş ticari kaplamalı CBN kesici uçlar kullanılmıştır. CBN kesici uçlar DCGW11T304 S01020 geometrisinde, CB7015 Sandvik kalitesinde (ISO H15), düşük CBN içeriğine ve pah + honlanmış kesici kenar geometrisine sahiptir. İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesinde CBN kesici takımları bağlamak için SDNCN 2020K 11 ISO kodlu dış çap kateri kullanılmıştır.

Deneylerde Kyocera firması tarafından üretilen A66N ticari kalitesinde seramik kesici uçlar kullanılmıştır. Seramik uçlar DNGA 150604 S1525 geometrisinde olup pah ve honlanmış kesici kenar geometrisine sahiptir. Seramik uçları bağlamak için DDJNR 2020 K15 ISO kodlu dış çap kateri kullanılmıştır.

2.3. Takım tezgahı

Talaş kaldırma deneyleri Muratec MW120 marka çift iş milli sanayi tipi CNC torna tezgahında yapılmıştır.

2.4. Kesme kuvvetlerinin ölçülmesi

Deneysel çalışmalarda kesme kuvvetlerinin ölçülmesi için üç kesme kuvveti bileşenini (F_c , F_f , ve F_p) eş zamanlı olarak ölçme kapasitesine sahip piezoelektrik prensiplere göre dinamik kuvvet değişimlerini ölçebilecek KISTLER 9121 tipi bir dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre ile birlikte, ölçülen değerlerini kaydedebilmek için bir A/D veri toplama kartı ve yazılımı, bunlarla birlikte bir de 5070 A tipi amplifikatör kullanılmıştır. Ölçüm değerleri, Kistler Dynoware 2.5.3.8 yazılımı kullanılarak gerçek zamanlı olarak bilgisayar ortamında görülebilmektedir. Yazılım sayesinde, kuvvet ölçüm değerleri grafiksel ve nümerik olarak kaydedilebilmektedir.

2.5. Yüzey pürüzlülük ölçümü

CBN ve seramik kesici takımlarla sert tormalanan rulman iç bileziklerinin yuvarlanma yollarının işlenmesinden sonra oluşan yüzey pürüzlülükleri Form Talysurf PGI+ form ve pürüzlülük ölçme cihazı ile ölçülmüştür.

2.6. Kesme parametreleri

Rulman iç bileziklerinin sert tormalamasında kullanılacak kesme parametrelerini belirlemek için farklı kesme parametrelerinde ön deneyler yapılmıştır. Yapılan ön deney sonuçları ve kesici takım firmalarının tavsiyeleri dikkate alınarak CBN ve seramik kesici takımlar için üç farklı kesme hızı ve ilerleme miktarı belirlenmiş ve belirlenen parametreleri Çizelge 2’de gösterilmiştir. Deneylerde kesme sıvısı da kullanılmıştır.

Çizelge 2. CBN ve seramik kesici takımlar için kesme parametreleri

Sıra No	CBN		Seramik	
	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev)	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme (mm/dev)
1	120	0,04	100	0,04
2	120	0,06	100	0,06
3	120	0,08	100	0,08
4	140	0,04	120	0,04
5	140	0,06	120	0,06
6	140	0,08	120	0,08
7	160	0,04	140	0,04
8	160	0,06	140	0,06
9	160	0,08	140	0,08

2.7. Deney setinin oluşturulması

Kurulan sistemin esası, rulman iç bileziklerinin hassas bir şekilde bağlanarak bileziklerin yuvarlanma yollarını sert tormalama yöntemi ile işlenmesine ve işleme sırasında kesici takımda oluşan kuvvetlerin ölçülmesine dayanmaktadır. Rulman iç bileziklerinin hassas şekilde bağlanabilmesi için çift iş milli CNC tezgah kullanılmıştır. Rulman bileziklerini bağlanmasında sağ ve sol iş milleri için özel olarak imalatı yapılmış özel pensli aynalar kullanılmıştır. Bileziklerde salgı hassasiyeti çok önemli olduğundan aynaların salgısı minimum seviyeye indirilmiştir. Rulman bilezikleri ince cidarlı olduklarından sıkma esnasında ölçü ve tolerans hatalarına neden olmamak için ayna sıkma basıncı 5 bar olacak şekilde ayarlanmıştır.

Rulman iç bileziğinin işlenmesinde, bilezik otomatik bir robot kol yardımı ile sağ aynadaki pense dıştan sıkacak şekilde bağlanmış ve iç çap tormalaması yapılmıştır. İç çap tormalama işleminden sonra parça otomatik bir robot kolu yardımı ile sol aynadaki pense bağlanarak işlenmiş olan iç çaptan bağlanmış ve rulman iç bileziğinin yuvarlanma yolu işlenmiştir.

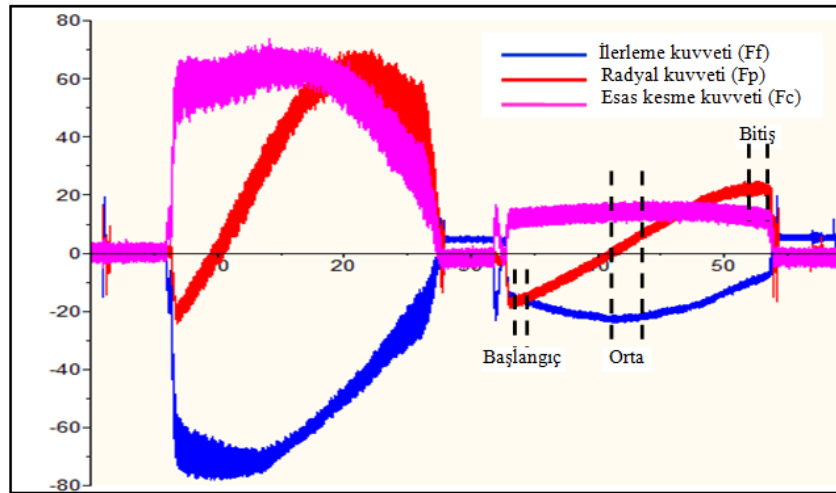
Kesme kuvveti ölçümlerinde, CNC tezgahın sol taretine dinamometre monte edilmiş ve dinamometrenin amplifikatör, amplifikatörün bilgisayar ile bağlantısı yapılmıştır. Bilgisayarda bulunan Dynoware yazılımı ile

kuvvet ölçümleri yapılmış her bir parametre için kayıtlar alınmıştır. Deneilerin tümünde aynı şartları oluşturmak için her bir deney sonrası tezgah durdurularak, kesme hızı, ilerleme ve kullanılan kesici takımın kesici kenarı değiştirilmiş ve deneylerde aynı işlemler tekrarlanarak deneyler tamamlanmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

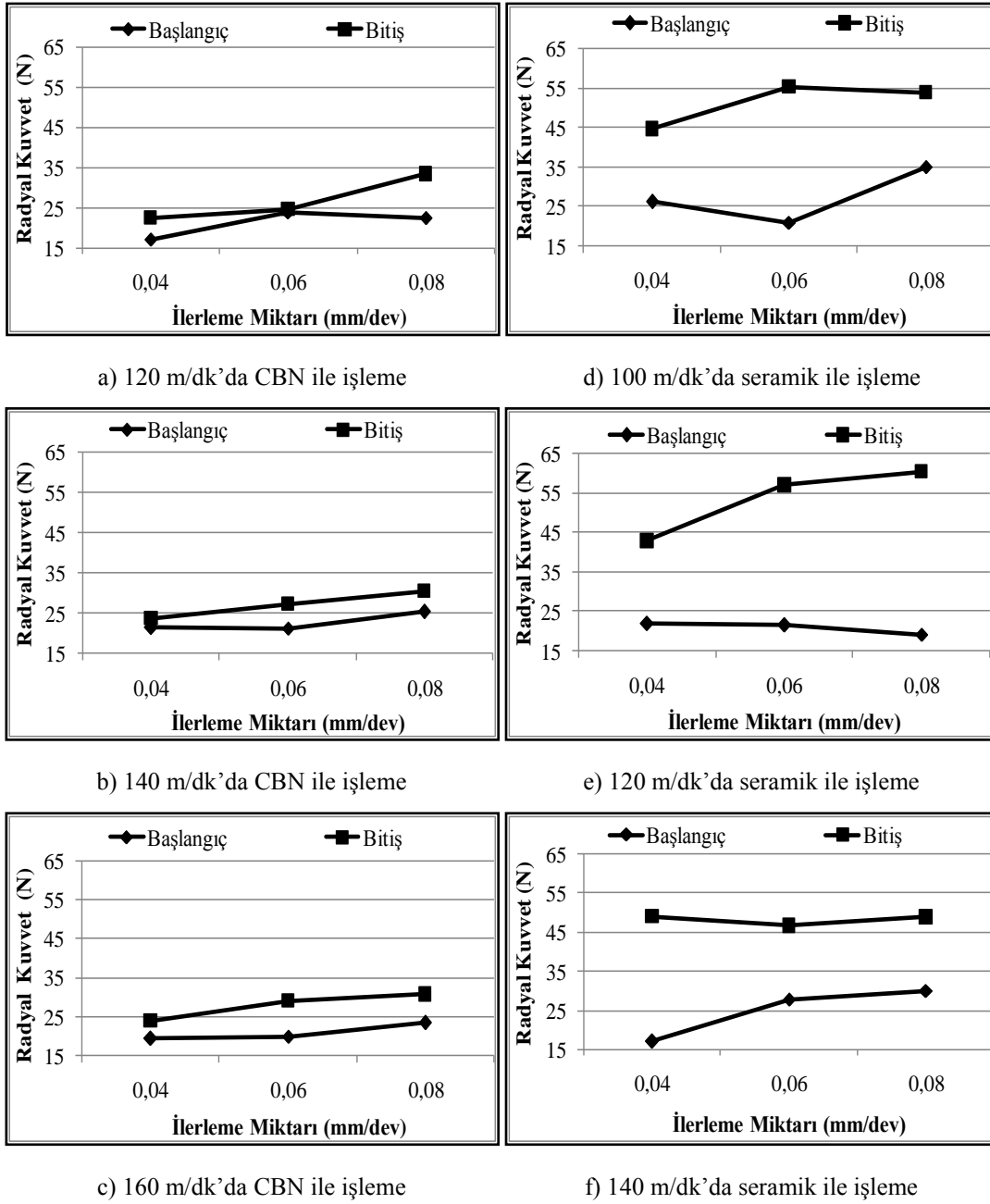
3.1. İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesinde oluşan kesme kuvvetleri

İç bilezik yuvarlanma yolunun CBN ile işlenmesinde 120, 140 ve 160 m/dk, seramik kesici takımlarla işlenmesinde 100, 120 ve 140 m/dk kesme hızları ve her iki kesici takım için üç farklı ilerleme miktarı (0,04, 0,06 ve 0,08 mm/dev) kullanılmıştır. Belirtilen kesme parametreleriyle işlemede oluşan kuvvetler ölçülmüştür. İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesi 2 pasoda gerçekleştirilmiş olup 1. pasoda 0,2 mm ve 2. pasoda 0,1 mm kesme derinliği kullanılmıştır. 1. pasoda oluşan kuvvetlerle 2. pasoda oluşan kuvvetlerde benzer eğilimler görülmüştür. 2. pasoda kesme derinliğinin düşük ve son işleme yüzeyi olması nedeniyle elde edilen yüzey pürüzlülüğünün rulman için önemli olmasından dolayı işleme sırasında oluşan kuvvetlerin değerlendirilmesinde 2. pasoda oluşan kuvvetler dikkate alınmıştır. Yuvarlanma yolunun işlenmesinde oluşan radyal kuvvetler, yuvarlanma yolu formunun başlangıç ve bitiş yerlerinde oluşan kuvvet değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir. İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesi sırasında oluşan kuvvet grafikleri literatürde belirtilen dış çap işleme grafiklerine göre farklılık arz etmektedir. Bu durum yuvarlanma yolunun belirli bir formda olmasından kaynaklanmaktadır. Yuvarlanma yolu işlenirken takımın ilerlemesiyle kesici takımın temas noktası değişkenlik göstermekte bu da talaş kesit alanlarının değişmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla oluşan kuvvetler formun başlangıç noktasında eksi yönde iken formun bitiş noktasında artı yönde olmaktadır (Şekil 2). CBN ve seramik kesici takımla işlemede oluşan kuvvetler birbirleri ile benzer eğilimler göstermiştir.



Şekil 2. İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesinde oluşan kuvvetlerin zamana göre değişimi.

İç bilezik yuvarlanma yolunun CBN ve seramik kesici takımlarla işlenmesinde elde edilen radyal kuvvetlerin kesme hızına göre değişimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi ilerleme miktarının artması ile birlikte yuvarlanma yolu formunun başlangıç ve bitiş noktalarında radyal kuvvetlerde bir artış gözlenmektedir. Yuvarlanma yolu formunun başladığı nokta ile bittiği noktada oluşan radyal kuvvetlerde farklılık görülmektedir. Yuvarlanma yolunun bitiş noktasında oluşan radyal kuvvetlerin başlangıçtan daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum başlangıç ve bitiş noktasında oluşan talaş kesit alanlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda kesici takımın ilerlemesi ile birlikte yuvarlanma yolu formundan dolayı kesici kenarın iş parçası ile temas bölgesinde de değişimler görülmektedir.

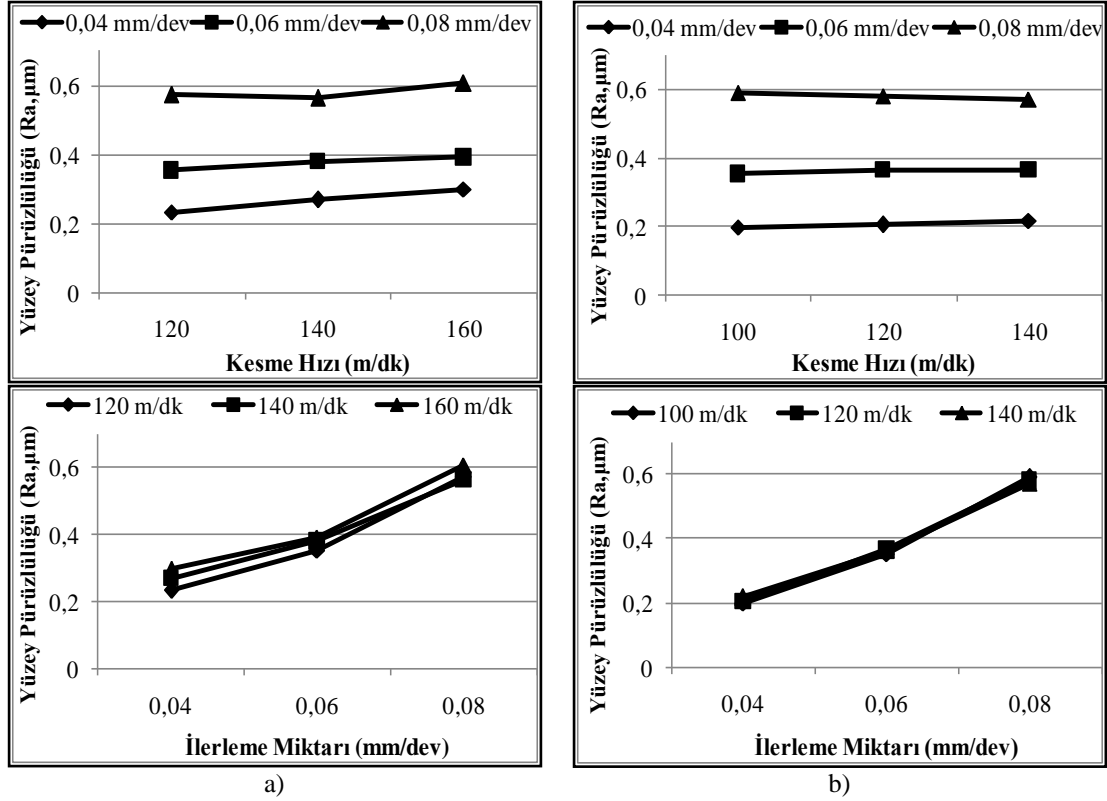


Şekil 3. İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesinde oluşan radyal kuvvetlerin ilerleme miktarına göre değişimi.

Yuvarlanma yolunun seramik kesici takım ile işlenmesinde oluşan radyal kuvvetler CBN ile işlemede oluşan kuvvetlerle aynı eğilimi göstermiştir. Seramik kesici takım ile işlemede oluşan radyal kuvvetlerin CBN ile işlemede oluşan radyal kuvvetlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum her iki kesici takımın farklı kesici kenar geometrisine sahip olmalarıyla açıklanabilir. Seramik kesici takım kesici kenar pah açısı CBN kesici takımından daha fazladır. İlerleme miktarının artması ile birlikte talaş kesit alanı artmakta bu da radyal kuvvetlerin artmasına neden olmaktadır. Talaş kaldırma işlemlerinde ilerleme miktarının artması ile ilerleme kuvvetlerinde bir artış beklenir ancak burada kesme derinliğinin az olması nedeniyle talaş oluşumu kesici takımın uç noktasında oluşmakta ve bu da radyal kuvvetlerin artmasına neden olmaktadır. Talaş derinliğinin düşük olmasından dolayı kesici takım yavaşlama açısı ve arka kesme kenar açısı değişmekte bu da kesici takımın uç kısmındaki gerilmeyi arttırmakta ve dolayısıyla radyal kuvvetlerin artmasına neden olmaktadır [25]. Sert tornalamada radyal kuvvetin esas kesme kuvvetinden daha yüksek çıkması sert tornalama ile geleneksel tornalamayı birbirinden ayıran önemli özelliklerden biri olduğu kabul edilmektedir [15,25].

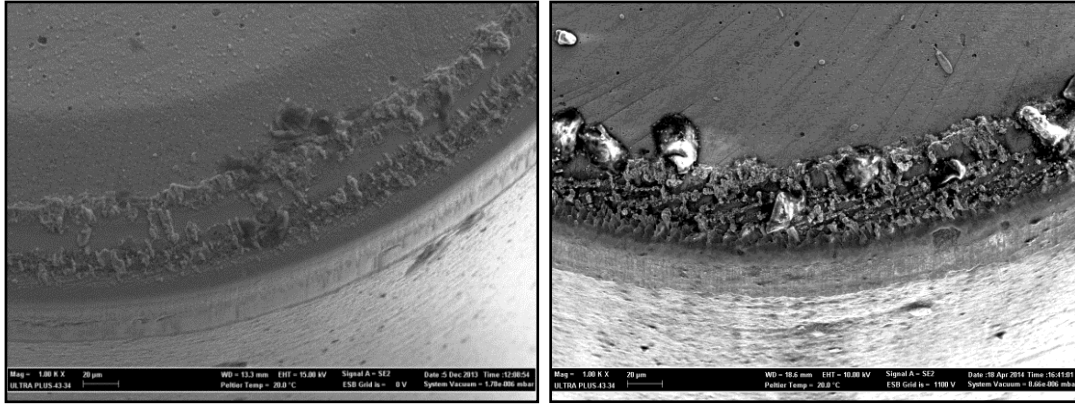
3.2. İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesinde oluşan yüzey pürüzlülükleri

İç bilezik yuvarlanma yolunun seramik ve CBN kesici takım ile işlenmesinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin kesme hızına ve ilerleme miktarına göre değişimleri Şekil 4'te gösterilmiştir. İlerleme miktarının 0,06 mm/dev'e çıkarılması ile yuvarlanma yolu Ra değerleri artmıştır ve çoğunlukla 0,6 µm'nin altında değerler elde edilmiştir. 0,08 mm/dev ilerleme miktarında ise 0,6 µm'den daha yüksek değerler elde edilmiştir. CBN ile işlemede en düşük yuvarlanma yolu Ra değerleri 120 m/dk kesme hızı ve 0,04 mm/dev ilerleme miktarında elde edilmiştir. Deney yapılan bütün ilerleme miktarlarında kesme hızının artması ile Ra değerleri artmıştır. Normal olarak kesme hızının artışı ile bir miktar Ra değerlerinin düşmesi beklenir. Bu beklenmeyen artış yuvarlanma yolunun işlenmesindeki değişken talaş kesitine atfedilebilir. Aynı zamanda takım tezgahı iş milinde yüksek kesme hızlarındaki muhtemel titreşim artışları ile de açıklanabilir.



Şekil 4. İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesinde oluşan yüzey pürüzlülükleri a) CBN, b) seramik.

Yuvarlanma yolu için elde edilen yüksek yüzey pürüzlülük değerleri kullanılan kesici takım üzerindeki yan yüzey aşınma bölgelerine yapışan iş parçası malzemesi ile açıklanabilir. Yan yüzey aşınma bölgelerine yapışan iş parçası malzemesini Şekil 5'teki SEM fotoğraflarından görülebilir. SEM fotoğrafları yuvarlanma yolunu sert tormalanmasında kesici takımların aşınmış bölgelerine yapışan iş parçası malzemelerini göstermektedir. Sert tormalama esnasında kesici takımın aşınmış bölgelerine yapışan iş parçası malzemeleri yeni oluşan yüzeyle daha çok temas etme eğilimindedir. Bu durum da yüzey pürüzlülüğünü artırır.



(a)

(b)

Şekil 5. İç bilezik yuvarlanma yolunun 0,04 mm/dev ilerleme miktarında işlenmesinde oluşan aşınmaların SEM görüntüsü (1000X), a) CBN, b) seramik

İç bilezik yuvarlanma yolunun seramik kesici takımla işlenmesinde, kesme hızının artması birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli artış ya da azalma görülmemiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri birbirlerine çok yakın değerlerdedir. En düşük yüzey pürüzlülük değerleri 0,04 mm/dev ilerleme miktarında elde edilmiş olup tüm kesme hızları için ideal bir ilerleme hızıdır. Her iki kesici takım malzemesi ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri taşlama sonrası istenilen pürüzlülük değerinden düşüktür. Sadece CBN ile 0,08 mm/dev ilerleme miktarında işlemede elde edilen pürüzlülük değeri istenilen değerin üzerindedir.

4. SONUÇLAR

Sertleştirilmiş rulman iç bileziklerinin seramik ve CBN kesici takımlar ile işlenmesinde kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü belirlemek amacı ile yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesinde oluşan kuvvet bileşenlerinin düz bir yüzeyin işlenmesinde oluşan kuvvet bileşenlerinden farklı olduğu ve bu farklılığın da yuvarlanma yolunun işlenmesi esnasında yuvarlanma yolu formundan dolayı kaldırılan talaş kesitinin değişmesi sonucu ortaya çıktığı görülmüştür.
- İç bilezik yuvarlanma yolunun işlenmesinde CBN ve seramik kesici takımlarla işlenmesinde oluşan kesme kuvvetleri birbirleri ile paralellik arz etmiştir.
- İç bilezik yuvarlanma yolunun 120 m/dk kesme hızında 0,04 mm/dev ilerleme miktarında CBN ile işlenmesinde en düşük yüzey pürüzlülük değerleri elde edilirken seramik ile 100 m/dk kesme hızında 0,04 mm/dev ilerleme miktarında elde edilmiştir.
- Her iki kesici takım malzemesi ile taşlama sonrası istenilen pürüzlülük değerlerinden düşük pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde finansman desteği sağlayan T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Sanayi Tezleri Programı (SAN-TEZ) birimine (Proje no: 00980.STZ.2011-2) ve Ortadoğu Rulman Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Küçükyılmaz, A. 2010. "Experimental investigation of residual stresses introduced via shot peening and their effect on fatigue life of ball bearings", Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
2. Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A.Ş. 2014. "Rulman Nedir?", <http://www.ors.com.tr/index.php/page,5,urunler>

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

3. Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A.Ş., 2014. “Rulman Üretimi”, <http://www.ors.com.tr/index.php/page.6.uretim>
4. Zhou, J.M., Walter, H., Andersson, M., Stahl, J.E. 2003. “Effect of chamfer angle on wear of PCBN cutting tool”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 43, Pages 301–305
5. Grzesik, W., Rech, J. Wanat, T. 2007. “Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools” *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 47, Pages 255–262
6. Zhou, J.M., Andersson, M., Stahl, J.E. 2004. “Identification of cutting errors in precision hard turning process”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 153–154, Pages 746–750
7. Tönshoff, H.K., Arendt, C., Ben Amor R. 2000. “Cutting of Hardened Steel”, *Annals of the CIRP* Volume 49, Pages 547-566
8. Huang, Y., Chou, Y.K., Liang, S.Y. 2007. “CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 35, Pages 443–453
9. Sood, R., Guo, C., Malkin, S. 2000. “Turning of hardened steels”, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 2, Issue 3, Pages 187-193
10. Klocke, F., Brinksmeier, E., Weinert, K. 2005. “Capability profile of hard cutting and grinding processes”, *Annals of the CIRP*, Volume 54, Pages 22-45
11. Abrao, A.M., Aspinwall, D.K. 1996. “The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel”, *Wear*, Volume 196, Pages 279–284
12. Smith, S., Melkote, N., Lara-Curzio, E., Watkins, T.R., Allard, L. and Riester, L. 2007. “Effect of surface integrity of hard turned AISI 52100 steel on fatigue performance”, *Materials Science and Engineering A*, Volume 459, Pages 337–346
13. Kalpakjian, S. 1991. “Manufacturing process for engineering materials”, Addison-Wesley, New York
14. Matsumoto, Y., Hashimoto, F., Lahoti, G. 1999. “Surface integrity generated by precision hard turning”, *Annals of the CIRP*, Volume 48, Pages 59-62
15. Davim, J. P., 2011. “Machining of hard materials - definitions and industrial applications”, *Machining of Hard Materials*, Springer, London
16. Bartarya, G. and Choudhury, S.K. 2012. “State of the art in hard turning”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Volume 53, Pages 1–14
17. Thiele, J. D. and Melkote, S.N. 1999. “Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 94, Issue 2-3, Pages 216–226
18. Rodriguez, C.J.C. 2009. “Cutting edge preparation of precision of cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing”, Kassel University Press, Kassel
19. König, W., Komanduri, R., Tönshoff, H. K. and Ackershott, G. 1990. “Machining of hard materials”, *Annals of the CIRP*, Volume 39, Pages 417-427
20. Choi, Y. 2010. “Influence of tool flank wear on performance of finish hard machined surfaces in rolling contact”, *International Journal of Fatigue*, Volume 32, Pages 390–397.
21. Yücel, E., Günay M. 2012. “Yüksek alaşımli beyaz dökme demirlerin (Ni-Hard) tornalanmasında kesme kuvvetinin modellenmesi, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Ankara, Türkiye.
22. Güllü, A., Özdemir, A., Demir, H. 2003. “Yüzey pürüzlülüğü ölçme yöntemleri ve mukayesesi”, *Teknoloji*, Cilt 6, Sayı 1-2, s. 79-92.
23. Griffiths, B.J. 2001. *Manufacturing surface technology*, in: *Surface Integrity and Functional Performance*, Penton Press. London.
24. Çakır, M. C., Ensarioğlu, C., Demirayak İ. 2009. “Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, Pages 102-109
25. Sadik, M.I. 2012. “Wear development and cutting forces on CBN cutting tool in hard part turning of different hardened steels”, *Procedia CIRP*, Volume 1, Pages 232–237

A7075-T651 ALAŞIMININ SÜRTÜNME Lİ DELİNME SİNDE ÖN DELİK DERİNLİĞİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Zülküf DEMİR^a

a, Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Batman/TÜRKİYE, zulkuff75@gmail.com, zulkuf.demir@batman.edu.tr

Özet

Sürtünmeli delme, ince cidarlı metallerde, işlemd e elde edilen ve üzerinde çatlak sayısı az olan kovan yardımıyla, bağlantı uzunluğunu ve mukavemetini artıran bir yöntemdir. Bu çalışmamızda kalınlığı 6 mm ve gevrek olan A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delinmesinde kovan biçimini iyileştirmek ve kovandaki çatlak sayısını azaltmak amacıyla 2 mm çapında 1, 2, 3 ve 4 mm derinliklerde ön delikler delindikten sonra çapı 8 mm olan HSS takımlar ile sürtünmeli delinmiştir. İşlemd e yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık ve kovan biçimleri araştırılmış ve ön-deliksiz sürtünmeli delme ile karşılaştırılmıştır. Ön-delikli işlemd e başlangıç deformasyonun azaldığı, ısı oluşumunun düzenli olduğu, yüzey kalitesinin iyileştiği ve kovandaki çatlak sayısını azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Sürtünmeli delme, Ön-delme derinliği, Yüzey pürüzlülüğü, Kovan biçimi

INVESTIGATE THE EFFECT OF DEPTH OF PRE-DRILLING IN FRICTION DRILLING OF A7075-T651 ALLOY

Abstract

The clamp load and threading strength increased by virtue of bushing shape, achieving from friction drilling of sheet metals. In this study, samples were pre-drilled traditionally 2 mm in diameter and 1, 2, 3, 4 mm in thicknesses before friction drilling applied to A7075-T651 alloy with 6 mm in thickness by using 8 mm in diameter HSS tools, because of decreasing cracks and improve bushing shape. Surface roughness, temperature and bushing shapes in pre-drilled and without pre-drilled processes compared. It was investigated that the initial deformation decreased, heat generated regularly, surface quality improved and the number of cracks decreased.

Keywords : Friction drilling, Pre-drilling depth, surface roughness, temperature, bushing shape

1. GİRİŞ

Sürtünmeli delme, takım ile iş parçasının birbirine sürtünmesiyle oluşan ısının etkisiyle yumuşamış iş parçasına takımın dalması şeklinde meydana gelen, talaşsız, temiz ve geleneksel olmayan, bir delme yöntemidir. Bu imalat yönteminin amacı, ince cidarlı malzemelerde kovan yardımıyla bağlantı uzunluğunun artırılmasıdır. [1].

Sürtünmeli delmede oluşan maksimum ısı miktarı yaklaşık olarak, iş parçasının ergime sıcaklığının $\frac{1}{3} - \frac{2}{3}$ katı

arasında olmaktadır. Malzeme kalınlığının delik çapına ($\frac{t}{d}$) oranı arttıkça kovanın oluşumunu sağlayan

malzeme miktarı artar [1]. Artan dönme hızı ile kovanın biçimi bozulur, iş parçasının yüzey sıcaklığı artar, fakat dönme hızı kovan oluşumunu etkilemez [2, 3]. Artan ilerleme ile işlem süresi azalır, eksensel itme kuvveti, dönme momenti, harcanan güç miktarı artar. İlerlemenin çok yüksek olması durumunda yetersiz, çok düşük olması durumunda ise gereğinden yüksek miktarda ısı oluştuğundan ilerlemenin çok yüksek ve çok düşük olması istenmez [3, 4]. Sürtünmeli delme işleminde oluşan kovanın yüksekliği, iş parçası kalınlığının yaklaşık olarak 3 katı kadardır [5, 6].

Sürtünmeli delmede dönme momenti, takım-iş parçası yüzey temas alanının artışı ile artar. Yüzey temas alanı, takımın uç, silindirik, omuz ve konik bölgelerinin toplam yüzey temas alanlarından oluşmaktadır [7, 8]. İşlem sırasında meydana gelen itme kuvveti ve dönme momenti arasındaki ilişki, iş parçasının gerilme dayanımına bağlı olarak oluşan ısı miktarı modellenerek tespit edilmiştir. Gerilme dayanımı yüksek malzemelerin sürtünmeli delinmesinde oluşan itme kuvveti yüksek olur [9]. İtme kuvvetinin değeri, takım ucunun iş parçasına teması ile hızlı bir şekilde yükselir ve maksimum değerine ulaşır, işlemin tamamlanması ile bu değer sıfır olur [10]. Takım ile iş parçası arasındaki sürtünme sonucu oluşan ısı ile iş parçası yumuşar, sünekliği ve akıcılığı artar [11-13].

Gevrek malzemelere, ön-ısıtıldıktan sonra, uygulanan sürtünmeli delmede oluşan kovanın biçimindeki çatlak sayısı azalır, taç yaprağı biçiminde oluşumu önlenir ve kovanın silindirikliği artar [14]. Ön delinmiş gevrek malzemelerin sürtünmeli delinmesinde başlangıç deformasyonu azalır ve uygun ergime sıcaklığı oluşur, ancak ön-delme, sürtünmeyi sağlayan malzeme miktarını azalttığından sürtünme ısısında azalmaya neden olur. Sürtünme ısısındaki bu azalma, sürtünmeli delme işleminde, yüksek dönme hızları seçilerek telafi edilebilir [15].

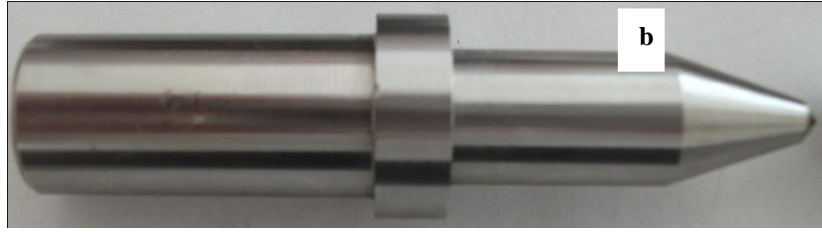
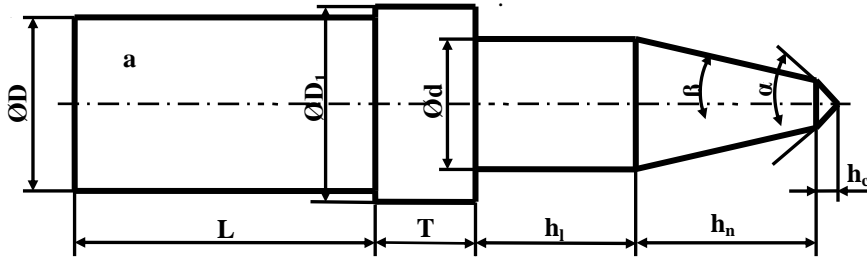
Bu çalışmada, literatür çalışmalarından farklı olarak ön-delme derinliğinin işlemde oluşan ısı miktarı, yüzey pürüzlülüğü ve kovan biçimine olan etkisi incelenmiştir. İş parçasına, kalınlığı boyunca delinmek suretiyle, uygulanan ön-delikli sürtünmeli delme işleminde kovanın silindirikliği artmış ve başlangıç deformasyonu azalmıştır [15]. Bu çalışmada ise iş parçasının kalınlığı boyunca delinmiş ön-delikler yerine kovan oluşumunu sağlayan malzeme miktarındaki azalmayı önlemek amacıyla iş parçasına farklı derinliklerde ön-delikler delindikten sonra sürtünmeli delme işlemi uygulanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Şekil 1’de deneyler gerçekleştirildiği HESSAP True-Trace C – 360/3D 1095 Model Kopya Freze tezgâhının ve deney düzeneğinin resmi gösterilmiştir. Deneysel çalışmada, cidar kalınlığı 6X70X500 mm ebatlarında, 2 mm çapında, 0, 1, 2, 3, 4 ve 6 mm derinliklerinde ön-delinerek hazırlanmış A7075-T651 alaşımı numuneler kullanılmıştır. Numuneler, standart takım tutucuya bağlanmış, silindirik bölge uzunluğu (h_1) 16 mm, çapı (d) 8 mm, uç açısı (α) 90° ve koniklik açısı (β) 36° olan Yüksek Hız Çeliği (HSS) takımlar kullanılarak sürtünmeli delinmiştir. Şekil HSS takımın geometrik boyutlarını belirten resim (a) ve fotoğrafı (b) gösterilmiştir. Çalışmada 1800, 2400 ve 3000 dev/dak dönme hızları, 40, 60 ve 80 mm/dak ilerleme hızları seçilmiştir.



Şekil 1. Deney Düzenğinde kullanılan konik takım, ısıölçer ucu, iş parçası ve bağlama aparatı



Şekil 2. Çalışmada kullanılan konik takımın geometrik ölçüleri (a) ve fotoğrafı (b).

Şekil 2 a’da takım sapının çapı ØD ve uzunluğu L , takım omzunun çapı ØD ve omuz kalınlığını T , takımın silindirik bölge çapı Ød ve uzunluğu h_i , takım konik bölgenin uzunluğu h_n ve eğim açısı β , takım ucunun uzunluğu h_c ve uç açısı ise α ile gösterilmiştir. Deneysel çalışma sırasında, takım ucunun iş parçasına temas ettiği andan kovan oluşumu tamamlanıncaya kadar olan sürede oluşan sıcaklık, çapı 2 mm olan ısıölçer uçlar yardımıyla ölçülmüştür. Ölçme sırasında ısıölçerin ucunun yerleştirildiği deliğin merkezi ile sürtünmeli delinen deliklerin merkezi arasındaki mesafe 8 mm olarak ayarlanmıştır. Sıcaklık değerleri, birer saniye aralıklarla ölçülmüş ve sonuçlar Dali Isıölçer Data Loger yardımıyla bilgisayarda kaydedilmiştir. Bu değerler arasında en yüksek olan değerler alınmış ve grafiklerde kullanılmıştır. Sürtünmeli delinmiş deliklerin yüzey pürüzlülükleri, Taylor Hubson Surtronik 3+ marka yüzey pürüzlülük cihazı ile 0.80 cm mesafede ölçülmüştür.

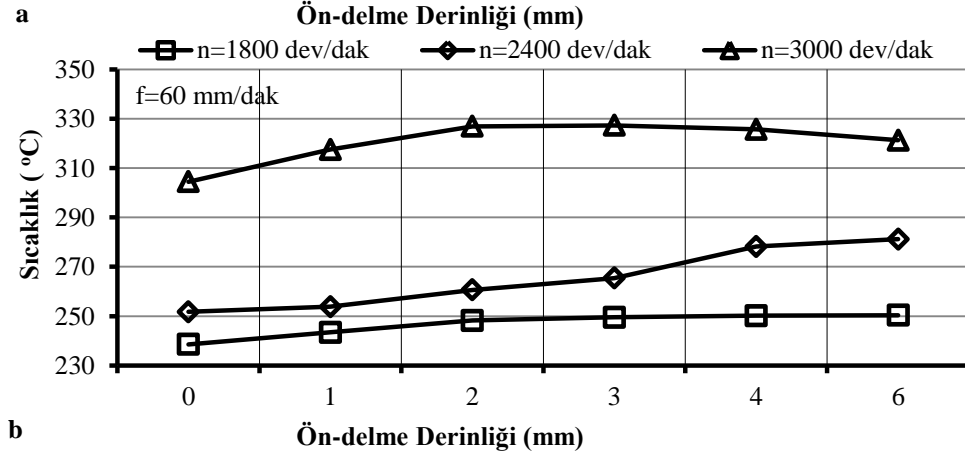
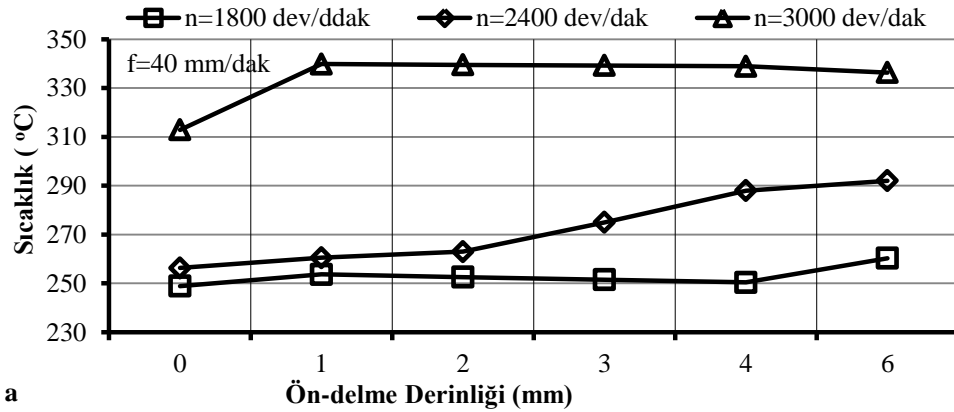
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

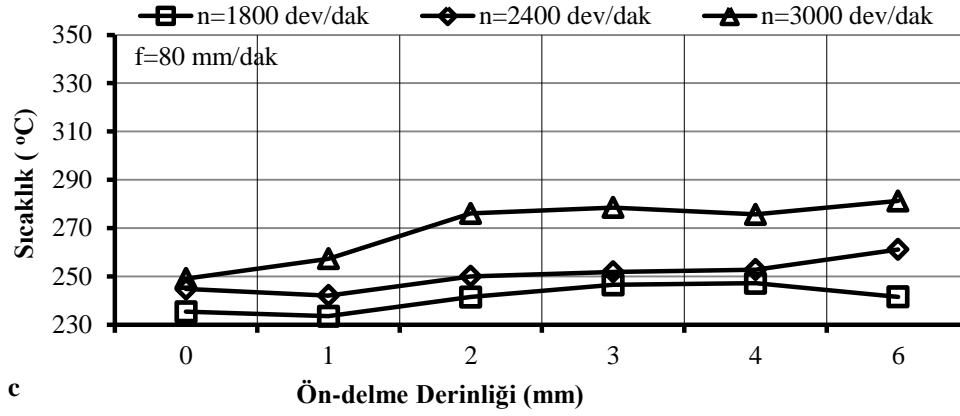
Bu deneysel çalışmada 6 mm cidar kalınlığına sahip A7075-T651 alaşımının sürtünmeli delme işlemi sırasında ön-delik derinliğinin, dönme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak, oluşan sıcaklık, yüzey pürüzlülüğü ve kovan biçimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

3.1. Ön-delik Derinliğinin Sıcaklığa Etkisi

Sıcaklık, sürtünmeli delme işleminde iş parçasının yumuşamasını ve yumuşamış malzemeye takımın dalması şeklinde delik delme işlemini gerçekleştirdiğinden, dönme hızı, ilerleme gibi parametreler tarafından etkilenen, işlemin en önemli sonuçlarından biridir. Bu nedenle sürtünmeli delme işleminde sıcaklığın ölçülmesi ve incelenmesi işlemin esasını oluşturur. Şekil 3 (a, b ve c)’de, 2 mm çapında 0,1, 2, 3, 4 ve 6 mm derinliklerinde geleneksel ön-delinmiş, iş parçasına uygulanmış sürtünmeli delme işlemlerinde oluşan sıcaklık değerlerinin

grafikleri gösterilmiştir. İşlemde dönen konik takım-iş parçası temas alanında sürtünme etkisi ile oluşan sıcaklık, dönme hızının artışı ve ilerlemenin azalmasıyla, birim ilerlemedeki takımın döngü sayısı ve böylece sürtünme etkisi arttığından, artmıştır. Bu nedenle en yüksek sıcaklık değeri 3600dev/dak dönme hızı ve 40 mm/dak ilerlemede, 339,8 °C olarak ölçülmüştür. Ön-deliksiz sürtünmeli delme işleminde başlangıç deformasyonunun ve işlemin sonuna kadar devam eden deformasyon etkisi ile takım-iş parçası temas bölgesinde temas alanı azaldığından sıcaklık azalmıştır. Artan ön-delik çapının artışı ile sıcaklık, dönme hızı ve ilerlemeye bağlı olarak, düzenli bir şekilde artmıştır. Cidar kalınlığı boyunca ön-delinmiş numunelerin sürtünmeli delinmesi işlemlerinde oluşan sıcaklık, takım-iş parçası temas bölgesinde sürtünmeyi sağlayan malzeme hacmi azaldığından, azalmıştır. Bu azalma oranı, yüksek ilerleme ve düşük dönme hızlarında daha yüksek olmuştur. Ön-delme derinliğinin artışı ile sıcaklıktaki yetersizlik, yüksek dönme hızları ve düşük ilerlemeler seçilerek telafi edilebilmiştir. Şekil 3 a'da 3000 dev/dak dönme hızı ve 40 mm/dak ilerlemede, artan ön-delik derinliği ile sıcaklık değerinde artış olmuş ve sıcaklık oluşumu kararlılığını korumuştur. Ancak Şekil 3 b ve c'de ise artan ilerleme ile ön-delik çapındaki artış ile sıcaklıktaki düzenli oluşum bozulmuştur. Ön-delikli sürtünmeli delmede, ön-delik derinliğinin artışı ile sıcaklık açığı, yüksek dönme hızları ve düşük ilerlemeler seçilerek telafi edilebilmiştir.



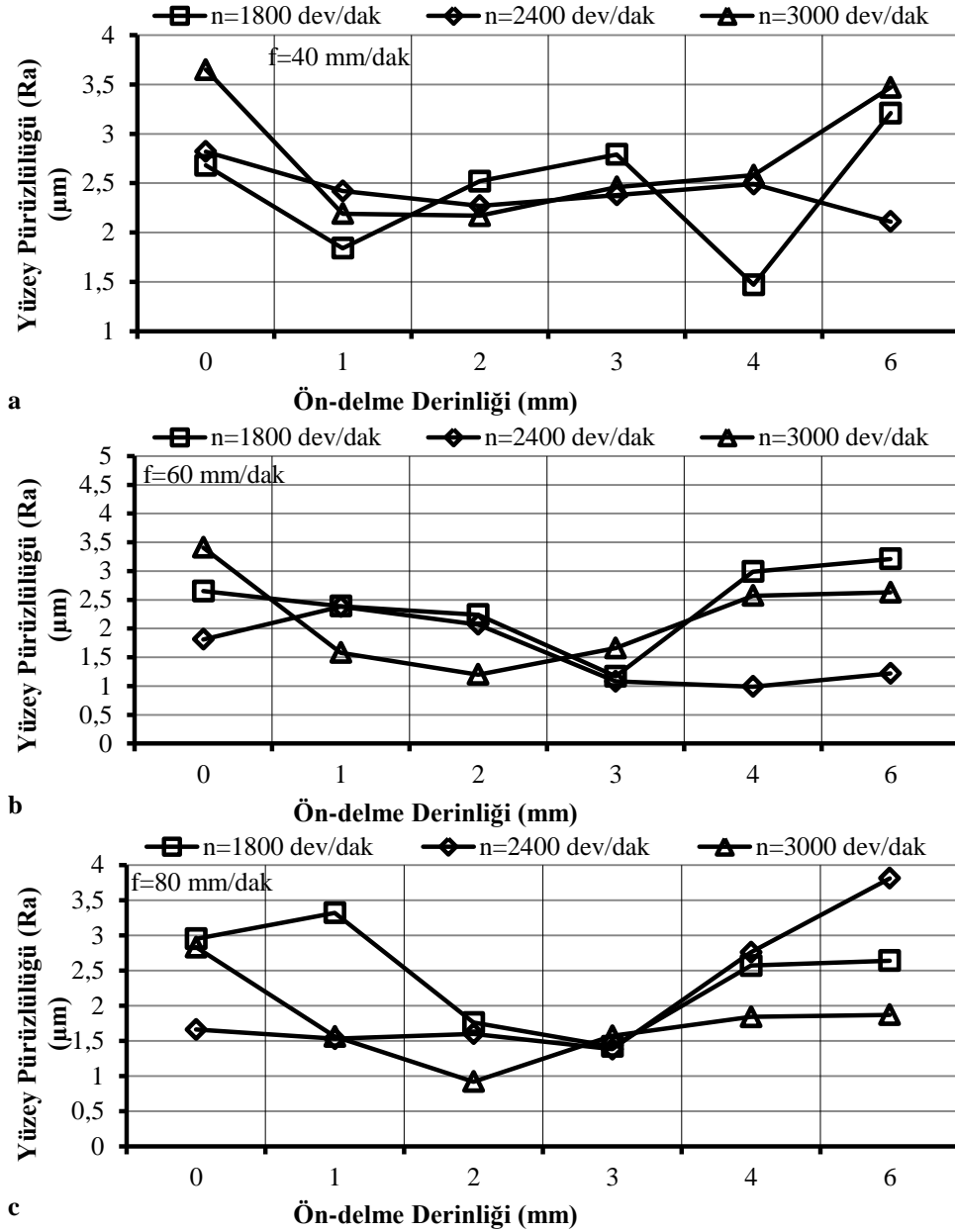


Şekil 3. Ön-delik derinliğinin sıcaklığa etkisi a) 40 mm/dak, b) 60 mm/dak, c) 80 mm/dak ilerlemede

3.2. Ön-delik Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Sürtülmeli delme işleminin amacı, ince cidarlı parçalarda, işlemin sonunda elde edilen kovan yardımıyla, bağlantı uzunluğunu ve vida boyunu arttırmaktır. Bağlantıda birden fazla parça birbiri ile çalışacağından, parçaların birbiriyle temas ettikleri yüzeylerin kalitesi önemlidir. Yüzey kalitesinin artması ile parçaların ömürleri arttığından yüzey pürüzlülüğü işlemin en önemli sonuçlarından biridir. Şekil 4 (a, b ve c)'de, 2 mm çapında 0,1, 2, 3, 4 ve 6 mm derinliklerinde geleneksel ön-delinmiş, iş parçasına uygulanmış sürtülmeli delme işlemlerinde delinmiş deliklerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin grafikleri gösterilmiştir. Ön-deliksiz işlemde, işlemin başlangıcındaki deformasyon kovan oluşumuna kadar azalarak devam ettiği için yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Artan ön-delik derinliği ile tüm deneysel şartlarda yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana gelmiştir. Ancak 6 mm (cidar kalınlığı boyunca) ön-delinmiş numunelerde malzeme hacmi yetersiz olduğundan, takım-iş parçası temas alanında yeterli sıcaklık oluşmadığından deformasyon etkisiyle yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Ön-delik derinliği ve ilerlemenin artışı ile yüzey pürüzlülüğü artış göstermiş, fakat ön-delik derinliği ve dönme hızının artışı ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır.

En küçük yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla 1800, 2400 ve 3000 dev/dak dönme hızlarında, 4, 3 ve 2 mm ön delme derinliklerinde (Şekil 4 a, b ve c'de sırasıyla gösterilmiştir) ve sırasıyla 1,47 μm , 1,08 μm ve 0,92 μm olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü kriterine göre en uygun dönme hızları, 40 mm/dak ilerleme için 1800 dev/dak, 60 mm/dak için 2400 dev/dak ve 80 mm/dak için 3000 dev/dak olduğu görülmüştür. Yüksek dönme hızı ve düşük ilerlemede, aşırı derecede ergimiş malzeme delik yüzeyine sıvandığından, düşük dönme hızı ve yüksek ilerlemelerde ise deformasyon etkisinden dolayı yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Ön-delme derinliğinin artışı ile sürtünmeyi sağlayan malzeme hacmi azaldığından 80 mm/dak ilerleme ve 3000 dev/dak dönme hızında 2 mm, 60 mm/dak ve 2400 dev/dak 'de 3 mm, 40 mm/dak ve 1800 dev/dak'de ise 4 mm ön-delik derinliklerinin uygun olduğu tespit edilmiştir. Ön-delik derinliği, dönme hızı ve ilerlemenin paralel bir şekilde artışı ile azalmıştır, ancak dönme hızı ve ilerlemenin paralel bir şekilde azalmasıyla da artmıştır.



Şekil 4. Ön-delik derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi a) 40 mm/dak, b) 60 mm/dak, c) 80 mm/dak ilerlemede

3.3. Ön-delik Derinliğinin Kovan Biçimine Etkisi

Sürtümlü delmenin asıl amacı, işlemin sonunda oluşan kovan yardımıyla, ince cidarlı malzemelerde bağlantı uzunluğu ve vida boyunu arttırmak olduğundan, işleminde oluşan kovanın biçimi çok önemlidir. İşleminde meydana gelen kovanda çatlak ve yarıkların az olması, kovan biçiminin silindirik bir şekilde oluşması, işlemin amacı açısından, esastır. Sünek malzemelerin sürtümlü delme işleminde bu amaca uygun kovan biçimi elde edilirken A7075-T651 alaşımı gibi gevrek malzemelerde ise kovanda çatlak ve yarıklar oluşmakta, kovanın silindirikliği azalmakta, böylece bağlantı uzunluğu ve vida boyunu arttırmaya az oranda uygun olan kovanlar elde edilmektedir. Şekil 5'te 40, 60 ve 80 mm/dak ilerlemelerde, 1800, 2400 ve 3000 dev/dak dönme hızlarında, 2 mm çapında, 0, 1, 2, 3, 4 ve 6 mm derinliklerinde ön-delikler delinmiş A7075-T651 alaşımına uygulanan sürtümlü delme işlemlerinde oluşmuş kovanların resimleri gösterilmiştir. Ön-deliksiz numunelerde oluşan kovanlarda, deformasyon etkisi ile çatlak ve yarıkların yoğunluğu artmış, kovanın silindirikliği bozulmuştur. Kovandaki çatlak ve yarıkların yoğunluğu dönme hızının ve ilerlemenin artışı ile artmıştır. Yüksek dönme hızları

sebeplendiği yüksek moment etkisiyle, yüksek ilerlemeler ise sağladığı itme kuvvetinin etkisiyle deformasyona sebep olmuş ve kovanın biçimini zorlayarak çatlak ve yarıkların oluşumunu artırmıştır. Böylece en düzgün biçimli kovanlar, 1800 ve 2400 dev/dak dönme hızlarında, 40 ve 60 mm/dak ilerleme değerlerinde elde edilmiştir. Ön-delme derinliği başlangıç deformasyonunu azaltarak düzenli sıcaklık oluşumunu sağlamıştır. Ancak ön-delik derinliğinin bittiği noktadan malzemenin alt kısmına kadar (ön-deliksiz derinlik) takım iş parçası içerisinde sürtünerek ilerlediği süreçte, az da olsa deformasyon etkisinin devam ettiği tespit edilmiştir. Bu deformasyon etkisi ile boydan boya delinmemiş numunelerde elde edilmiş kovanların ucunda taç yaprağı biçiminde oluşum, çatlak ve yarıklar meydana gelmiştir. Malzemenin cidar kalınlığı boyunca (6 mm) ön-delinmiş numunelerde ise kovan oluşumu iyileşmiş, kovanın silindirikliği artmış, kovanın ucundaki çatlak ve yarıkların miktarı azalmıştır.

Dönme Hızı (dev/dak)	İlerleme (mm/dak)	Ön-delik derinliği (mm)					
		0 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	6 mm
1800 dev/dak	40						
	60						
	80						
2400 dev/dak	40						
	60						
	80						
3000 dev/dak	40						
	60						
	80						

Şekil 5. Ön-delik derinliğinin kovan biçimine etkisi

4. TARTIŞMA

Sürtünmeli delmede oluşan sıcaklık işlemin esasını oluşturur. Dönme hızının artması ve ilerlemenin azalması ile birim ilerlemedeki döngü sayısı arttığından oluşan sıcaklık artmıştır. En büyük sıcaklık değeri 3600 dev/dak dönme ve 40 mm/dak ilerlemede 339,8 °C olarak ölçülmüştür. Ön-delik delinmemiş numunelerde deformasyonun etkisinden dolayı sıcaklık oluşumu azalmıştır. Fakat ön-delikli numunelerde ise sıcaklık oluşumu ön-delik derinliğinin artışı ile düzenli bir şekilde meydana gelmiştir. Artan ön-delik derinliği ve cidar kalınlığı boyunca ön-delinmiş numunelerde ise sıcaklık oluşumunu sağlayan malzeme hacmi azaldığından oluşan sıcaklık azalmıştır, ancak yüksek dönme hızları ve düşük ilerleme parametreleri seçilerek sıcaklık oluşumundaki bu azalma telafi edilmiştir.

Sürtünmeli delme işleminin amacı, ince cidarlı parçalarda kovan yardımıyla bağlantı uzunluğunu artırmaktır. Birbirine bağlanan malzemelerde temas eden yüzeylerin kalitesi önem arz etmektedir. Ön-deliksiz sürtünmeli delme işleminde, başlangıç deformasyonunun etkisi ile yüzey pürüzlülüğü artarken, artan ön-delik derinliği ile yüzey pürüzlülüğünde düzenli bir azalma meydana gelmiştir. Ancak 6 mm ön-delik derinliğinde ise malzeme hacmi azaldığından takım-iş parçası temas alanında yeterli sıcaklık oluşmadığından deformasyon etkisiyle yüzey pürüzlülüğü artmıştır. En kaliteli yüzeyler, sırasıyla 1800, 2400 ve 3000 dev/dak dönme hızları ve 4,3 ve 2 mm ön-delme derinliklerinde elde edilmiş ve sırasıyla 1,47, 1,08 ve 0,92 µm olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü kriterine göre en uygun parametreler, sırasıyla 1800, 2400 ve 3000 dev/dak dönme hızları ve 40, 60 ve 80 mm/dak ilerleme değerleri olduğu görülmüştür. Yüksek dönme hızı ve düşük ilerlemede, düşük dönme hızı ve yüksek ilerlemelerde ise yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Ön-delik derinliği, dönme hızı ve ilerlemenin paralel bir şekilde artışı ile azalmıştır, ancak dönme hızı ve ilerlemenin paralel bir şekilde azalmasıyla da artmıştır.

Sürtünmeli delmenin amacı kovan yardımıyla, ince cidarlı malzemelerde bağlantı uzunluğu ve vida boyunu artırmaktır. Bu nedenle kovanda çatlak ve yarıkların az olması, kovan biçiminin silindirik bir şekilde oluşması, işlemin amacı açısından, esastır. Ön-deliksiz sürtünmeli delmede, deformasyon etkisi ile çatlak ve yarıklar artmış, kovanın silindirikliği bozulmuştur. Yüksek dönme hızları sebep olduğu yüksek moment etkisiyle, yüksek ilerlemeler ise sağladığı itme kuvvetinin etkisiyle deformasyona sebep olmuş ve kovanın biçimini zorlayarak çatlak ve yarıkların oluşumunu artırmıştır. Bu çalışmada en uygun kovan biçimleri 1800 ve 2400 dev/dak dönme hızlarında, 40 ve 60 mm/dak ilerleme değerlerinde elde edilmiştir. Sürtünmeli delme işlemindeki en şiddetli deformasyon işlemin başlangıcında takım ucunun iş parçasına temas ettiği anda meydana gelmiş ve bu şiddet takımın iş parçasının içinde ilerlemesiyle kovan oluşumunun tamamlandığı ana kadar azalarak devam etmiştir. Bu nedenle cidar kalınlığı boyunca ön-delikli numunelerde silindirik biçimli, çatlak ve yarıkların az olduğu kovan biçimleri elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Farklı ön-delik derinliklerinde uygulanan sürtünmeli delme işleminde en büyük sıcaklık değeri 3600 dev/dak dönme ve 40 mm/dak ilerlemede 339,8 °C olarak ölçülmüştür. Fakat Ön-deliksiz numunelerde deformasyonun etkisinden dolayı sıcaklık oluşumu azalmasına rağmen ön-delik derinliğinin artışı ile sıcaklık düzenli bir şekilde artmıştır. Ancak takımın uç yüksekliğinden fazla derinlikte delinen ön-deliklerde malzeme hacmi azaldığından oluşan sıcaklık azalmıştır. Azalan bu sıcaklık yüksek dönme hızları ve düşük ilerleme parametreleri seçilerek telafi edilmiştir.

En küçük yüzey pürüzlülüğü değerleri, sırasıyla 1800, 2400 ve 3000 dev/dak dönme hızlarında, 40, 60 ve 80 mm/dak ilerleme değerlerinde ve 4,3 ve 2 mm ön-delme derinliklerinde elde edilmiş ve sırasıyla 1,47, 1,08 ve 0,92 µm olarak ölçülmüştür.

Çatlaksız, silindirik, uygun biçimdeki kovan biçimleri 1800 ve 2400 dev/dak dönme hızlarında, 40 ve 60 mm/dak ilerleme değerlerinde elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Miller, S. F., Tao, J., Shih, A. J., (2006), "Friction Drilling of Cast Metals", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46 (2006) pp 1526 – 1535
- [2] Lee, S. M., Chow, H. M., Huang, F. Y., Yan, B. H., (2009), "Friction Drilling of Austenitic Stainless Steel by Uncoated and PVD AlCrN – and TiAlN Coated Tungsten Carbide Tools", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49 (2009) pp 81 – 88
- [3] Lee, S. M., Chow, H. M., Yan, B. H., (2007), "Friction drilling of IN – 713LC cast superalloy", Materials and Manufacturing Processes, 22: pp 893 – 897
- [4] Miller, S. F., McSpadden, S. B., Wang, H., Li, R., Shih, A. J., (2004), "Experimental and numerical analysis of the friction drilling process", ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, submitted for publication
- [5] Miller, S. F., Blau, P., Shih, A. J., (2005), "Microstructural Alterations Associated with Friction Drilling of Steel, Aluminum and Titanium", Journal of Materials Engineering and Performance 14 (5) (2005), pp 647 – 653
- [6] Chow, M. H., Lee, M. S., Yang, L. D., (2008), "Machining Characteristic study of friction drilling on AISI 304 Stainless Steel", Journal of Materials Processing Technology, 207 (2008) pp 180 – 186
- [7] Miller, S. F., Blau, P. J., Shih, A. J., (2007), "Tool Wear in Friction Drilling", International Journal of Machine Tools and Manufacture 47 (2007) pp 1636 – 1645
- [8] Miller, S. F., Wang, H., Li, R., Shih, A.J., (2006), "Experimental and Numerical Analysis of the Friction Drilling Process", Journal of Manufacturing Science and Engineering 128 (3) (2006) 802 – 810
- [9] Miller, S. F., Shih, A. J., (2007), "Thermo – Mechanical Finite Element Modeling of the Friction Drilling Process", International Journal of Manufacturing Science and Engineering 129 (2007) pp 531 – 538
- [10] Gopal Krichna, P. V., Kishore, K., and Satyanarayana, V. V., (2010), "Some Investigations in Friction Drilling AA6351 Using High Speed Steel Tools", ARPN Journal Engineering and Applied Sciences, 5, pp 1819–6608.
- [11] Miller, S. F., Blau, P. J., Shih, A. J., (2007), "Tool Wear in Friction Drilling", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, pp 1636–1645
- [12] Dekkers, G., (1993), "Flow Drill Prosesi Firma Katalogları", Copyright by Flow Drill B. V. Holland, pp 1 – 30.
- [13] Matsuoka, M., Motoyoshi, M., Sakaguchi, M., Shinohara, A., Shigeede, T., Saito, Y., Matsuda, M., Shimizu N., 2011, Friction heat during self-drilling of an orthodontic miniscrew, International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Volume 40, Issue 2, February 2011, Pages 191-194
- [14] Miller, S.F., Tao, J., Shih, A.J., 2006. Friction drilling of cast metals. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, 1526-1535.
- [15] Demir, Z., Ozek, C., 2014. Investigate the effect of pre-drilling in friction drilling of A7075-T651.. Materials and Manufacturing Processes, 29, 593-599.

MİKRO ÖLÇEKTE TALAŞLI İMALAT

İNCE PARÇALARIN MİKRO FREZELEMESİNDE SICAKLIKLAR VE ÇARPILMALAR

Ali Mamedov^a ve İsmail Lazoğlu^a

a. Koç Üniversitesi, Üretim ve Otomasyon Araştırma Merkezi, İstanbul/TÜRKİYE, ilazoglu@ku.edu.tr

Özet

Mikro frezeleme sonrasında titanyum iş parçalarının çarpılmalarına, artık gerilmelerin oluşmasına ve takım aşınmasına doğrudan etkisi olduğu için kesme sıcaklıklarının modellenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada kesme mekaniği ve ısı modellenmesi dikkate alınarak, ince cidarlı titanyum iş parçasının çarpılması incelenmiştir. Kesme kuvvetleri mekanistik kuvvet modeli ile hesaplanmış ve iş parçası sıcaklığı sonlu elemanlar analizi ile modellenmiştir. Sunulan simülasyonlar mikro frezeleme deneyleri ile doğrulanmıştır.

Anahtar kelimeler:

Üretim süreci; Mikro frezeleme; Kesme sıcaklıkları; Çarpılmalar;

TEMPERATURES AND DISTORTIONS IN MICRO MILLING OF PARTS WITH THIN WALLS

Abstract

Prediction of the cutting temperature fields in micro milling of titanium is important, since it affects the tool wear, has influence on the residual stresses and the distortions of micro parts. An investigation of distortions of the machined thin wall geometry is performed by considering mechanics and thermal analysis of the process. Cutting forces are estimated by mechanistic cutting force model and temperature of the workpiece is modeled by Finite Element Analysis. Simulations are validated through micro milling cutting experiments.

Keywords:

Production process; Micro milling; Cutting Temperatures; Distortions;

1. GİRİŞ

Mikro frezelemenin kullanım alanları her gün daha da artmakta ve biyomedikal, otomotiv ve havacılık gibi birçok alanları kapsamaktadır. Bu alanlarda kullanılacak mikro ölçekli titanyum parçalarının dar toleranslarla üretilmesi gerekmektedir, bundan dolayı üretimdeki hassasiyet son derece önemlidir. Talaşlı imalat kaynaklı çarpılmalar ince cidarlı parçalarda en çok görülen şekil hatalarındandır. Bu yüzden istenilen toleranslarda parçaların üretilmesi için çarpılmaların öngörülmesi ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu sebeple birçok araştırmacı kesme süreçlerinin modellenmesi üzerinde çalışmaktadır. Altıntaş vd. [1] frezeleme mekaniğinin modellenmesi konusunda kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Jawahir [2] talaşlı imalat esnasında oluşan artık gerilmeler ve çarpılmalar konusunda kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada literatürde mevcut modelleme tekniklerini karşılaştırmış ve mevcut artık gerilmeleri ölçme tekniklerini incelemiştir. Denkena [3] alüminyum parçaların yüksek kesme derinliği ve yüksek ilerleme koşullarında işlendiğinde oluşan yüzey altı malzeme yapısı değişiklikleri ve bundan kaynaklanan artık gerilmeleri ve çarpılmaları incelemiştir. Arrazola [4] nikel bazlı süper alaşım olan Inconel 718 malzemeden üretilen iş parçasında tornalama sonrasında oluşan artık gerilmelerin 3-D sonlu elemanlar analizini yapmıştır. Çalışmasında Arrazola akma gerilmesi ve sürtünme katsayısı gibi malzeme özelliklerinin modelleme üzerindeki etkilerini incelemiş ve artık gerilmeleri ölçme tekniklerine değinmiştir. Lazoğlu [5] artık gerilmeleri modellemek için analitik elasto-plastik model geliştirmiş ve modeli Wasploy malzemesinin X-ışını difraktometresinde yapılan ölçümleri ile doğrulamıştır. Schulze [6] T-profil iş parçasının frezeleme sonrasında çarpılmasını modellemiş ve yaptığı deneyler ile modelini doğrulamıştır.

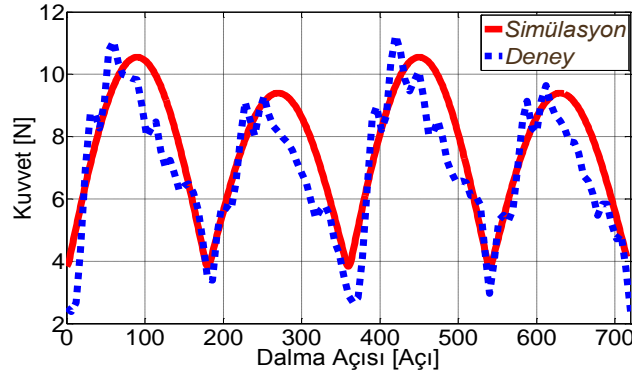
Daha önce yapılmış çalışmalardan bilindiği üzere çarpılmaların iki ana nedeni kesme ısı ve parçaya etkileyen kesme kuvvetleridir. Bu nedenle çarpılmaları öngörebilmek için kesme kuvvetlerinin ve kesme sıcaklıklarının hassas bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Bu konuda Jin ve Altıntaş [7] kayma ve kazıma kuvvetlerini dikkate alan sonlu elemanlar kesme kuvvet modelini geliştirmişler. Geliştirilen model kayma bölgesinde oluşan gerilme dağılımını kesme sıcaklığı ve takım ucu ile ilişkilendirmiştir. Park ve Malekian [8] mikro frezeleme için geliştirdikleri kuvvet modelinde kazıma kuvvetlerini detaylı olarak incelemiş ve kazıma kuvvetlerinin kazılan malzeme hacmi ile doğrudan ilişkisi olduğunu belirtmişlerdir. Mamedov ve Lazoğlu [9] geliştirdikleri mikro frezeleme kuvvet modelinde kesme kinematiklerini doğrudan etkileyen talaş kalınlığı modelinin önemini belirtmiş, kayma ve kazıma kuvvetleri dikkate alan mekanistik kuvvet modelini geliştirmişlerdir. Bu çalışmada mikro takıma gelen kesme kuvvetleri dikkate alınarak takım deformasyonu öngörülmüştür ve lazer sensörler kullanılarak doğrulanmıştır. Kesme sıcaklığı modellemesi konusunda Komanduri ve Hou [10] model geliştirmiş ve birincil kayma bölgesinde ve takım – iş parçası ara yüzeyinde oluşan ısıları modellemişlerdir. Lazoğlu ve Altıntaş [11] sundukları çalışmada sürekli ve kesintili talaşlı işleme yöntemleri için analitik ısı modelini geliştirmiştir. Lazoğlu ve İslam [12] sonlu farklar yöntemini kullanarak eğik kesme işlemleri için 3-D ısı modelini geliştirmiştir.

Bu makalede geliştirilen kuvvet ve ısı modelleri kullanılarak ince cidarlı parçalarda mikro frezeleme esnasında oluşan çarpılmalar incelenmiştir. Kesme koşullarının, kesme kuvvetlerinin ve kesme sıcaklığının çarpılma üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. MODELLEME VE DENEYSEL ÖLÇÜMLER

Mikro frezeleme esnasında oluşan sıcaklıklar geliştirilen termo-mekanik ısı modeli kullanılarak öngörülebilmektedir. Isı modelinde mekanistik kuvvet modelinde hesaplanan kesme kuvvetleri kullanılarak, birincil kayma bölgesinde ve takım – iş parçası ara yüzünde oluşan ısıları Denklem-1 ve Denklem-2’de gösterildiği şekilde hesaplamaktadır. Hesaplanan ısılar sonlu elemanlar yazılımında takım – iş parçası ara yüzüne ve birincil kayma bölgesine uygulanarak, takım ve iş parçasında oluşan sıcaklık dağılımı hesaplanmaktadır.

Kesme kuvvetlerinin hesaplanması için daha önce geliştirilen mikro frezeleme için mekanistik kuvvet modeli kullanılmıştır [9]. Kullanılan modelde mikro frezeleme mekaniğine uygun olarak kayma ve kazıma kuvvetleri modellenmiş ve Şekil – 1’den görüldüğü gibi kesme kuvvetleri hassasiyetle modellenmiştir.



Şekil – 1: Ti-6Al-4V malzemesi için simülasyon ve deneysel bileşke kesme kuvveti ($d=800 \mu\text{m}$, $n=10.000 \text{ dev/dak}$, $a=100 \mu\text{m}$, $f=10 \mu\text{m/dev-diş}$)

Isı modelinde birincil kayma bölgesine uygulanan ısı miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$P_s(\theta) = V_s \cdot F_s(\theta) = \frac{V \cdot \tau_s \cdot a \cdot h(\theta) \cdot \cos(\alpha_n)}{\cos(\phi_n - \alpha_n) \cdot \sin(\phi_c)} \quad (1)$$

Takım – iş parçası ara yüzeyine uygulanan ısı miktarı aşağıdaki gibidir:

$$P_f(\theta) = V_c \cdot F_u = \frac{V \cdot F_R \cdot \sin(\phi_n) \cdot \sin(\beta_a)}{\cos(\phi_n - \alpha_n)} \quad (2)$$

Burada P_s , P_f , V , V_s , V_c , F_s , F_u , F_R , τ_s , h , a , α_n , ϕ_n , ϕ_c , θ ve β_a sırası ile kayma ısısı, sürtünme ısısı, kesme hızı, kayma hızı, talaş hızı, kayma kuvveti, takım – iş parçası ara yüzeyindeki sürtünme kuvveti, bileşke kesme kuvveti, kayma gerilmesi, talaş kalınlığı, kesme derinliği, dik talaş açısı, dik kayma açısı, kayma açısı, dalma açısı ve sürtünme açısıdır.

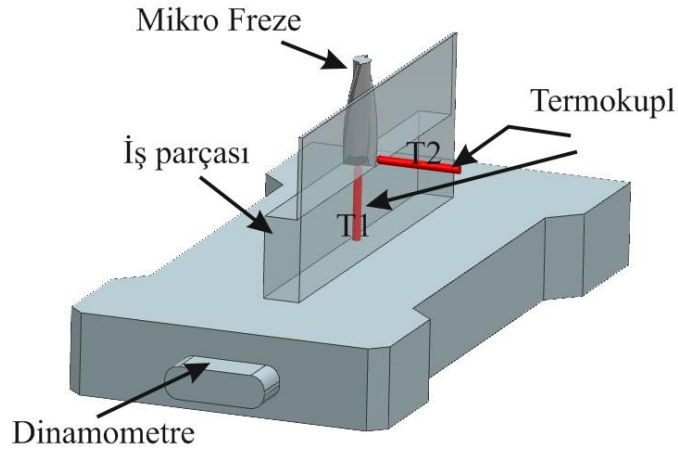
Hesaplanan kayma ve sürtünme ısıları sonlu elemanlar analizi yazılımında sırasıyla birincil kayma bölgesine ve takım – iş parçası ara yüzüne ısı girdisi olarak tanımlanmaktadır. Sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Simülasyon zamana bağlı olarak çözülmüş ve mikro frezenin bir dönüşü modellenmiştir. Takıma ve iş parçasına doğal konveksiyon ile soğuma tanımlanmıştır. Deneylerde kullanılan kesme koşulları, takım ve iş parçası özellikleri Tablo – 1’de verilmiştir.

Tablo – 1: Kesme koşulları, takım ve iş parçası özellikleri

Kesme hızı	10.000 dev/dak
Takım çapı	800 μm
Talaş açısı	8°
Kesici ağız yarıçapı	6 μm
Ti-6Al-4V kayma gerilmesi	613 MPa
Kayma açısı	32°
Sürtünme açısı	21°
Kesme derinliği	100 μm
İlerleme	200-400 mm/dak

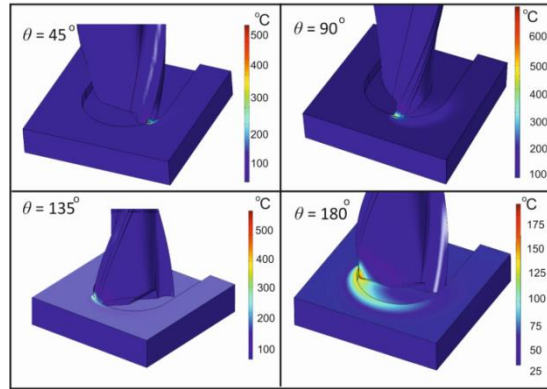
Modellenen sıcaklık ve kesme kuvvetleri geliştirilen deney düzeneği sayesinde eşzamanlı olarak ölçülmüştür. Mikro frezeleme deneyleri 5-eksen Mori Seiki CNC tezgâhında Kistler 9256C dinamometresi ve çapı 130 μm olan K-tipi termokupllar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Termokupllar kesme yüzeyine T1 25 μm ve T2 15 μm uzaklıkta yerleştirilmiştir. İş parçası hazırlanması esnasında işlenecek referans yüzeyine kalan mesafeler (25 μm ve 15 μm) göz önünde bulundurularak delme derinliği hesaplanmış ve termokupl çapına uygun olarak delme

işlemi yapılmıştır. İş parçası malzemesi titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V'dır. Deneylein yapıldığı deney düzeneği aşağıda Şekil – 2’de gösterilmiştir.

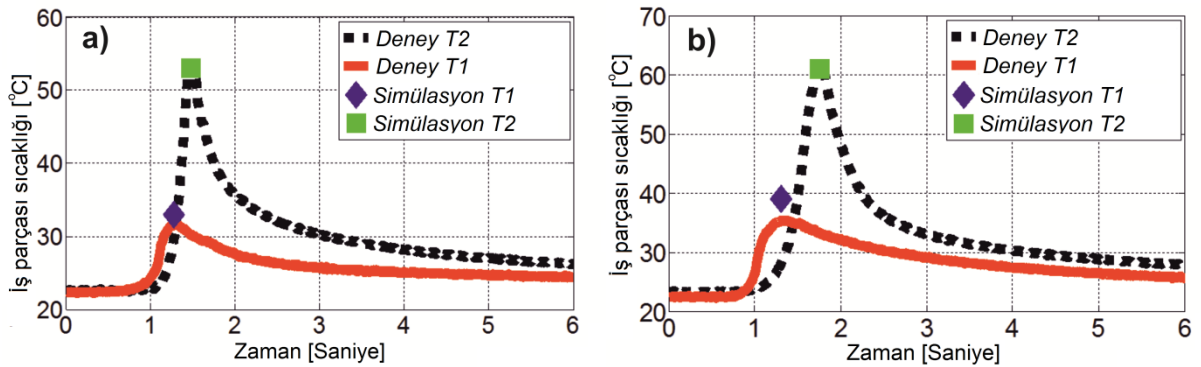


Şekil – 2: Deney düzeneği

Isı modelinde hesaplanan kayma ve sürtünme ısıları sonlu elemanlar modeline girildiğinde Şekil – 3’te gösterildiği gibi mikro frezenin bir dönüşü için takım ve iş parçasında oluşan sıcaklık dağılımı hesaplanmaktadır. Model doğrulaması için kesme esnasında iş parçasından T1 ($\theta = 90^\circ$) ve T2 ($\theta = 180^\circ$) konumlarından termokupullar ile sıcaklık okunmuş ve daha sonra aynı konumlardaki simülasyon sıcaklıkları ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalı sıcaklık grafikleri Şekil – 4’te verilmiştir.



Şekil – 3: Takım ve iş parçasında oluşan sıcaklıklar ($n=10.000$ dev/dak, $a=100\mu\text{m}$, $f=10 \mu\text{m}/\text{dev-dış}$)

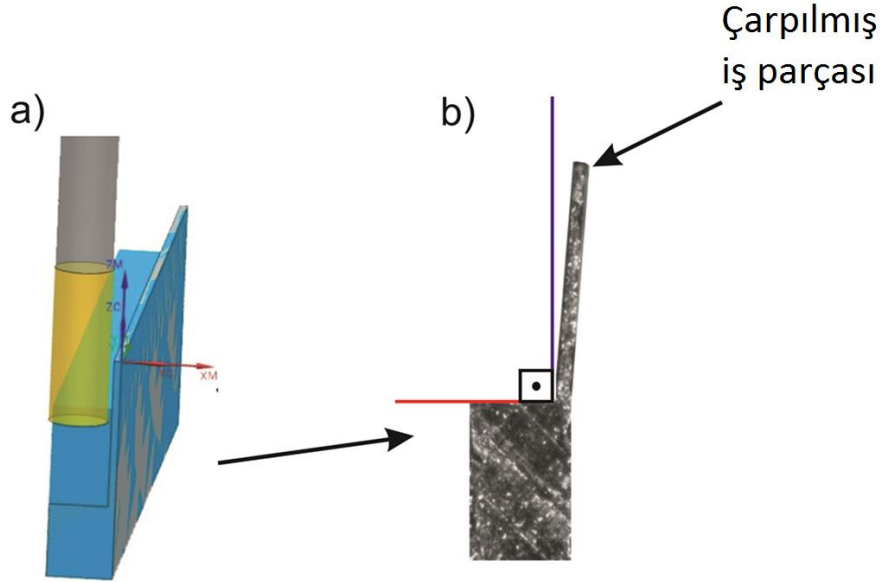


Şekil – 4: Deneysel ve simülasyon sıcaklıkları: a) ($n=10.000$ dev/dak, $a=100\mu\text{m}$, $f=5 \mu\text{m}/\text{dev-dış}$),

b) ($n=10.000$ dev/dak, $a=100\mu\text{m}$, $f=10 \mu\text{m}/\text{dev-dış}$)

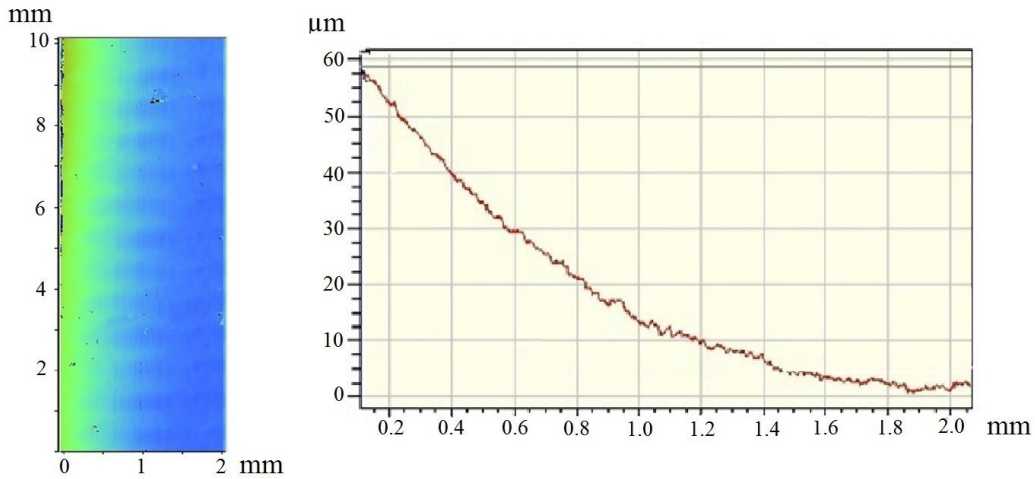
Şekil – 4’ ten görüldüğü gibi hem kesme yüzeyinin altında $25 \mu\text{m}$ derinliğinde $\theta = 90^\circ$ konumunda yerleştirilen T1 termokupl, hem de kesme yüzeyine $15 \mu\text{m}$ uzaklıkta $\theta = 180^\circ$ konumunda yerleştirilen T2 termokupl’dan alınan ölçümler simüle edilen iş parçası sıcaklık değeri ile örtüşmektedir.

Yükseklik – kalınlık oranı yüksek olan ince cidarlı iş parçalarında talaşlı işleme sonrasında çarpılmalar neticesinde geometrik şekil hataları oluşmaktadır. Bu makalede yüksekliği 2 mm , kalınlığı $100 \mu\text{m}$, yükseklik – kalınlık oranı 20 olan ince cidarlı iş parçasının iki farklı kesme koşulunda işlenmesi sonucu oluşacak çarpılmalar incelenmiştir. İş parçası Şekil – 5a’da görüldüğü gibi $100 \mu\text{m}$ kesme derinliği ile 20 adımda işlenmiştir. İlerleme hızları 5 ve $10 \mu\text{m}/\text{dev-dış}$ ’tir. Şekil – 5b’de görüldüğü gibi işlenen ince cidarlı iş parçalarda maruz kaldıkları mekanik ve termal yükler neticesinde artık gerilme kaynaklı çarpılmalar görülmüştür.

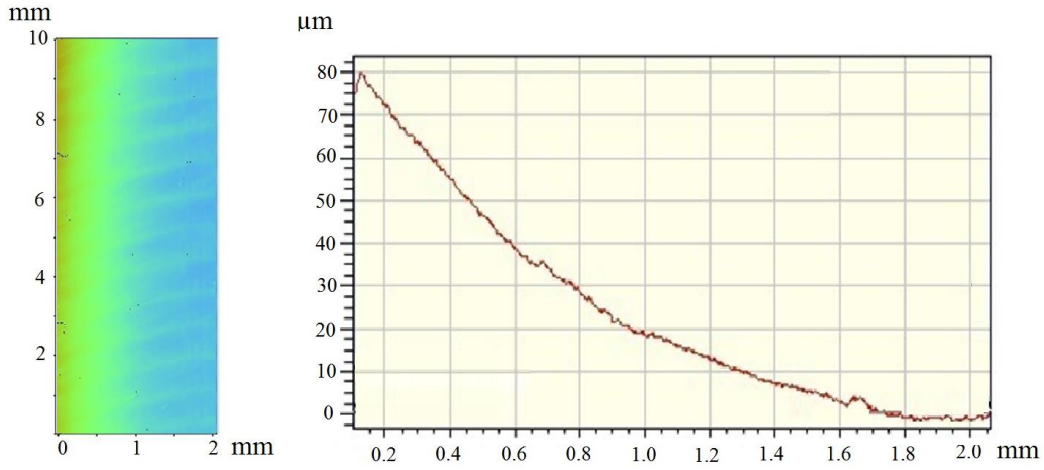


Şekil – 5: Artık gerilme kaynaklı çarpılma: a) CAM görüntüsü ($n=10.000 \text{ dev/dak}$, $a=100\mu\text{m}$, $f=10 \mu\text{m}/\text{dev-dış}$), b) İşlenmiş parçanın mikroskop görüntüsü

Parçada oluşan deformasyonun miktarını ölçmek için Beyaz Işık İnterferometresi (White Light Interferometer) ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerin sonuçları aşağıda Şekil – 6 ve Şekil – 7’de verilmiştir. Ölçümlerden görüldüğü gibi her iki parçada da çarpılma mevcut ve ilerleme arttıkça duvardaki eğilme miktarı da artmaktadır.



Şekil – 6: Artık gerilme kaynaklı çarpılmanın beyaz ışık interferometresi ölçümü ($n=10.000 \text{ dev/dak}$, $a=100\mu\text{m}$, $f=5 \mu\text{m}/\text{dev-dış}$)



Şekil – 7: Artık gerilme kaynaklı çarpılmanın beyaz ışık interferometresi ölçümü ($n=10.000$ dev/dak, $a=100\mu\text{m}$, $f=10\mu\text{m/rev-diş}$)

Ölçümlerden görüldüğü gibi talaşlı işleme sonucunda oluşan çarpılma önemli boyutlardadır. Parçada oluşan çarpılmanın nedeni ise mikro frezeleme esnasında oluşan ısı ve mekanik yükler sonucunda oluşan artık gerilmelerdir. Parçaya gelen ısı ve mekanik yükler incelendiğinde, çarpılmaların kesme koşullarına doğrudan bağlantılı olduğu görülmüştür. İlerleme arttığında oluşan kesme kuvvetleri ve Şekil-4'te görüldüğü gibi parçaya gelen termal yükler artmakta, bu da parçada oluşan çarpılma miktarının artmasına sebep olmaktadır.

3. SONUÇ

Bu makalede mikro frezeleme esnasında oluşan kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları ve iş parçasında neden oldukları çarpılmalar incelenmiştir. Artık gerilmelerin oluşmasına sebep olan mekanik ve termal yükler modellenmiştir. Mekanistik kesme kuvveti modeli Kistler mini dinamometresi ile yapılan deneysel kuvvet ölçümleri ile doğrulanmıştır. Kesme esnasında birincil kayma bölgesinde ve takım – iş parçası ara yüzünde oluşan ısılar termo-mekanik model ile hesaplanmış ve oluşturulan sonlu elemanlar modeline girdi olarak verilmiştir. Takımın tek dönüşü için oluşturulan sonlu elemanlar modeli çözüldüğünde takım ve iş parçasındaki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir bu sıcaklıklar çapı $130\mu\text{m}$ olan termokupllar ile yapılan deneysel sıcaklık ölçümleri ile doğrulanmıştır. Artık gerilmelerin oluşmasına neden olan ısı ve mekanik yükler hesaplandıktan sonra ince duvar geometrisinde iki parça işlenmiş ve parçada oluşan çarpılmalar incelenmiştir.

TEŞEKKÜRLER

Yazarlar, TÜBİTAK'a MAG 110M697 nolu projeye ve İsmail Lazoğlu'na International Research Fellowship desteği için, Koç Üniversitesi Yüzey Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezine, Tandem Ltd. ve Sandvik Coromant'a araştırmaya yaptıkları katkıdan dolayı ayrıca teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKLAR

- [1] Altintas Y, Kersting P, Biermann D, Budak E, Denkena B, Lazoglu I. (2014),"Virtual process systems for part machining operations", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63, 585–605.
- [2] Jawahir IS, Brinksmeier E, M'Saoubi R, Aspinwall DK, Outeiro JC, Meyer D, Umbrello D, Jayal AD. (2011),"Surface integrity in material removal processes: Recent advances", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60, 603–26.
- [3] Denkena B, Boehnke D, León L. (2008),"Machining induced residual stress in structural aluminum parts", *Production Engineering*, 2, 247–53.
- [4] Arrazola PJ, Kortabarria a., Madariaga a., Esnaola J a., Fernandez E, Cappellini C, Ulutan D, Özel T. (2014),"On the machining induced residual stresses in IN718 nickel-based alloy: Experiments and predictions with finite element simulation", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 41, 87–103.
- [5] Lazoglu I, Ulutan D, Alaca BE, Engin S, Kaftanoglu B. (2008),"An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 81–4.
- [6] Schulze V, Arrazola P, Zanger F, Osterried J. (2013),"Simulation of distortion due to machining of thin-walled components", *Procedia CIRP*, 8, 45–50.
- [7] Jin X, Altintas Y. (2012),"Prediction of micro-milling forces with finite element method", *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 542–52.
- [8] Park SS, Malekian M. (2009),"Mechanistic modeling and accurate measurement of micro end milling forces", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, 49–52.
- [9] Mamedov A, Layegh K. SE, Lazoglu I. (2015),"Instantaneous tool deflection model for micro milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79, 769–77.
- [10] Komanduri R, Hou ZB. (2000),"Thermal modeling of the metal cutting process Part I: Temperature rise distribution due to shear plane heat source", *International Journal of Mechanical Sciences*, 42, 1715–52.
- [11] Lazoglu I, Altintas Y. (2002),"Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 1011–22.
- [12] Lazoglu I, Islam C. (2012),"Modeling of 3D temperature fields for oblique machining", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 127–30.

MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE YÜZEY OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ

Ersen Hatipoğlu^a, Erhan Budak^b, Mustafa Bakkal^a

a. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, İstanbul/TÜRKİYE

hatipoglu@itu.edu.tr, bakkalmu@itu.edu.tr

b, Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul/TÜRKİYE ebudak@sabanciuniv.edu

Özet

Bu çalışmada, mikro frezeleme işleminde, minimum talaş kalınlığı etkisi, takım ve proses geometrisi baz alınarak yüzey oluşum modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile mikro frezeleme ile işlenen alın yüzeylerin orta çizgisi üzerindeki, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin öngörülmesi amaçlanmıştır. Yüzey oluşum modeli ile edilen sonuçlar, Ti6Al4V malzemede gerçekleştirilen kesme deneyleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucu, geliştirilen modelin yüzey pürüzlülüğünü yakın bir şekilde öngörebildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: mikro frezeleme, yüzey oluşumu, yüzey pürüzlülüğü

SURFACE GENERATION MODELLING IN MICRO MILLING OPERATIONS

Abstract

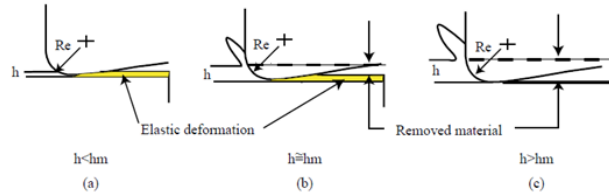
In this study, surface generation model is developed based on minimum chip thickness, tool and process geometry in micro milling operations. The purpose of the developed model is prediction of the surface roughness on the centerline of the face milled surface. Surface model is verified with cutting experiments on Ti6Al4V workpiece. Comparison of the simulated and experimental surface roughness values shows that the developed model is capable of predicting surface roughness to a considerable extent.

Keywords: micro milling, surface generation, surface roughness

1. GİRİŞ

Talaşlı imalatta işlenmiş yüzeyin kalitesi büyük önem taşımaktadır. Diğer imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında boyutsal ve geometrik hassasiyete daha iyi ulaşma imkanı veren talaşlı imalat yöntemlerinde, oluşan yüzey kalitesinin iyi olması istenen proses çıktılarındandır. Endüstride imalatçılar, iyi yüzey kalitesini diğer bir deyişle düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerini elde edebilmek amacıyla proses stratejileri geliştirmekte, takım imalatçıları takım dizaynları geliştirmekte, tezgah üreticileri tezgah özelliklerinde ve yapılarında daha iyi proses çıktıları elde edebilmek adına geliştirmeler yapmaktadır. Diğer taraftan araştırmacılar da süreci ve yüzey kalitesine etkileyen proses parametrelerini incelemekte, sonuçlara etkileyen değişkenleri belirlemekte ve yüzey oluşumu ile ilgili modelleme çalışmaları yapmaktadır.

Yüzey oluşumu ile ilgili geliştirilen modellemeler, proses öncesinde işlem çıktılarını öngörebilmek adına büyük önem taşımaktadır. Literatürde talaşlı imalat yöntemleri için geliştirilmiş ve doğrulanmış bir çok yüzey modeli bulunmaktadır. Ancak mantık olarak geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile aynı olsa da proses süreci ve temelleri olarak geleneksel yöntemlerden farklılıklar gösteren mikro talaşlı imalat yöntemleri için, mevcut geliştirilen talaşlı imalatta yüzey oluşumu modelleri geçersiz olmaktadır. Mikro işlemede boyutların önemli ölçüde küçülmesi; kesme sürecini oldukça etkilemektedir. Makro işlemede etkisi ihmal edilebilecek takım ucu yarıçapı, iş malzemesinin özellikleri, takım malzemesi ve tanecik yapısı, titreşimler, ısıl değişimler mikro işlemede süreci önemli ölçüde etkilemektedir. Mikro frezeleme işleminde boyutların küçülmesi, küçük çaplı takımların kullanılması gerektirmektedir. Bu durumda kesilmemiş talaş kalınlığı da çok küçük olmakta, hatta kesici takımın kenar yarıçapı ölçüsü ile yakın değerlerde olmaktadır. Bu durum, negatif talaş açısı oluşturmada ve mikro frezelemenin kesme mekanizmasında ciddi etki oluşturmaktadır.[1] Kesilmemiş talaş kalınlığı kesici takımın kenar yarıçapından küçük olduğu durumlarda, negatif talaş açısı oluşmakta ve bu durum kazınma (ploughing) durumunun oluşmasına sebebiyet vermektedir.[2] Kazınma (ploughing), malzemede talaş oluşumunun gerçekleşmeyip elastik-plastik şekil değişimine uğradığı durumdur.[3] Bu durumlardan ötürü mikro işlemede minimum talaş kalınlığı tanımı ortaya çıkmıştır. Minimum talaş kalınlığı kavramı talaşın oluştuğu ya da oluşmadığı durumu belirlemektedir. Minimum talaş kalınlığının altında, kesme işlemi kazınma (ploughing) dominant hale gelmektedir. Bu durumda malzeme elastik-plastik deformasyona uğrayarak, kesici kenarın altından kaymakta ve talaş oluşumu gerçekleşmemektedir.[4]



Şekil 1 : Mikro kesme işleminde talaş oluşumu [5]

Minimum talaş kalınlığı, takımın kesici kenar yarıçapı değeri ile ilişkilidir. Yapılan literatür incelemelerinde minimum talaş kalınlığının kesici kenar yarıçapının %5-%40'ı arasında değerler aldığı görülmüştür.[10] [11] [12]

Mikro frezeleme işleminde düşük ilerleme değerlerinde, takımın kesme hareketi sırasında etkileşime gireceği talaş kalınlığı değeri çok düşük olacak ve minimum talaş kalınlığı etkisinden ötürü kazınma (ploughing) mekanizmasının etkin olduğu bir kesme gerçekleşecektir. Geleneksel frezeleme işlemlerinde ilerlemenin düşürülmesi ile elde edilen yüzeyin ve geometrinin kalitesinin iyileşmesi durumu beklenirken, mikro frezelemede minimum talaş kalınlığı etkisinden dolayı aksi durumlar oluşmaktadır. Düşük ilerleme değerlerinde minimum talaş kalınlığı ve malzemenin elastik davranışının etkisi, kesme kuvvetlerinin artmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olur.[4-9]

Bu gibi sebepler araştırmacıları mikro işlemeye özgü süreç modellemeleri geliştirmeye yöneltmiştir. Araştırmacılar mikro frezelemenin temel prensiplerini göz önünde bulundurarak, kuvvet ve yüzey oluşumu ile ilgili modelleme çalışmaları yapmakta ve konu ile ilgili geliştirmeler devam etmektedir. Literatürde çeşitli yaklaşımlar ile mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunu modelleme çalışmaları yer almaktadır. Vogler vd.

yaptığı çalışmalarda, mikro freze takımını geometrik olarak modelleyerek minimum talaş kalınlığı etkisini vektörel olarak hesaba katarak yüzey oluşumu modeli geliştirmiş, ferrit ve perlit malzemeler üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir. Minimum talaş kalınlığının mikro frezelemede yüzey oluşumu karakteristiğine temel neden olduğunu saptamışlardır.[13] Elkaseer vd. yaptıkları çalışmada geometrik olarak modelledikleri mikro freze takımı ve malzeme mikro yapı özelliklerini göz önünde bulundurarak mikro frezelemede yüzey oluşumunu modelleme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.[14] Li vd. takım aşınması minimum talaş kalınlığı ve takım geometrisini inceleyerek mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunu incelemiştirler.[15] Wang vd. tane yapısının yüzey oluşumuna etkilerini incelemiştirler.[16]

2. AMAÇ

Geleneksel talaşlı imalat işleminde, sadece takım ve proses geometrisinin baz alınması, isabetli bir yüzey modeli geliştirilmesi için yeterli olabilmekte iken, talaş kaldırma sürecinin geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine göre oldukça farklılaştığı mikro talaşlı imalat proseslerinde yeterli olamamaktadır. İşlem sırasında talaşın oluşmasını belirleyen minimum talaş kalınlığı prensibinin, oluşturulmak istenen modele dahil edilmesi modelin doğruluğu açısından çok önemlidir. Bu nedenle yapılan çalışmada, minimum talaş kalınlığı etkisinin dahil edildiği, mikro talaş kaldırma sürecinin temelleri ile takım ve proses geometrisinin ilişkilendirildiği, işlenmiş taban alın yüzeyinin pürüzlülüğünü öngörebilecek bir model geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen model ile alın mikro parmak freze takım ile işlenen malzeme yüzeyinin, takım ilerleme yönündeki merkez profil çizgisi üzerindeki yüzey pürüzlülüğü değerinin öngörülmesi amaçlanmıştır.

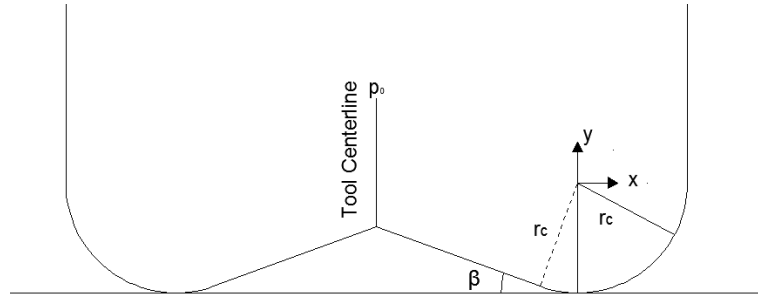
3. YÜZEY OLUŞUM MODELİ

Talaşlı imalatta, işlenen yüzeyin yapısı, kullanılan kesici takımın geometrisi ile direkt olarak ilişkilidir. Takım ve malzeme etkileşimi sonucu yüzeyde takım geometrisine bağlı karakteristik izler oluşmaktadır. Bu nedenle yüzey modelinin geliştirilebilmesi için kesici takım geometrisinin incelenmesi çok önemlidir. Aşağıdaki resimde mikro alın parmak freze takımının kesici ağzının mikroskop görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2 : Mikro freze takımının kesici ağzının mikroskop görüntüsü

Şekilde görüldüğü gibi, mikro freze takımının köşesinin sivri bir kesişimden ziyade, yarıçap oluşturduğu görülmektedir. Buna ek olarak, takımın taban yüzey profilinin düz olmadığı, kırılma kuyruğu profilinde olduğu görülmektedir. Takım malzeme ile etkileşime girdiğinde, malzeme yüzeyinde takımın bu profilinin iz bırakacağı düşünüldüğünde takım kesici ağız profilinin geometrisinin formülize edilmesi geliştirilecek yüzey modelindeki hesaplamalarda kullanılabilme açısından önemlidir.

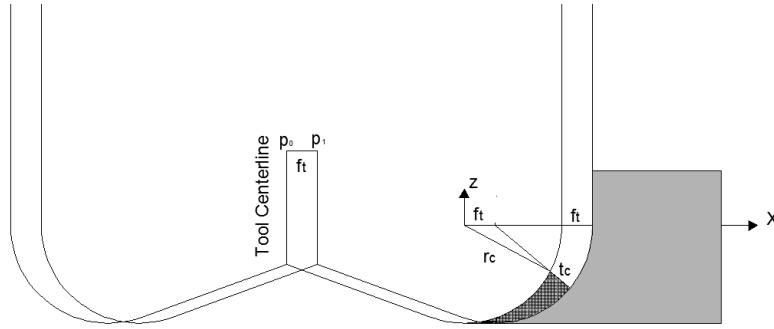


Şekil 3 : Takım profilinin matematiksel ifadesi [13-14]

$$y(x) = \begin{cases} -\sqrt{r_c^2 - x^2}; & x > -r_c \sin \beta \\ -r_c \cos \beta - [x + r_c \sin \beta] \tan \beta; & x \leq -r_c \sin \beta \end{cases} \quad (1)$$

Freze takımında kesici kenar, köşe yarıçapı ve taban kesici ağızları da bir yarıçap değerine sahip olacağından, minimum talaş etkisi bütün kesme bölgelerinde etkili olacaktır. Yukarıda belirtildiği gibi, minimum talaş kalınlığı ve ilerleme, mikro frezeleme işleminde yüzey oluşumunun temel parametreleridir. Kesme hızı ve kesme derinliği gibi faktörler yüzey oluşumuna ilerlemeye kıyasla daha az etkide bulunmakta, meydana getirdikleri etki de daha çok sıcaklık, şekil değişim hızı etkisi gibi özelliklerden ötürü süreçte etkileşim halindeki malzemenin mekanik davranışına etkimektedir (sıcaklık etkisi ile malzemenin daha sünek davranması, şekil değişim hızı artışı ile malzemenin elastisitesinin azalması gibi).[17] Bu nedenle bu parametrelerin etkisi proses geometrisinden çok minimum talaş kalınlığı noktasında belirleyici olmaktadır. Bu nedenle yüzey modelinde referans alınacak parametreler temel olarak geometri, ilerleme ve minimum talaş kalınlığıdır.

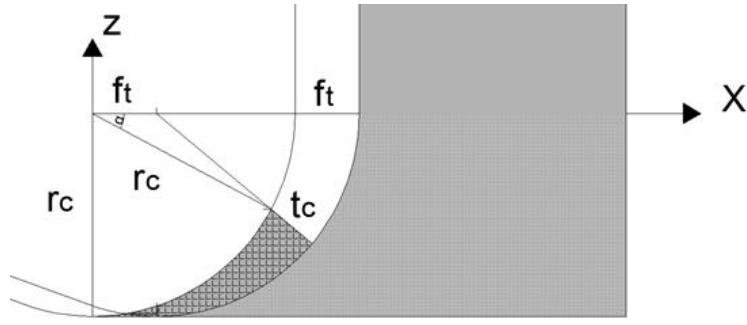
Mikro frezeleme işleminde, takım-malzeme etkileşimi geometrisi düşünüldüğünde köşe yarıçapından dolayı talaş kalınlığı değişiklik gösterecektir. Aşağıdaki resimde takımın malzeme ile etkileşime girmesi örneklendirilmiştir.



Şekil 4 : Takım kesme sürecinde malzeme ile etkileşimi

Şekilde görüleceği gibi, takım parça içerisinde f_t dış başı ilerleme değerinde ilerlediğinde kesici kenarlar ile temas halinde olan talaş kalınlığı takımın r_c ile adlandırılan köşe yarıçapından dolayı değişiklik göstermektedir. Mikro kesme işlemindeki minimum talaş kalınlığı prensibini düşündüğümüzde, minimum talaş kalınlığı olan t_c değerinden daha düşük talaş kalınlıklarında malzeme elastik-plastik şekil değişimine uğrayacak ve talaş oluşumu gözlemlenmeyecektir. Bundan dolayı şekilde gösterildiği gibi t_c değerinden düşük olan talaş kalınlıkları talaş olarak yüzeyden kaldırılamayacak ve yüzeyde kalacaktır. Bu malzeme kalıntıları, işlenen yüzeyin profilini oluşturacaktır. Yüzey oluşumu modelinin oluşturulması için, kalıntı geometrilerinin, takım ve süreç geometrilerinin hesaplanması gerekmektedir.

Aşağıdaki şekilde takımın geçişi sonucu talaş olarak kaldırılan ve kazınmaya uğrayarak yüzeyde kalıntı olarak kalan bölgeler görülmektedir. Takım ile etkileşime giren malzeme bölgesinde t_c minimum talaş kalınlığının sağlandığı bölgeler ve sağlanmadığı bölgeler arasında bir sınır oluşmaktadır. Bu sınır takımın kesici kenar yarıçapı ile ilişkili olan minimum talaş kalınlığı değeridir. Kesme bölgesinin geometrisi incelendiğinde bu değerin sağlandığı nokta takım köşe yarıçapının x eksenine yaptığı noktada gerçekleşecektir.

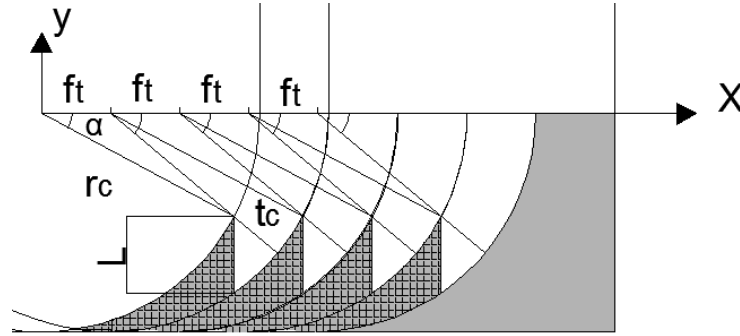


Şekil 5 : Minimum talaş kalınlığı sınırı

Minimum talaş kalınlığı sınırının açısı olan α değerinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(-\frac{(r_c - t_c)^2 - f_t^2 - r_c^2}{2f_t r_c} \right) \quad (2)$$

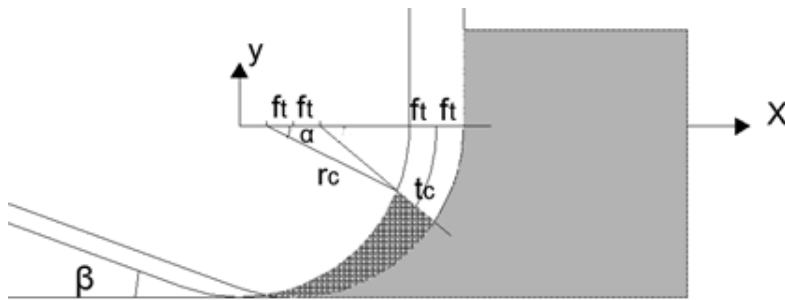
α açısı ile hesaplanan kalıntı malzeme bölgesinin tepe noktası, takımın bir f_t ilerleme değeri kadar ilerlediğinde etkileşime gireceği talaş alanı ile dikey olarak birleştirilerek yinmeli bir şekilde hesaplanırsa aşağıdaki gibi yüzey profili oluşacaktır.



Şekil 6 : Model ile oluşturulan yüzey profili

Şekilde görüldüğü gibi α açısı ile hesaplanan kalıntı malzeme bölgesinin tepe noktası ile takımın bir f_t ilerleme değeri kadar ilerlediğinde etkileşime gireceği talaş alanı arasındaki dik L mesafesi, oluşan yüzey profilindeki en üst ve en alt sınırlar arasındaki maksimum mesafeyi yani R_t değerini temsil etmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi, minimum talaş kalınlığı mikro frezeleme işleminde talaş oluşumunu belirleyen temel kriterdir. Bu nedenle diş başına ilerleme değerinin minimum talaş kalınlığından küçük olduğu durumlarda, ilk ilerleme değerinde talaş oluşumu gözlenmeyecektir. Takım ilerleme hareketine devam edip minimum talaş kalınlığına ulaştığı noktada talaş oluşumu başlayacaktır. Aşağıdaki resimde bu durum örneklenmiştir.



Şekil 7 : Diş başına ilerleme değerinin minimum talaş kalınlığı değerinden küçük olduğu kesme süreci

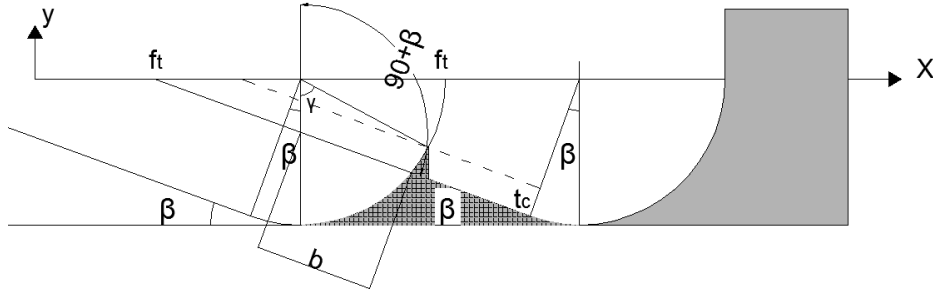
Şekilde görüldüğü gibi, ilk ilerleme değerinde minimum talaş kalınlığı sağlanamamış, takım ikinci ilerleme hareketini yaptığında yeterli talaş kalınlığı sağlanmıştır. Bu yaklaşım ile, yüzeyde kalıntı olarak kalan malzeme geometrisi periyodik olarak hesaplanarak yüzey profilini oluşturmak mümkündür. Aşağıda yüzey profilinin matematiksel ifadesi yer almaktadır.

$$y_{profil} = \begin{cases} y = r_c - \sqrt{r_c^2 - x^2} & r_c \cos \alpha - f_t \times n_{ft} < x \leq r_c \cos \alpha \\ y = r_c - \sqrt{r_c^2 - (x - f_t \times n_{ft})^2} & r_c \cos \alpha < x \leq f_t \times n_{ft} + r_c \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

Formüldeki n_{ft} değeri, talaş oluşumunun kaçınıcı ilerleme hareketinde meydana geldiğini ifade etmektedir. Modelde α açısı, minimum talaş kalınlığının sağlandığı sınırın açısı idi. Bu nedenle, α açısının hesaplanabildiği ilerleme sayısı n_{ft} değerine eşit olacaktır. Oluşan yüzey profilinde, maksimum alt ve üst nokta arası mesafe olan L değeri de aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Bu değer aynı zamanda R_t değerine eşit olmaktadır.

$$R_t = L = \sqrt{r_c^2 - (r_c \cos \alpha - f_t \times n_{ft})^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_c \cos \alpha)^2} \quad (4)$$

Bu noktaya kadar, modelleme çalışmalarında, iş parçası ile takımın köşe radyusunun etkileşime geçtiği durumları incelenmiştir. Ancak, takımın geometrisinden ötürü, ilerleme değerinin yüksek olduğu durumlarda, takımın köşe radyusunun yanında alt kısımlarında malzeme ile etkileşime geçtiği durumlar meydana gelecektir.



Şekil 8 : Diş başına ilerlemenin takım köşe radyusu sınırlarından büyük olduğu kesme süreci

Yukarıdaki resimde yüksek ilerleme değerlerinde, takımın alt yüzeylerinin malzeme ile etkileşime geçtiği durumlar örneklendirilmiştir. Takımın geometrisinin matematiksel ifadesinde, köşe radyusu toplamda $90+\beta$ açısında bir yay şeklindedir. Buradan hareketle, talaş oluşum sınırını belirleyen α açısı, köşe radyusu yay açısından büyük olduğu durumlarda, takımın alt kısımlarının da malzeme ile etkileşime geçtiğini söyleyebiliriz. Şekilde görüldüğü gibi, takım alt yüzeyi, köşe radyusundan sonra açılı doğru şekilde devam eden bir geometridir. Bu kısımda takımın diğer kesici ağızları ile aynı kesici kenar radyusuna sahip olduğu düşüncesi ile hareket edilirse, minimum talaş kalınlığı etkisi bu noktalarda da geçerli olacaktır. Şekilde görüldüğü gibi, minimum talaş kalınlığından ötürü yüzeyde kalıntı malzemenin sınırını belirleyen γ açısıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$r_c^2 = (r_c - \sin \beta f_t - t_c)^2 + b^2 - 2(r_c - \sin \beta f_t - t_c) b \cos(90 + \beta) \quad (5)$$

$$b^2 = (r_c - \sin \beta f_t - t_c)^2 + r_c^2 - 2(r_c - \sin \beta f_t - t_c) r_c \cos \gamma \quad (6)$$

Denklemler çözüldüğünde:

$$\gamma = \cos^{-1} \left(-\frac{(r_c - \sin \beta f_t - t_c)^2 - b \cos(90 + \beta)}{r_c} \right) \quad (7)$$

γ açısı ile yüzey profili matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$y_{profil} = \left\{ \begin{array}{ll} y = r_c - \sqrt{r_c^2 - x^2} & 0 < x \leq r_c \sin \gamma \\ y = (f_t - x) \sin \beta & r_c \sin \gamma < x \leq f_t - r_c \sin \beta \\ y = r_c - \sqrt{r_c^2 - (x - f_t)^2} & f_t - r_c \sin \beta < x \leq f_t \end{array} \right\} \quad (8)$$

Oluşan yüzey profilinde, maksimum alt ve üst nokta arası mesafe olan L değeri de aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Bu değer aynı zamanda Rt değerine eşit olmaktadır.

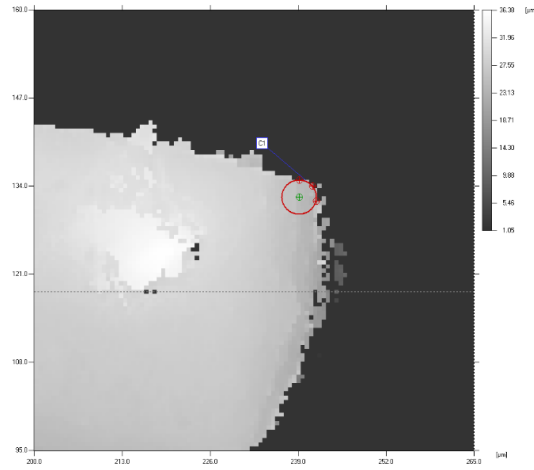
$$Rt = L = r_c - \sqrt{r_c^2 - (r_c \sin \gamma)^2} \quad (9)$$

4. YÜZEY OLUŞUM MODELİNİN DENEYSEL VERİLER İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Yüzey modelinin deneysel veriler ile karşılaştırılması amacıyla, Ti6Al4V titanyum alaşımı üzerinde, kesme sıvısı kullanılarak, 0.5 mm çapındaki düz mikro freze takımı ile 15 µm kesme derinliğinde ve 30000 d/d da 8 farklı diş başına ilerleme değerlerinde kanal frezeleme işlemi gerçekleştirilerek, oluşan yüzey profili ölçülecektir. Elde edilen sonuçlar geliştirilen model ile karşılaştırılacaktır. Geliştirilen model ile hesaplamaların yapılabilmesi için takımın geometrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yüzey mikroskobu ile takımın kesici kenar yarıçapı ve köşe yarıçapı değerleri ve takım taban açısı ölçülmüştür.

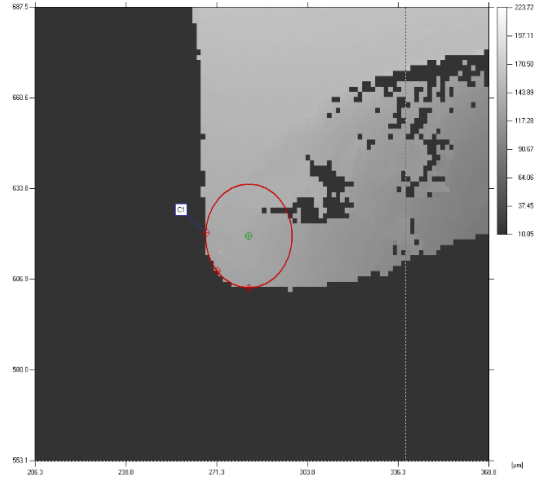
Tablo 1: Kesme Parametreleri

Kesme Hızı (d/d)	Kesme Derinliği (µm)	Diş Başına İlerleme (µm)
30000	15	0,25
		0,5
		1
		1,5
		2
		2,5
		3
		3,5



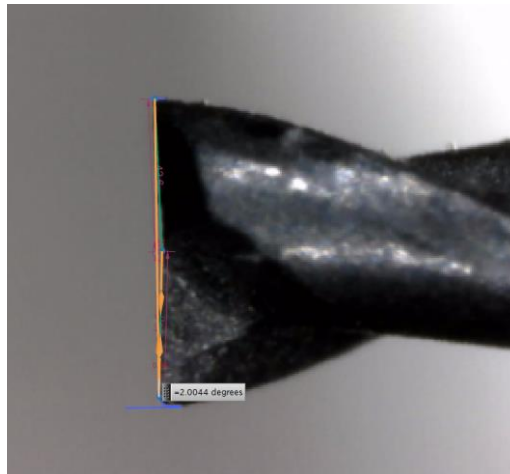
Şekil 9 : Takımın kesici kenar radyusunun ölçülmesi

Yapılan ölçümler neticesinde takımın kesici kenar radyusunun yaklaşık olarak 2,5 µm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 10 : Takımın köşe radyusunun ölçülmesi

Yapılan ölçümlerde köşe radyusunun yaklaşık olarak 2 µm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11 : Takımın taban açısının ölçülmesi

Yapılan ölçümlerde alt kesici kenar açısının yaklaşık olarak 2 derece olduğu belirlenmiştir.

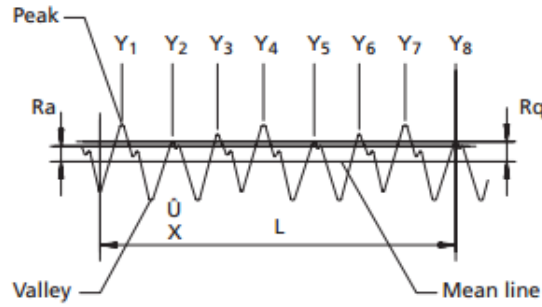
Geliştirilen model ile hesaplamaların gerçekleştirilebilmesi için, minimum talaş kalınlığı değerinin bilinmesi gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda minimum talaş kalınlığı değerinin iş parçası malzemesine ve takım özelliklerine bağlı olarak, kesici kenar yarıçapının 0,20-0,40 katları arasında değerler aldığı, bakır ve alüminyum malzeme ile yapılan çalışmalarda 0,05 katı kadar olduğu, ferrit ve perlit malzemelerde yapılan test ve modellemelerde 0,13-0,43 katları arasında kadar değerler aldığı görülmektedir.[10,11,13] Minimum talaş kalınlığı oranı iş malzemesi, malzeme, takım malzemesi ve kaplama tipi, kesme koşulları gibi etkenlerden etkileneyeceği düşünüldüğünde, bu değer net olarak bulunması için modelleme çalışmalarından, deneysel çalışmalardan ve sonlu eleman analizlerinden faydalanabilir. Bu çalışmada, minimum talaş kalınlığı için katsayı değeri 0,16 olarak seçilmiştir. Bu koşullarda minimum talaş kalınlığı değeri:

$$t_c = 2,5 \times 0,16 = 4 \mu\text{m} \quad (10)$$

Olarak hesaplanmıştır.

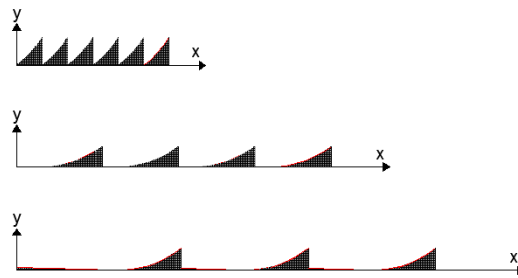
Deneysel sonuçlar ile karşılaştırılabilmesi amacıyla, geliştirilen model ile, belirtilen ilerleme değerleri için yüzey profilleri hesaplanacaktır. Oluşturulan yüzey profillerinde geometrik olarak birbirini yineleyen profil belirlenerek R_t ve R_a yüzey pürüzlülük parametreleri hesaplanacaktır. R_a değeri aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (11)$$



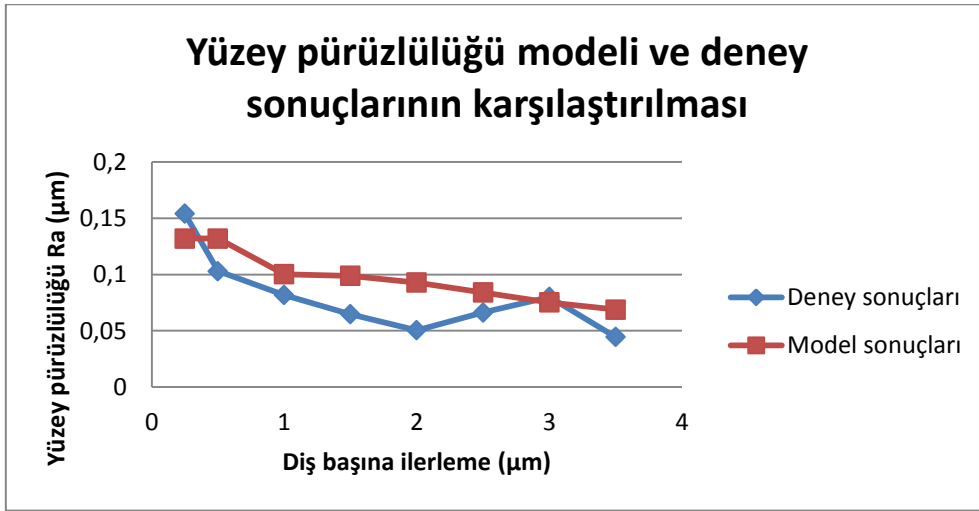
Şekil 12: Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri R_a

Geliştirilen model ile oluşturulan işlenmiş yüzey profil örnekleri aşağıdaki resimde görülmektedir.



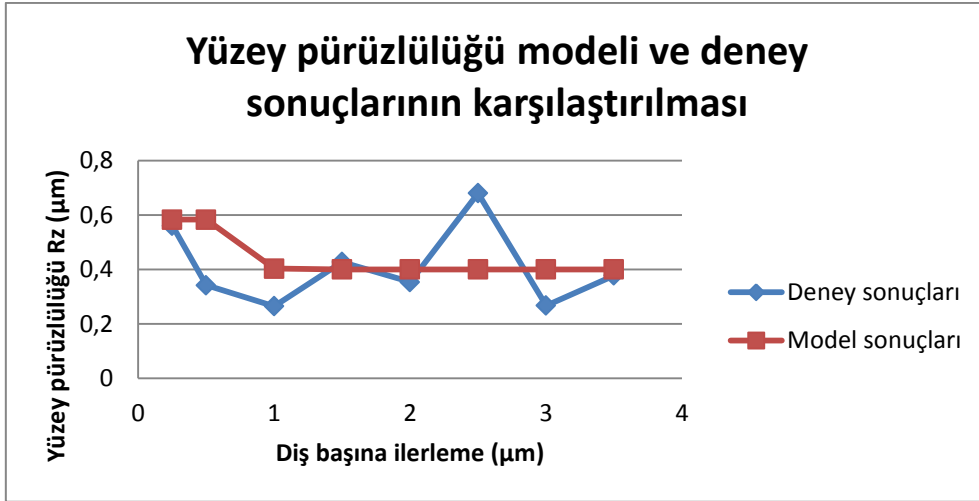
Şekil 13: Geliştirilen model ile oluşturulan yüzey profilleri (Yukarıdan aşağıya; 0,5 µm, 1,5 µm ve 2,5 µm diş başına ilerleme)

Aşağıdaki grafikte, yüzey pürüzlülüğü R_a değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırması yer almaktadır.



Şekil 14 : Yüzey pürüzlülüğü Ra değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Yukarıdaki grafikte görüldüğü gibi, geliştirilen model, deneysel sonuçlarla elde edilen değerlere yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 15 : Yüzey pürüzlülüğü Rz değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Yukarıdaki grafikte, yüzey pürüzlülüğü Rz değerlerinin modellenen ve deneysel sonuçlarının karşılaştırması yer almaktadır. Geliştirilen modelde yüzey profilinin en üst ve en alt noktaları arasındaki mesafe olan Rt değeri hesaplanmıştır. Ancak modellenen Rt değerinin yüzeyde ölçülen Rt değeri ile karşılaştırılması çok isabetli bir yaklaşım olmayacaktır. Bunun nedeni, optik olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğünde, yüzeyde oluşabilecek teorik yaklaşımın dışındaki bir aşırı malzeme kalıntısı, çapak ya da talaş kalıntısının, bütün yüzey boyunca tek bir değere tekabül eden Rt değeri ile modellenen değer arasında aşırı fark gösterebileceğidir. Bu nedenle yüzeyde kalıntı malzemenin oluşturduğu maksimum yükseklik kıyaslanırken, yüzey profilinde en büyük 5 tepe-çukur noktası mesafesinin ortalaması değeri olan Rz değeri kullanılacaktır. Geliştirilen modelde yüzey profili tekrar eden bir şekilde oluşturulduğu için Rt değeri Rz değerine eşit olacaktır. Rz değerlerinin karşılaştırıldığı grafik incelenecek olursa, geliştirilen yüzey modelinin, deneysel sonuçlarla yakın değerler verdiği görülmektedir. Yüzeyde talaş oluşumu sınırı olarak minimum talaş kalınlığı değeri baz alındığı için ilerleme değerinin artması ile birlikte, kalıntı malzeme yüksekliği minimum talaş kalınlığı değeri olan 4 µm'de sabit kalmaktadır. Buradan yola çıkarak, mikro frezeleme işleminde daha iyi yüzey kalitesi elde etmek için düşük minimum talaş kalınlığı değerinin sağlanacağı; daha keskin yani düşük kesici kenar radyuslu takım, kesme bölgesinin soğutulması malzemenin ısı ile daha sünek hale gelmesinin önüne geçilmesi, kesme hızının mümkün olduğunca yüksek tutularak, yüksek şekil değiştirme hızı sağlanarak malzemenin daha az sünek davranış göstermesinin sağlanması gibi durumlar göz önüne alınmalıdır.

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, mikro frezeleme işleminde taban yüzey pürüzlülüğünü hesaplanması amacı ile minimum talaş kalınlığı – kazınma prensipleri ile proses geometrisi ilişkilendirilerek matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model oluşan taban yüzeyinin Rz ve Ra değerlerini yakın olarak hesaplayabilmektedir. Modelin doğru sonuç verebilmesi hususunda en kritik değişken minimum talaş kalınlığı değeridir. Yapılan hesaplamalarda tahmini olarak seçilen minimum talaş kalınlığı değeri ile yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. İş malzemesi, takım malzemesi ve kesme şartlarına göre iyi kalibre edilmiş minimum talaş kalınlığı değeri ile model çok daha doğru sonuçlar verecektir. Geleneksel frezelemeden farklı olarak mikro frezeleme işleminde, ilerleme artışı ile minimum talaş kalınlığı etkisinin azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana gelmesi beklenmektedir. Geliştirilen modelde de bu eğilim gözlemlenmiştir.

6. SEMBOLLER

f_t	: Diş Başına İlerleme
t_c	: Minimum talaş kalınlığı
r_c	: Takım köşe yarıçapı
d/d	: Devir/dakika
R_a	: Yüzey pürüzlülüğü, aritmetik ortalama sapma
R_t	: Ölçülen yüzey boyunca maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamı
R_z	: Ölçülen yüzeyde 5 adet en yüksek ve 5 adet en alçak noktanın ortalaması
L	: Yüzeydeki kalıntı malzemenin maksimum yüksekliği
n_{ft}	: Talaş oluşumunun gerçekleştiği ilerleme periyodu
α	: Kesici takım köşesi için minimum talaş kalınlığı sınır açısı
β	: Takım taban yüzeyi açısı
γ	: Kesici takım alt yüzeyi için minimum talaş kalınlığı sınır açısı

7. TEŞEKKÜR

Bu çalışma 112M930 proje numaralı, ‘‘Mikro Frezeleme İşlemlerinin Modelleme ve Deneysel Yöntemler Aracılığı ile İncelenmesi ve Endüstriyel Uygulamalar İçin Verim Arttırıcı Yöntemler Geliştirilmesi’’ başlıklı Tübitak projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Teşekkür ederiz.

8. KAYNAKLAR

- [1] Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Yang, S., Cooke, K.E., Teer, D.G. 2008, "Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, Pages 1578–1584.
- [2] Liu X., DeVor R.E., Kapoor S.G., 2004, "The mechanics of machining at the microscale: assessment of the current state of the science", *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* Volume 126, Pages 666–678.
- [3] Ozel T., Lui X., Dhanorker A., 2007, "Modelling and simulation of micro-milling process", *Proceedings of the Fourth International Conference and Exhibition on design and production of machines and Dies/Molds*. Cesme, Turkey.
- [4] Malekiana M., Mostofaa M.G., Parka S.S., 2012, "Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 212, Pages 553-559.
- [5] CHAE J., Park S.S., Freiheit T., 2006, "Investigation of micro-cutting operations", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 46, Pages 313–332.
- [6] Yang K., Liang Y., Zheng K., Bai Q., Chen W., 2011, "Tool edge radius effect on cutting temperature in micro-end-milling process", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Volume 52, Pages 905–912.
- [7] Weule H., Huntrupl V., Tritschlerl H., 2001, "Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 50, Pages 61-64.
- [8] Filiz S., Conley M.C., Wasserman M.B., Ozdoganlar O.B., 2007, "An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Volume 47, Pages 1088-1100.
- [9] Ng C.K., Melkotea S.N., Rahman M., Kumarba S., 2006, "Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 46, Pages 929-936.
- [10] Shimada, S., Ikawa, N., Tanaka, H., Ohmuri, G., Uchikoshi, J., Yoshinaga, H., 1993, "Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 42, Pages 91–94.
- [11] Yuan, Z. J., Zhou, M., and Dong, S., 1996, "Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultraprecision Machining", *J. Mater. Process. Technol.*, Volume 62, Pages 327–330.
- [12] Li C., Lai X., Li H., Ni J., 2007, "Modeling of three-dimensional cutting forces in micro-end-milling", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 17, Pages 671–678.
- [13] Vogler M.P., DeVor R.E., Kapoor S.G., 2004, "On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, part I: surface generation", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Volume 126, Pages 685–694.
- [14] Elkaseer A. A. M., Dimov S. S., Popov K. B., Negm M., Minev R., 2012, "Modeling the Material Microstructure Effects on the Surface Generation Process in Microendmilling of Dual-Phase Materials", *J. Manuf. Sci. Eng.*, Volume 134.
- [15] Li H., Xinmin L., Chengfeng L., Jie F., Jun N., 2008, "Modelling and experimental analysis of the effects of tool wear, minimum chip thickness and micro tool geometry on the surface roughness in micro-end-milling", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 18.
- [16] Wang J. S., Gong Y.D., Abba G., Chen K., Shi J.S., Cai G.Q., 2007, "Surface generation analysis in micro end-milling considering the influences of grain", *Microsystem Technologies*, Volume 14, Pages 937-942.
- [17] Hatipoglu E., Budak E., 2014, "Mikro frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey ve talaş oluşumuna etkisinin deneysel olarak incelenmesi", 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2014), Bursa, Türkiye: Uludağ Üniversitesi.

MİKRO FREZELEME İŞLEMİNİN 3 BOYUTLU SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Irfan Uçun^a, Kubilay Aslantas^a, Adem Cicek^b Ekrem Özkaya^c

*a, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği
03200 Afyonkarahisar, Türkiye*

*b, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği,
06520 Ankara, Türkiye*

c, Institute of Machining Technology, TU Dortmund Baroper Straße 301, D-44227, Dortmund, Germany.

Özet

Yapılan bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezeleme işleminin 3 boyutlu nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan analiz sonuçları deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Nümerik ve deneysel çalışmalar boyunca 0,5 mm çapa sahip kaplamasız karbür takım kullanılmıştır. Çalışmalar üç farklı ilerleme hızı (2; 3 and 4 µm/diş) sabit bir kesme derinliği (0,1 mm) ve kesme hızında (15 m/dk) gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerde iş parçasının termo mekanik davranışlarının analizi Johnson-Cook malzeme modeli dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizler boyunca kesme kuvveti ile talaş oluşumu süreci tahmin edilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre nümerik ve deneysel sonuçlar arasında önemli bir uyumun olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ilerleme hızına bağlı olarak kesme kuvvetleri ve talaş kıvrılma çapında bir artış meydana gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sonlu elemanlar analizi; Mikro frezeleme, Talaş oluşumu; Ti-6Al-4V alaşımı.

3D FINITE ELEMENT ANALYSIS OF MICRO MILLING

Abstract

In this study, 3D numerical analysis of the micro milling of Ti-6Al-4V was carried out. However, the numerical analysis results were compared with the experimental results. During numerical and experimental studies, uncoated tools having 0.5 diameter were used. The studies were carried out for three different feed rates (2; 3 and 4 µm/tooth) and a constant depth of cut (0.1mm) and cutting velocity (15 m/min). in the numerical analysis, The Johnson-Cook material model was used to numerically investigate the thermo-mechanical behavior of the workpiece. In the numerical analysis the cutting force and chip formation were estimated and compared with the experimental results. The results of the simulation in this study shows that the experimental cutting force and chip shapes are in harmony with the numerical results. Besides, it is seen that there is an increase in cutting force, cutting temperature and stress values depending on the feed rate.

Keywords: Finite element analysis, Micro miling, Chip formation, Ti-6Al-4V alloy.

1. GİRİŞ

İmalat sektöründeki ilerlemelerle birlikte ortaya çıkan boyutları küçültülmüş ve hassas olarak üretilmiş ürünler pek çok sektörün (tıp, havacılık vb.) ilgisini çekmektedir. Bu yüzden bu ürünlerin imalatı için kullanılan mikro imalat yöntemleri popüler hale gelmiştir. Mikro frezeleme, minyatür ürün imalatında sıklıkla tercih edilen mikro imalat yöntemlerinden birisidir. Bu imalat yöntemi diğer yöntemlerle (Micro EDM, LBM, EBM vb) karşılaştırıldığında imalat hızı ve maliyet açısından önemli bir avantaja sahiptir [1-3].

Mikro frezeleme, genel olarak konvansiyonel frezeleme işlemine benzemekle birlikte, bir takım farklılıklar taşımaktadır. Bu farklılıklar pek çok araştırmacının dikkatini çekmiştir. Yapılan araştırmalar gerek mikro ve makro frezeleme arasındaki proses farklılıklarını, gerekse de mikro frezeleme işleminin verimini artırmak için deneysel nümerik ve analitik yaklaşımlar kullanılarak çözüm aramışlardır [3-7].

Talaşlı imalat proseslerinin sonlu elemanlar analizi kesme işleminin performansının test edilmesinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden bir tanesidir [8-10]. Sonlu elemanlar analiziyle gerçek kesme koşulları çeşitli varsayımlarla simule edilerek kesme işlemi hakkında bilgi toplanmaktadır. Bunun için kesme işlemi boyunca meydana gelen kesme kuvveti, sıcaklık, takımda meydana gelen aşınma, iş parçasındaki çapak oluşumu ve talaş oluşumu gibi imalat çıktıları tahmin edilebilmektedir. Bununla birlikte, deneysel olarak tespiti oldukça zor olan takımdaki gerilmeler de sonlu elemanlar analiziyle tahmin edilebilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin mikro frezeleme işleminde de kullanıldığı görülmektedir[9-11]. Kesme kuvvetleri, takım aşınması, kesme sıcaklığı, minimum talaş kalınlığı gibi parametreleri bu yöntem yardımıyla tahmin edilmektedir [9-13]. Yapılan bir çalışmada mikro frezeleme işleminden yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için minimum talaş kalınlığına bağlı bir yüzey oluşum modeli geliştirilmiştir. Çalışmada farklı mikro yapısal özelliklere sahip malzemeler için minimum talaş kalınlığı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir[12]. Yang ve diğerlerinin [9] yapmış oldukları diğer bir çalışmada mikro frezeleme işlemi boyunca kesme sıcaklığı üzerinde kesici kenar radiusunun etkisi nümerik olarak modellenmiştir. Bir başka çalışmada Thepsonthi ve Özel [13] tarafından gerçekleştirilmiştir. Onların çalışmasında mikro frezeleme işlemi 3 boyutlu olarak modellenmiş ve meydana gelen takım aşınması, talaş geometrisi sıcaklık oluşumu tahmin edilmiştir. Ayrıca takımın aşındığı varsayımı ile aşınmanın kesme işlemini verimi üzerindeki etkisi simule edilmiştir.

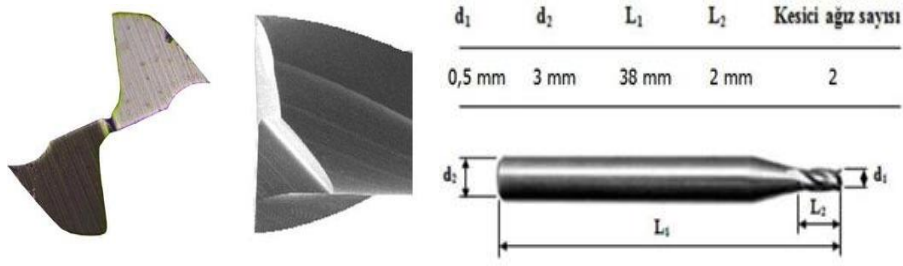
Mikro frezeleme işleminde, CBN kaplı takımın performansının sonlu elemanlar analizi ile test edilmesi yine Özel ve diğerleri [11]) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda kaplanmış takımındaki kenar radiusünün artmasıyla birlikte kesme kuvvetinde de bir miktar artış görülmüştür. Jin ve Altıntaş [10] sonlu elemanlar analizinde elde edilen kesme kuvveti katsayılarını kullanarak mikro frezeleme işlemi sırasında oluşan kesme kuvvetlerini tahmin etmişlerdir.

Yapılan bu çalışmada ise, Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezeleme işleminin 3 boyutlu nümerik analizi farklı ilerleme miktarı değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerden elde edilen kesme kuvveti ve talaş geometrileri deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Böylece nümerik analizde kullanılan malzeme modeli ve sınır şartlarının kabul edilebilir sınırlarda olduğu tespit edilmiştir.

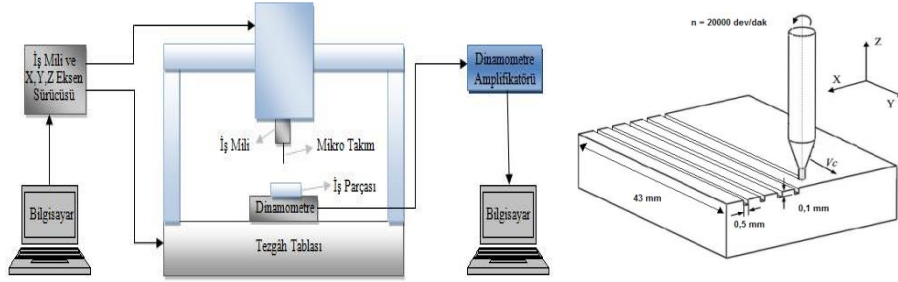
2. MATERYAL VE METOT

Deneysel proses

Yapılan çalışmanın deneysel aşamasında, endüstride yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı iş parçası malzemesi olarak tercih edilmiştir. Mikro frezeleme işlemleri 0,5 mm çapa sahip kaplamasız karbür takımlarla 2, 3, 4, µm/diş ilerleme hızları 0,1 mm sabit kesme derinliği ile 15 m/dk sabit kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kesici takıma ait geometrik özellikler Şekil 1' de verilmektedir. Kesme işlemleri boyunca kuvvet ölçümleri gerçekleştirilmiş ve oluşan talaş şekilleri elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Kesme işlemleri sırasında oluşan kuvvetler Kistler 9119AA1 tipi mini dinamometre yardımıyla ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan deney düzeneğine ait resim ve şematik görüntü Şekil 2' de verilmektedir.



Şekil 1. Deneysel çalışmada kullanılan kesici takımın geometrik özellikleri.

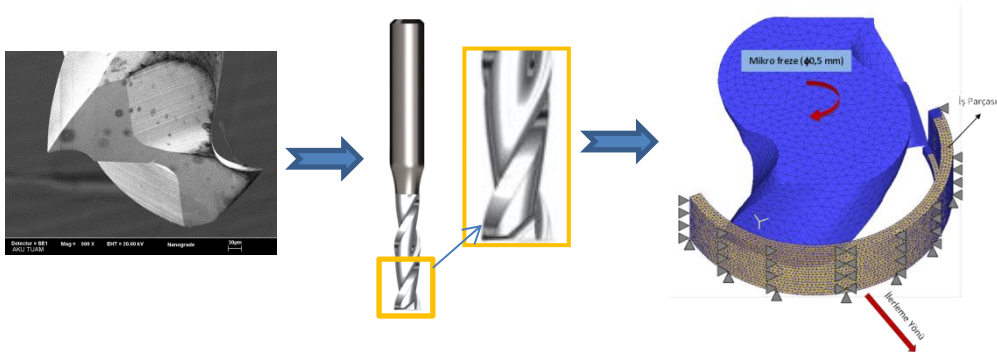


Şekil 2. Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik görüntüsü.

Mikro Frezeleme İşleminin Nümerik Modellenmesi

Yapılan çalışma kapsamında, öncelikle kesici takıma ait geometrik parametreler SEM ve optik mikroskop yardımıyla tespit edilmiş ve kesici takımın katı modeli oluşturulmuştur (Şekil 3). Ardından oluşturulan takım geometrisi Deform3D yazılımına import edilmiştir. Ardından mikro frezeleme işleminde kullanılacak olan iş parçası ve takımın mesh modeli oluşturulmuştur. Bu sayede, mikro frezeleme işlemi boyunca meydana gelen kesme kuvveti, takımda oluşan gerilme ve talaş oluşumu simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar analizleri Intel Xeon 16 çekirdekli işlemciye ve 24 GB belleğe sahip HP marka iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir. Yapılan her bir analiz ortalama 3 hafta da tamamlanmıştır.

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulmasında, 3 boyutlu plastik deformasyon problemlerinin çözümünde kullanılan Deform 3D programı tercih edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde iş parçası rijit-plastik olarak ve takım (mikro freze), rijit olarak modellenmiştir. Ayrıca iş parçası için 200.000-250.000 aralığında kesici takım için ise, 115.000 üçgen prizmatik eleman kullanılmıştır. Simülasyonlar boyunca, remeshing tekniğinden faydalanılarak deformasyonun fazla olduğu bölgelerdeki ağ yapısı daha yoğun ve düzgün bir şekilde yeniden oluşturulmuştur. Mikro frezeleme işleminin üç boyutlu modellenmesinde takım ve iş parçası arasındaki sürtünme koşulları, hybrid bir model kullanılarak tanımlanmıştır. Hybrid model, yüksek takım-iş parçası arayüzey basıncının olduğu bölgede (sticking region) geçerli olan kayma sürtünme faktörü (shear friction factor) ($m=0.9$) ile talaşın takım talaş yüzeyinden kaymaya başladığı (sliding region) bölgede geçerli olan coulomb sürtünme ($\mu=0.7$) faktöründen oluşmaktadır. Ayrıca iş parçası ile takım arasındaki ısı iletimine izin veren ısı iletim katsayısı $10^7 \text{ kWm}^{-2}\text{K}^{-1}$ olarak alınmıştır. Kesme işleminin modellenmesinde kullanılan kesici takım ve iş parçası malzemesine ait bazı mekanik ve termal özellikler Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Mikro frezeleme işleminin sonlu elemanlar modeli

Talaşlı imalat proseslerinin simülasyonunda uygun malzeme modeli ile malzeme modeli katsayılarının kullanılması elde edilen sonuçların doğruluğu açısından önemlidir. Bu çalışmada kullanılan malzeme modeli, plastik deformasyonun söz konusu olduğu durumlarda, iş parçasının deformasyon karakteristiğini tanımlayan Johnson-Cook malzeme modelidir (Denklemler 2.1). Johnson-Cook malzeme modeli temel olarak şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığa bağlı olarak tanımlanan akma gerilmesiyle ifade edilmektedir.

Tablo 1. Sonlu eleman çözümlerinde kullanılan iş parçası ve kesici takıma ait mekanik ve termal özellikler [14].

	Ti-6Al-4V	WC-Co
Elastisite modülü (GPa)	117 (20°C)	
	107 (204°C)	
	95 (426°C)	560
	82 (649°C)	
Termal iletim katsayısı (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	6,9 (-17,7°C)	
	7,44 (93°C)	
	8,65 (204°C)	55
	10,3 (315°C)	
	11,9 (426°C)	
	13,6 (537°C)	
	14,8 (649°C)	
Isı kapasitesi (Nmm ⁻² °C ⁻¹)	2,31 (-17,7°C)	2,08(20°C)
	2,43 (93°C)	2,12(100°C)
	2,54 (204°C)	2,17 (200°C)
	2,66 (315°C)	2,22 (300°C)
	2,83 (426°C)	
	3,09 (537°C)	
	3,38 (649°C)	
	3,8 (760°C)	

$$\sigma = \underbrace{(A + B\varepsilon^n)}_{(1)} \underbrace{\left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)}_{(2)} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right]}_{(3)} \quad (1)$$

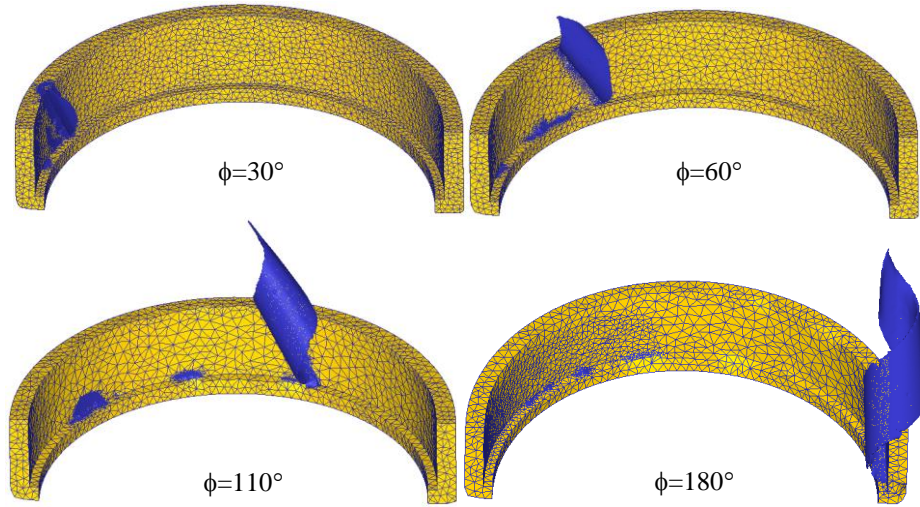
Yukarıda ifade edilen bu analitik ifade, üç fonksiyonun bir araya gelmesiyle elde edilmiştir. Bunlar, (1) malzemenin şekil değiştirme sertleşmesi karakterini, (2) malzemenin şekil değiştirme hızı hassasiyetini ve (3) malzemenin termal yumuşama karakterini tanımlamaktadır. Bu analitik ifadeyi oluşturan fonksiyonlardaki parametreler ise; A , malzeme akma gerilmesi sabitini, B , malzemenin sertleşme modülünü, C , şekil değiştirme hızı hassasiyetini, n , sertleşme katsayısını ve m , ise, malzemenin termal yumuşama katsayısını ifade etmektedir. Bununla birlikte analitik ifade deki diğer bilinmeyenler ise; ε , plastik şekil değiştirmeyi, $\dot{\varepsilon}$, şekil değiştirme hızını (s⁻¹), $\dot{\varepsilon}_0$, referans şekil değiştirme hızını (s⁻¹) tayin etmektedir. Bununla birlikte T , iş parçası sıcaklığını, T_r , oda sıcaklığını, T_m , iş parçası ergime sıcaklığını ifade etmektedir. Malzemeye ait bu katsayılar Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) olarak isimlendirilen deney düzeneğinden elde edilmektedir. Bu deney düzeneği, malzemelerin yüksek hızlardaki şekil değiştirme özelliklerini tanımlamaktadır.

Çalışma boyunca, sonlu elemanlar analizinde kullanılan malzeme modeli için katsayılar literatürde verilen çeşitli çalışmalardan elde edilmiştir. Bu katsayıların deneysel çalışmada kullanılan malzeme için ne kadar uygun olduğu, deneme-yanılma yoluyla tespit edilmiştir. Literatürdeki bazı çalışmalarda kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı için malzeme modeli katsayıları Tablo 2’de verilmektedir. Yapılan ön analizler sonucunda deneysel kuvvet

sonuçlarıyla en iyi uyumu sağlayan katsayıların Çakırcalı vd. (2013)' nin çalışmasında yer alan katsayılar olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 2. Ti-6Al-4V malzemesine ait Johnson-Cook malzeme modeli katsayıları.

	A (MPa)	B(MPa)	n	C	M	ϵ_0 (s ⁻¹)
Lee ve Lin (1998) [15]	782,7	498,4	0,28	0,028	1	1
Seo vd. (2005) [16]	997,9	653,1	0,45	0,0198	0,7	1
Çakırcalı vd. (2013) [17]	928	1062	0,62	0,0167	0,75	0,001
Meyer and Kleponis (2001) [18]	863	331	0,34	0,012	0,8	1
Kay (2003) [19]	1098	1092	0,93	0,014	1,1	1



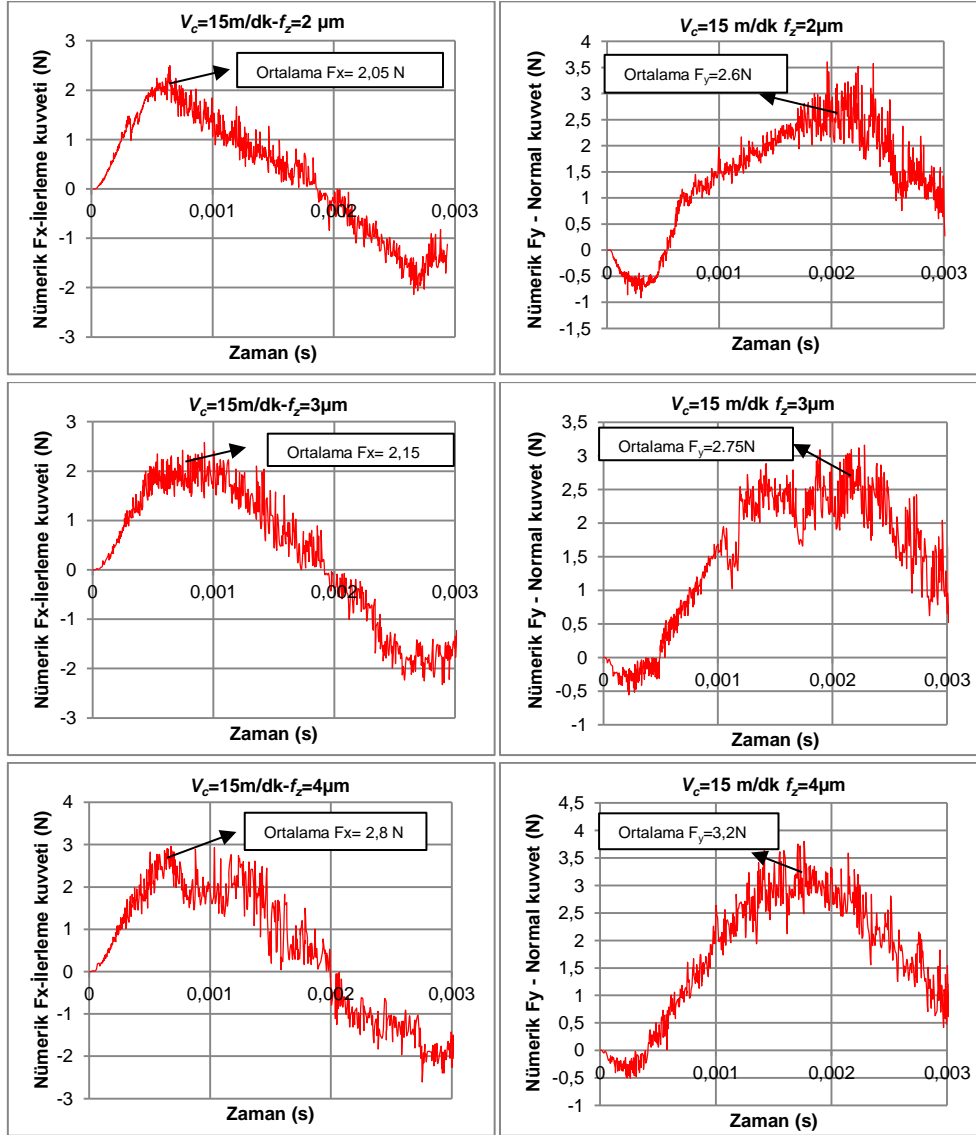
Şekil 4. Mikro frezeleme işleminin nümerik analizinde meydana gelen talaş oluşum aşamaları.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1 Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

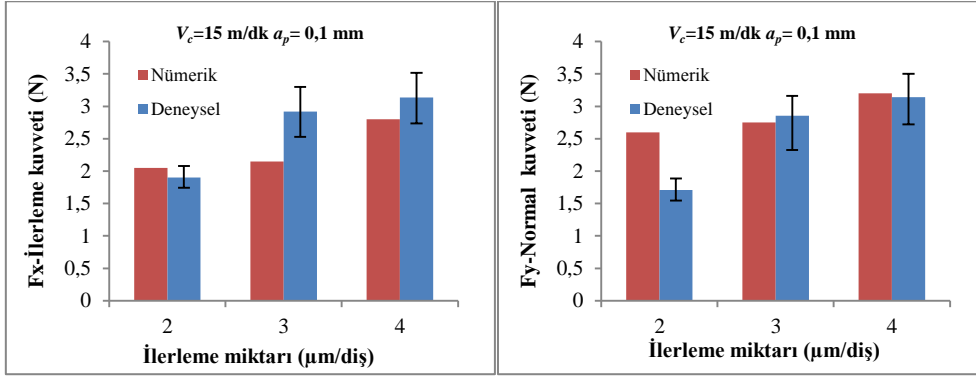
Yapılan nümerik çalışma sonunda, ilerleme hızına bağlı olarak meydana gelen ilerleme ve normal kuvvet değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Grafiklerde öne çıkan ilk sonuç artan ilerleme hızıyla birlikte ilerleme ve normal kuvvet değerlerindeki artıştır. En küçük kuvvet değerleri $f_z = 2 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızında $F_x 2,05 \text{ N}$ $F_y 2,6 \text{ N}$ olarak ölçülmüştür. İlerleme hızının % 50 artışıyla birlikte $f_z = 3 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızında hem ilerleme hem de normal kuvvetlerde yaklaşık % 5' lik bir artış elde edilmiştir. İlerleme hızının % 100 arttığı $f_z = 4 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızında ise, ilerleme kuvvetinde (F_x) yaklaşık % 36, normal kuvvet (F_y) ise % 23' lük bir artış meydana gelmiştir. Bu sonuçlardan özellikle $f_z = 2$ ve $3 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızları arasında oluşan kuvvetler açısından önemli bir değişimin meydana gelmediği söylenebilir. Bu anlamda ilerleme hızının kesme kuvvetleri üzerindeki bariz

etkisi $f_z = 4 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızında elde edilmiştir. İlerleme miktarının artışıyla birlikte, kesici takımının her bir ağızının, birim zamanda kaldırmış olduğu talaş hacmi artmaktadır. Dolayısıyla, artan talaş hacminin kesme bölgesinden uzaklaştırılması için daha büyük bir kuvvete ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 5. Nümerik analizler sonucunda elde edilen kuvvet değerleri.

Yapılan nümerik analizlerde elde edilen sonuçlar deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla desteklenmesi kesme kuvveti ve oluşan talaş şekilleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Nümerik ve deneysel kuvvet sonuçları arasındaki karşılaştırma Şekil 6' da verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde nümerik ve deneysel sonuçlar arasındaki en küçük sapmalar $f_z = 3$ ve $4 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızlarında F_y kuvvetlerinde ve $f_z = 2 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızında F_x ilerleme kuvvetinde sırasıyla % 3,5-2ve 7,5 olarak elde edilmiştir. Bunun birlikte $f_z = 4 \mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme hızında F_x için ise % 10,5 bir sapma görülmektedir. En büyük sapmanın ise $f_z = 2 \mu\text{m}/\text{diş}$ için F_x kuvveti ve $f_z = 3 \mu\text{m}/\text{diş}$ için F_y kuvvetinde sırasıyla %26 ve 24 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu büyük sapma değerlerine rağmen sonuçların yine de makul sınırlar içinde olduğu söylenebilir.

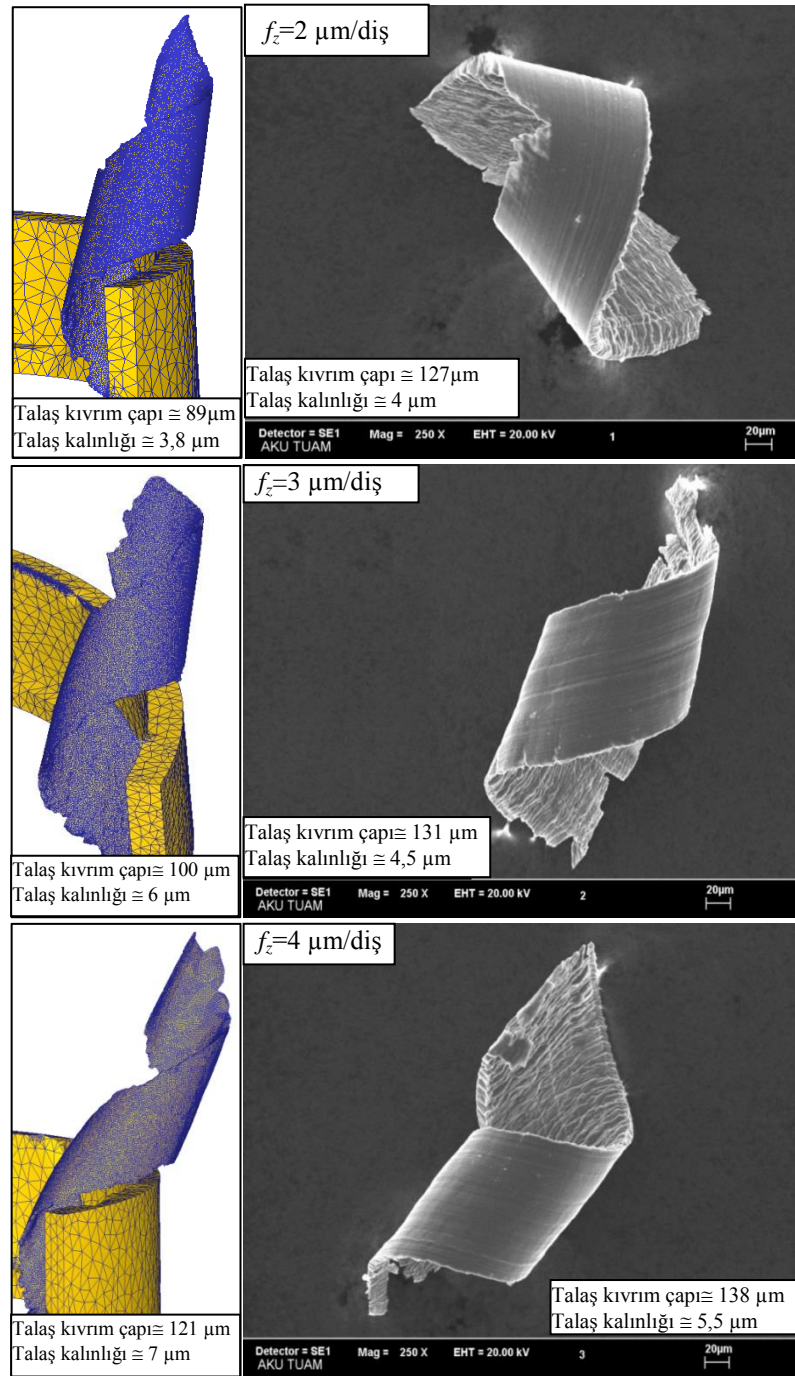


Şekil 6. Nümerik ve deneysel kuvvetlerin karşılaştırılması.

3.2 Talaş Oluşumunun Değerlendirilmesi.

Nümerik analiz sonuçlarıyla deneysel sonuçlar arasında yapılan bir diğer değerlendirme ise, mikro frezeleme işlemi boyunca meydana gelen talaş şekilleridir. Üç farklı ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen talaş görüntüleri Şekil 7' de karşılaştırılmıştır. Nümerik ve gerçek talaş görüntülerinde dikkate çeken ilk nokta, birbirleriyle önemli ölçüde benzerlik göstermesidir. Nümerik ve deneysel talaş şekilleri arasındaki değerlendirmede talaş kıvrım çapı ve deforme olmuş talaş kalınlığı değerleri dikkate alınmış ve birden fazla talaş şekli üzerinde yapılan ölçümlerin ortalaması kullanılmıştır. Çünkü yapılan kesme işleminde takımındaki eksantriklikten (Runout) dolayı homojen bir deforme olmamış talaş kalınlığı söz konusu değildir. Dolayısıyla bu durum elde edilen talaşların ebatlarında değişkenliğe sebep olmaktadır. SEM ortamında yapılan ölçümlerde Talaş kıvrım çapları arasındaki karşılaştırmada en iyi yakınsama %87 ile 4 µm/diş ilerleme ile elde edilirken minimum uyum %70 ile 2 µm/diş ilerleme değerinde görülmüştür. 3 µm/diş ilerleme değeri için uyum ise, yaklaşık %76 seviyesindedir. Deforme olmuş talaş kalınlıkları arasındaki değerlendirme de ise; en iyi uyum $f_z = 2$ µm/diş ilerleme hızında yaklaşık %95 dir. $f_z = 3$ ve 4 µm/diş ilerleme hızlarındaki uyum ise; nispeten daha az olup sırasıyla % 75 ve 78 dir.

Talaş görüntülerinde ortaya çıkan bir diğer durum ise, ilerleme miktarının artmasıyla talaş kıvrım çaplarındaki değişimdir. İlerleme miktarındaki artış deforme olmuş talaş kalınlığının artması anlamına gelmektedir. Artan talaş kalınlığının talaşın deformasyona karşı direnç göstermesine neden olmaktadır. Bu yüzden, talaş daha büyük bir kıvrılma çapıyla kıvrılmaktadır.



Şekil 7. Nümerik ve deneysel çalışma sonunda elde edilen talaş görüntülerinin karşılaştırılması.

4. SONUÇ

Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezeleme işleminin 3 boyutlu nümerik modelinin oluşturulduğu bu çalışmada, ilerleme hızına bağlı olarak kesme kuvveti ve talaş oluşumu deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında genel olarak iyi bir uyumun sağlandığı görülmektedir.

İlerleme ve normal kuvvet sonuçlarında nümerik ve deneysel sonuçlar arasında tatmin edici bir uyum yakalanmıştır. Ayrıca sonuçlarda ilerleme miktarının artmasıyla birlikte her iki kuvvet komponentinin de arttığı görülmüştür. Bu sonuç birim zamanda artan talaş hacminin bir sonucudur.

Talaş şekilleri arasındaki karşılaştırmada ise, nümerik ve deneysel olarak elde edilen talaş şekillerinde önemli ölçüde bir benzerlik elde edilmiştir. Bunun yanı sıra talaşların geometrik boyutları karşılaştırıldığında talaş kıvrım çapı ve deforme olmuş talaş kalınlıklarında % 70 ile %87 arasında bir uyum sağlanmıştır. İlerleme miktarına bağlı olarak talaş kıvrım çapı ile deforme olmuş talaş kalınlıklarındaki değişim ise, artan yönde olmuştur.

Bu çalışma, kapsamlı bir araştırmanın küçük bir özeti olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmayla birlikte mikro boyuttaki frezeleme işlemlerinde kesme anında karşılaşılabilecek olası durumların simule edilmesi ve kesme işleminin düzgün bir şekilde planlanmasına önemli bir katkı sağlayacaktır. Bunun birlikte çeşitli takım geometrilerinin kesme işlemi üzerindeki katkısı yada kullanılabilecek kaplama kompozisyonlarının kesme işlemi üzerindeki performansı hakkında nümerik analizler yardımıyla bilgi toplanabilecektir.

Bu çalışma 213M572 no'lu Tübitak araştırma projesi tarafında desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

Friedrich, C., Coane, P., Goettert, J., Gopinathin, N. 1997. "Precision of Micromilled X-Ray Masks and Exposures", *Microsystem Technologies*, Volume4(1), Pages 21-24.

Dornfeld, D., Min, S., Takeuchi, Y. 2006. "Recent Advances in Mechanical Micromachining", *Annals of the CIRP*, Volume 55(2), Pages 745-768.

Dhanorker A., Özel, T. 2008. "Meso/Micro Scale Milling for Micro-Manufacturing", *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, Volume 1(1), Pages 2342.

Schmidt, J., Tritschler, H. 2004. "Micro Cutting of Steel", *Microsystem Technologies*, Volume 10, Pages 167-174.

Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T. 2006. "Investigation of Micro-Cutting Operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 46, Pages 313-332.

Filiz, S., Conley, C.M., Wasserman, M.B., Özdoğanlar, O.B. 2007. "An Experimental Investigation of Micro Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro Endmill", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 47, Pages 1088-1100.

Ucun, İ., Aslantas, K. 2011. "Numerical Simulation of Orthogonal Machining Process Using Multilayer and Single-Layer Coated Tools", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 54(9-12), Pages 899-910.

Yang, K., Liang, Y. C., Zheng, K. N., Bai, Q. S., Chen, W.Q. 2011. "Tool Edge Radius Effect on Cutting Temperature in Micro-End-Milling Process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 52(9-12), Pages 905-912.

Yen, Y.C., Jain, A., Altan, T. 2004. "A Finite Element Analysis of Orthogonal Machining Using Different Tool Edge Geometries", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 146(1), Pages 72-81.

Jin, X., Altıntaş, Y. 2012. "Prediction of Micro-Milling Forces with Finite Element Method", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 212(3), Pages 542-552.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Özel, T., Thepsonthi, T., Ulutan, D., Kaftanoğlu, B. 2011. "Experiments and Finite Element Simulations on Micro-Milling of Ti-6Al-4V Alloy with Uncoated and CBN Coated Micro-Tools", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Volume 60(1), Pages 85-88.

Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G. 2004. "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro Endmilling Part I: Surface generation", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Volume 126, Pages 685-694.

Thepsonthi, T., Özel, T. 2015 "3-D Finite Element Process Simulation of Micro-End Milling Ti-6Al-4V Titanium Alloy : Experimental Validation on Chip Flow and Tool Wear", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 221, Pages 128-145.

Deform 3D V6.1 Software Database.

Lee, W.S., Lin, C.F. 1998. "High-Temperature Deformation Behavior of Ti6Al4V Alloy Evaluated By High Strain-Rate Compression Tests", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 75, Pages 127-136.

Seo, S., Min, O., Yang, H. 2005. "Constitutive Equation for Ti-6Al-4V at High Temperatures Measured Using The SHPB Technique", *International Journal of Impact Engineering*, Volume 31, 735-754.

Çakırcalı, M., Kılıçaslan, C., Güden, M., Kıranlı, E., Shchukin, V. Y., Petronko, V.V. 2013. "Cross Wedge Rolling of a Ti6Al4V (ELI) Alloy: The Experimental Studies and The Finite Element Simulation of The Deformation and Failure", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 65(9-12), Pages 1273-1287.

Meyer, H.W., Kleponis, D.S. 2001. "Modeling the High Strain Rate Behavior of Titanium Undergoing Ballistic Impact and Penetration", *International Journal of Impact Engineering*, Volume 26, Pages 509-521.

Kay, G. 2003. "Failure Modelling of Titanium 6Al-4V and Aluminum 2024-T3 with the Johnson-Cook material Model", U.S. Lawrence Livermore National Laboratory, Report DOT/FAA/AR-03/57.

Ti-6Al-4V ALAŞIMININ MİKRO FREZELENMESİNDE ELMAS BENZERİ KAPLAMALARIN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

K. Aslantas^a, İ. Uçun^a, H. E. Hopa^a, M. Perçin^a, A. Çiçek^b

aslantas@aku.edu.tr

^aAfyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Müh. Afyonkarahisar

^bYıldırım Beyazıt Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Müh. Ankara,

Özet

Bu çalışmada, biyomedikal uygulamalarda sıklıkla kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezelenmesinde nano-kristal elmas (NCD) ve elmas benzeri karbon (DLC) kaplamalar kullanılmıştır. Bu kaplamaların performans değerlendirmesi için takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu kriter olarak alınmıştır. Deneysel sonuçlarında SEM ve EDX analizleri yapılarak takım aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün analizi için ise üç boyutlu profilometre kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, NCD ve DLC kaplamanın en önemli avantajı çapak oluşumunu en aza indirmesidir. Fakat NCD kaplı kesici takım kaplamasız takıma nazaran %42 daha fazla aşınmıştır.

Anahtar kelimeler: Mikro frezeleme, Elmas benzeri kaplama, Takım aşınması, Yüzey pürüzlülüğü

PERFORMANCE EVALUATION OF DIAMOND LIKE COATINGS IN MICRO MILLING OF Ti-6Al-4V ALLOY

Abstract

In this study, nano-crystalline diamond (NCD) and diamond like carbon (DLC) coatings were used in micro-milling of Ti-6Al-4V alloy frequently used in biomedical applications. For performance evaluation of these coatings, tool wear, surface roughness, and burr formation were accepted as criteria. Tool wear mechanisms were determined by performing SEM and EDX analyses after experimental studies. A three dimensional profilometer was employed to assess surface roughness of machined surfaces. According to experimental results, the most important advantageous aspect of NCD and DLC is that they minimised the burr formation. However, NCD coated tool is more worn by 42% in comparison to uncoated the tool

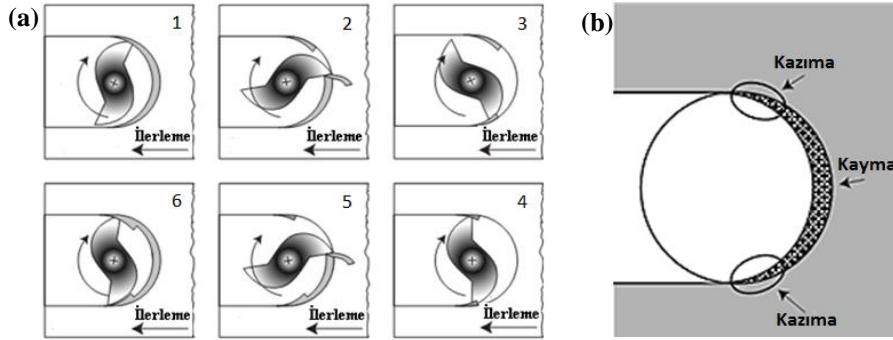
Keywords: Micro-milling, Diamond like carbon, Tool wear, Surface roughness

1. GİRİŞ

Mikro mekanik işleme yöntemlerinden biri olan mikro frezeleme tekniği, çoğunlukla tercih edilen bir yöntemdir. Çünkü tornalama ve delik delme işlemlerine nazaran karmaşık geometriye sahip olan parçaları işleyebilme yeteneğine sahiptir. Mikro frezeleme tekniği ile mikro enjeksiyon kalıplarının imalatında 3 boyutlu mikro yüzeyler kolaylıkla işlenebilmektedir. Dolayısıyla bu tür kalıpların imalatında gerek maliyet, gerekse zaman ve esneklik açısından önemli bir katkı sağlamaktadır. Bunun dışında, metalik, kompozit, polimer ve seramik malzemelerden fonksiyonel minyatür ürünler de kolaylıkla işlenebilmektedir.

Talaşlı imalat işlemlerinin en önemli aktörü hiç şüphesiz kesme işlemini gerçekleştiren kesici takımlardır. Kullanılan kesici takımlar, imalatı gerçekleştirilen ürünün kalitesini ve üretim maliyetini birinci dereceden etkilemektedir [1]. Bu yüzden, imalat sürecine uygun kesici takımın seçimi kritik bir süreçtir. Mikro frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlar, imalat işleminin boyutunu ve hassasiyetini belirleyen önemli bir unsurdur.

Mikro frezelemede, kesme kuvvetinin oluşumu, konvansiyonel frezelemeyle genel anlamda benzer bir karaktere sahiptir. Fakat her iki işlem arasındaki, talaş oluşum mekanizmasındaki farklılıklar, kesme kuvveti karakteristiklerinin de değişmesine neden olmaktadır. Yani boyut etkisinden dolayı, mikro takımların kesici kenarında negatif bir talaş açısı söz konusudur. Böyle bir durumda talaş oluşumunda farklılıklar görülmektedir. Bunun bir sonucu olarak, kesme kuvvetlerinde kararsızlıklar meydana gelebilmektedir. Küçük ilerleme hızlarında, kesici ağzın malzemeye nüfuz ettiği ve malzemeyi terk ettiği noktalarda tam bir talaş oluşumundan daha çok, bu bölgelerde iş parçası malzemesinin elastik-plastik olarak deforme olduğu bilinmektedir. Bu durumun devamında diğer kesici ağız aynı düzleme geldiğinde, bu kez bir önceki kesici ağzın geçişinde elastik deformasyon sonucu uzaklaştırılmayan malzeme, daha kalın bir talaş kesiti ile birlikte uzaklaştırılmaktadır. Bu durum, kesme kuvvetlerinde kararsızlıklara neden olmaktadır (Şekil 1).



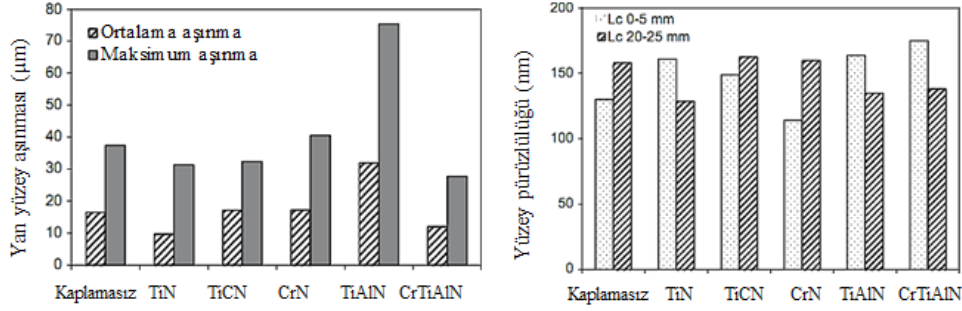
Şekil 1. a) Mikro frezelemede talaş oluşumunun şematik gösterimi, b) Talaş kesitinde meydana gelen kazınma ve kayma bölgeleri [2].

Mikro frezeleme işleminde özellikle mikro kalıp imalatında kullanılan sertleştirilmiş malzemelerin işlenmesi, takım ömrünün önemli ölçüde kısılmasına neden olmaktadır. Bu problemin çözümüne yönelik kesme koşullarında çeşitli optimizasyon yöntemleri uygulanarak takım ömrü artırılmaya çalışılmaktadır [3]. Bununla birlikte, mikro kesicilerin kaplanması da takım ömrü üzerindeki mevcut problemlerin çözümüne büyük ölçüde yardımcı olmaktadır [4].

Yapılan çalışmalarda, mikro frezeleme işleminde özellikle yüksek aşınma direncinden dolayı TiAlN kaplamaların ve aynı zamanda elmas kaplamaların tercih edildiği görülmektedir [5-7]. Elmas kaplamalar sağladıkları üstün mekanik özelliklerden dolayı özellikle son yıllarda en çok tercih edilen kaplama türü olarak dikkat çekmektedir. Sahip oldukları yüksek sertlik değerleri, talaşlı imalatta takım aşınmasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bununla birlikte kesme sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerini ve ısı oluşumunu azaltan düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Ayrıca, elmas kaplamaların kimyasal olarak kararlı yapısı, kesme sırasında talaşın takıma yapışmasını büyük ölçüde azaltmaktadır [8-10]. Bu özelliklerinden dolayı elmas kaplamalar sıklıkla tercih edilmektedir. Yapılan bir çalışmada 0,3 mm çapa sahip tungsten karbür takımlar NCD kaplama ile kaplanmıştır. Yapılan analiz neticesinde, elmas kaplamanın takım aşınmasını azalttığı ve kesici takıma talaş

yapışmasının büyük ölçüde engellendiği ifade edilmiştir. Ayrıca sahip olduğu düşük sürtünme katsayısının da kesme kuvvetlerinde azalmaya neden olduğu ileri sürülmüştür [11].

TiAlN kaplamalar ise, ticari olarak üretilen takımlarda yaygın olarak kullanılan bir kaplama türüdür. Yüksek sertliği ve oksidasyon direnci, kesme işlemi boyunca bir takım avantajlar sağlamaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda kesici takım olarak TiAlN kaplamalı takım tercih edilmiştir [12-14]. Bunun dışında, farklı kaplama kompozisyonlarında yapılan çalışmalarda TiN, TiCN, CrN/CrTiAlN kaplamaların kullanıldığı görülmektedir [4, 12]. Aramcharoen vd. nin gerçekleştirdikleri bir çalışmada [4], H13 takım çeliğinin frezelenmesinde TiN, TiCN, TiAlN, CrN/CrTiAlN kaplamaların performansları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, TiN kaplamanın aşınma ve işlenen yüzey kalitesi açısından performansının, kaplamasız takım ve diğer kaplama türlerine nazaran oldukça iyi olduğunu göstermiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Farklı kaplama türlerinin aşınma ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki performanslarının karşılaştırılması [4].

Bu çalışmada elmas benzeri iki kaplama türü olan NCD ve DLC kaplamalarının Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezelenmesinde kesme performansına etkileri araştırılmıştır. Farklı kesme parametreleri için yapılan deneylerde, takımda meydana gelen aşınma, aşınmaya bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi, kesme kuvveti-yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki ve çapak oluşumu irdelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Kullanılan Deneysel Düzenek

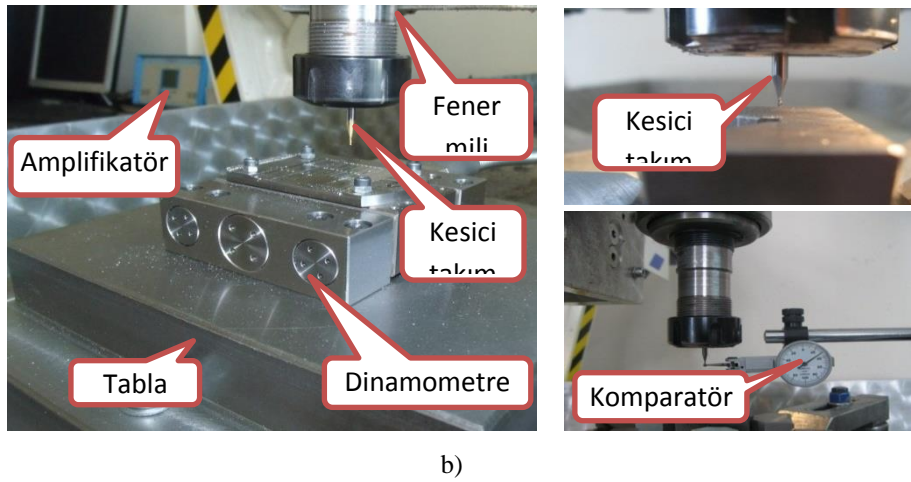
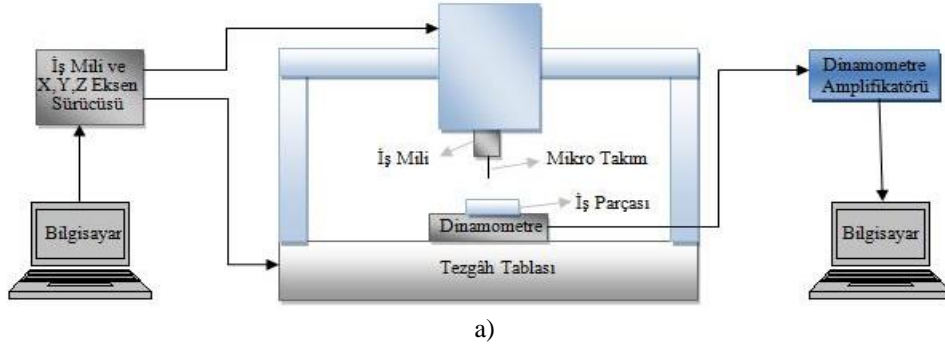
Bu çalışmada, havacılık ve biyomedikal sanayinde geniş kullanım alanı bulan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı iş parçası malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneyler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki CNC dik işleme tezgâhı ile gerçekleştirilmiştir. Üç eksenli CNC tezgâhı, 2,2 kW motor gücüne ve 24000 dev/dk dönme hızına sahiptir. Şekil 3'te deneysel düzenek ayrıntılı olarak verilmiştir. Deneyler öncesinde iş milinde var olan aksel sapmayı belirlemek adına ön kontroller yapılmış olup bu sapma miktarının yaklaşık 2 µm olduğu tespit edilmiştir. İş parçası dört farklı noktadan dinamometreye sabitlenmiş olup eşit sıkma momenti için torkmetre kullanılmıştır. Kullanılan dinamometre; -4, +4 kN ölçme aralığında olup, 0.1 N hassasiyetinde ölçüm yapabilmektedir. Montaj esnasında oluşabilecek farklı sıkma momentlerini ortadan kaldırmak için, dinamometre katalog değeri olan 4N sıkma momenti ile tablaya sabitlenmiştir. Kuvvet ve tork değerlerinin piezoelektrik sinyallerle ölçülmesinden dolayı oluşabilecek sıcaklık farklarından etkilenmemesi için, kesme deneyleri 24-25°C ortam sıcaklığına sahip klimalı bir laboratuvar ortamında yapılmıştır. Dinamometre doğrudan tezgah tablasına değil çelik bir plaka üzerine montaj edilerek tezgah tablasına sabitlenmiştir.

2.2 Kesici Takım ve İş Parçası

Kullanılan kesici takımların çapı 508 µm, ağız sayısı iki ağızlı olup 30° lik bir helis açısına sahiptir. Kullanılan kesici takıma ait tane büyüklüğü ise ortalama 0,4 µm olarak ölçülmüştür. Kesici takım malzemesindeki kobalt bağlayıcı ve tungsten karbür oranı sırasıyla % 8 ve % 92 dir. Kesici takımlar kaplamasız olarak Performance Micro Tool (PMT) firmasından tedarik edilmiştir. Kaplamasız takımların NCD ve DLC ile kaplama işlemi NCD Technologies firmasında gerçekleştirilmiştir. Kaplama öncesi her bir takım, içerisinde %50 hafniyum, nitrik asit ve saf suyun bulunduğu özel sıvı içerisinde dağlanmıştır. Dağlama işlemi sonrasında 925°C sıcaklık ve 30

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

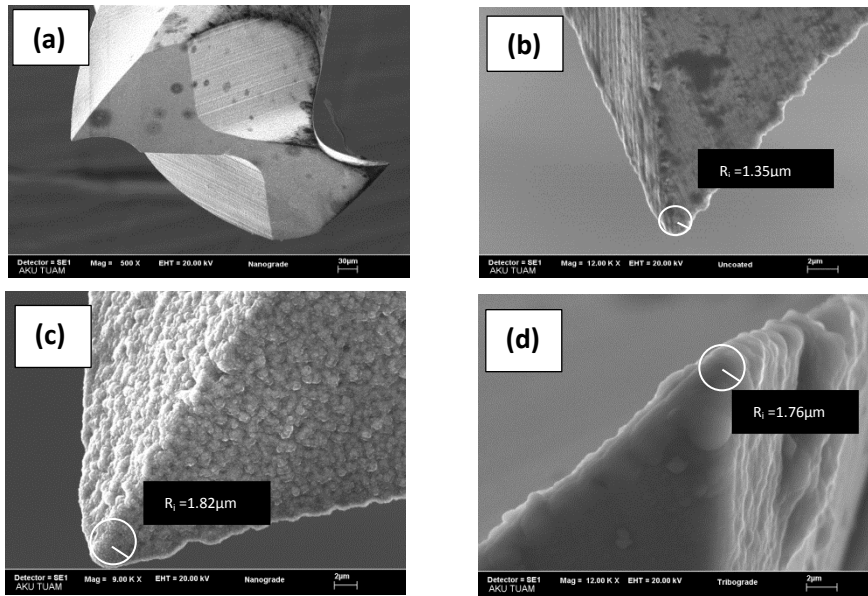
torr basınç altında 45 dakika süreyle atmosfere kapalı bir ortamda kaplama işlemi uygulanmıştır. NCD kaplama işlemi hot filament kimyasal buhar çökertme (HF-CVD) tekniği ile gerçekleştirilirken, DLC kaplama PVD yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Her iki kaplama prosesiyle kaplanmış kesici takımlara ait özet bilgiler Tablo 1’de verilmektedir. Ayrıca kaplanmış ve kaplanmamış takımlara ait SEM görüntüleri de Şekil 3’te verilmektedir.



Şekil 3. Kullanılan deney düzeneğinin. a) şematik gösterimi, b) açıklamalı fotoğrafı.

Tablo 1. Kesici takım ve kaplama malzemelerine ait temel özellikler

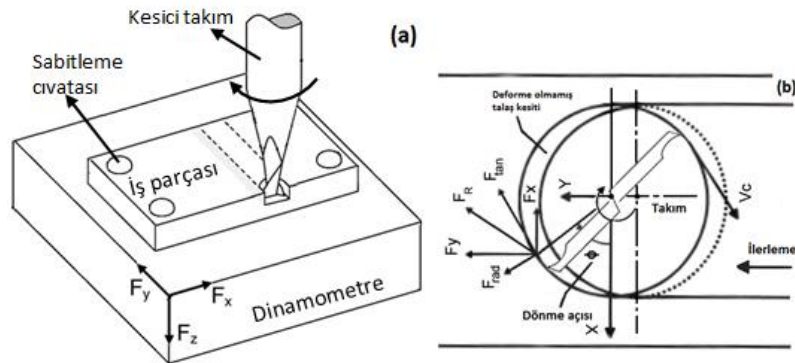
Kaplama Türü	Sertlik HRA (GPa)	Sürtünme Katsayısı	Kaplama Kalınlığı (µm)	Köşe Radyüsü (µm)	Kaplama Sonrası Radyüs (µm)
Kaplamasız	93	0.4-0.6	-	1-1.5	~2
DLC (PVD)	75-90	0.1-0.2	~2		~3
NCD (HF-CVD)	85-95	0.05-0.1			~3



Şekil 3. Kaplanmış ve kaplanmamış mikro takımlara ait SEM görüntüleri a) takımın genel görünümü, b) kaplanmamış, c) NCD kaplanmış, d) DLC kaplanmış.

2.3 Kesme Parametreleri

Kesme deneyleri kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiş olup, sabit kesme hızı ($N = 20000$ dev/dk) ve kesme derinliği ($ap = 0,1$ mm) kullanılmıştır. Talaş yükünün ve minimum talaş kalınlığının etkisini görmek adına $f_z = 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 2,5$ ve $4 \mu\text{m}$ olmak üzere 7 farklı ilerleme değerleri için kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kesme deneylerinde kullanılan yöntemin şematik ifadesi Şekil 4-a’ da verilmiştir. Şekil 4-b’ de ise kesme esnasında takım ucunda meydana gelen F_x, F_y, F_t ve F_r kuvvetleri ve deneyde kullanılan koordinat sistemi gösterilmektedir.



Şekil 4. Mikro frezeleme işleminin şematik gösterimi; a) 3 Boyutlu, b) üstten görünüm

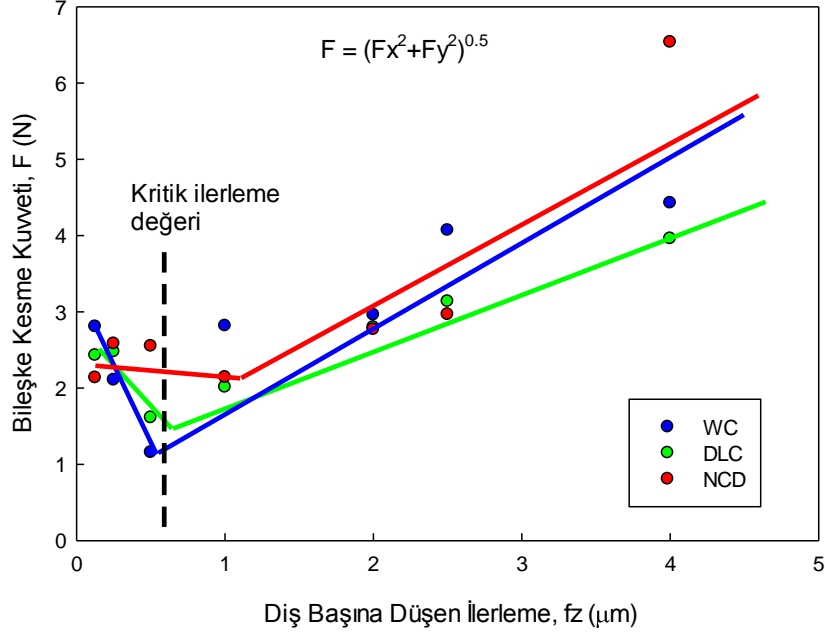
İşlenen yüzeylere ait yüzey pürüzlülük değerleri, Nanovea 3D profilometre ile ölçülürken takımlarda meydana gelen aşınmaların analizi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımı Spektrometre analizleri (EDX) gerçekleştirilmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1 Kesme Kuvvetlerindeki Değişim

Şekil 5’ te deneylerden elde edilen F_x ve F_y kuvvetlerinin bileşkesi olan F kuvvetinin ilerleme değerine ve kaplama türüne bağlı olarak değişimi verilmiştir. Grafikte dikkati çeken ilk unsur; $f_z \leq 0,5 \mu\text{m}$ olduğunda kesme kuvvetlerinin büyümesidir. Özellikle kaplamasız ve DLC kaplanmış kesici takımında bu durum daha net gözlenmektedir. $f_z \leq 1 \mu\text{m}$ ilerleme değerlerinde NCD kaplı kesici takımında bileşke kesme kuvveti bir miktar

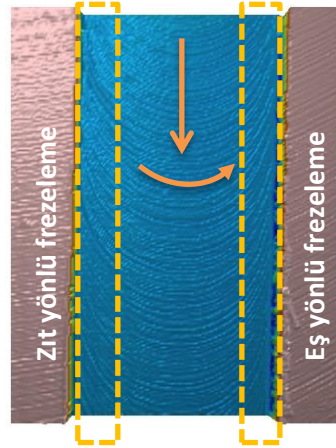
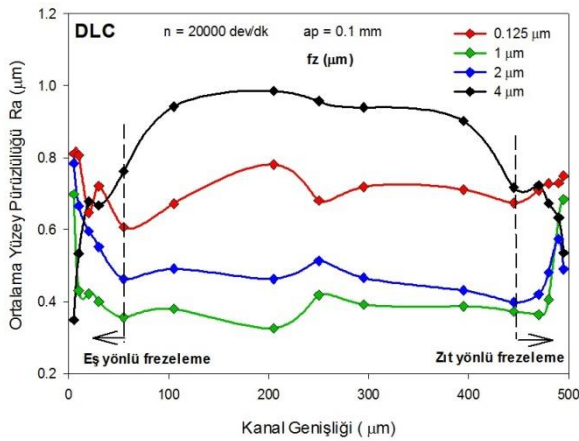
büyük elde edilmiş olsa da kaplamasız ve DLC kaplanmış kesici takım kadar önemli bir değişim gözlenmemektedir. Bu noktadan hareketle Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezelenmesi işleminde kesme kuvvetleri açısından kritik ilerleme değerinin $0,5 \mu\text{m}$ olduğu söylenebilir. Çünkü her üç takım için de elde edilen bileşke kesme kuvveti $f_z \geq 1 \mu\text{m}$ olması durumunda lineer olarak artmaktadır. Bu artış özellikle NCD kaplı kesici takımda yüksek ilerleme değerlerinde daha yüksek olmuştur. Bu duruma; NCD kaplı kesici takımda meydana gelen kenar aşınmasının sebep olduğu düşünülmektedir.

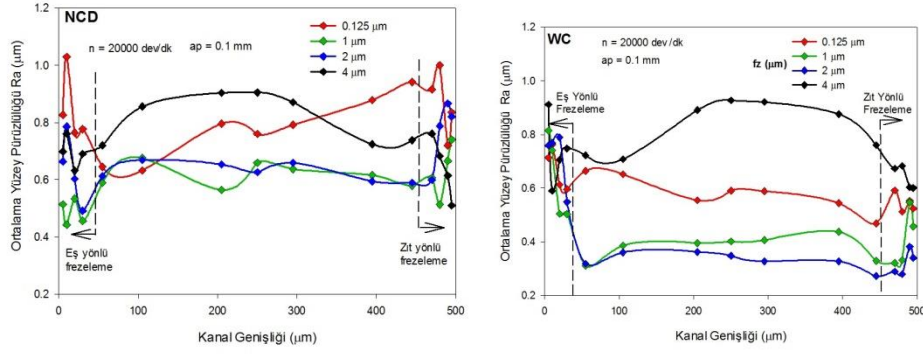


Şekil 5. Bileşke kuvvetin ilerleme değerine bağlı olarak değişimi.

3.2 Yüzey Pürüzlülüğü ve Mikro Çapak Oluşumu

Kesme deneyleri sonrasında işlenen mikro kanallar 3 boyutlu profilometre ile temassız olarak taranmış yüzeye ait işleme izlerinin yanı sıra ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve çapak boyutları tespit edilmiştir. Şekil 6' da her üç takım için ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin kanal genişliği boyunca değişimi verilmiştir. Burada dikkati çeken ilk unsur; frezeleme esnasında takım kesici kenarının malzemeye nüfuz ettiği ve malzemeyi terk ettiği, yani eş yönlü frezeleme ve zıt yönlü frezeleme yaptığı konumlarda Ra değerlerinin ani olarak değişim göstermesidir.

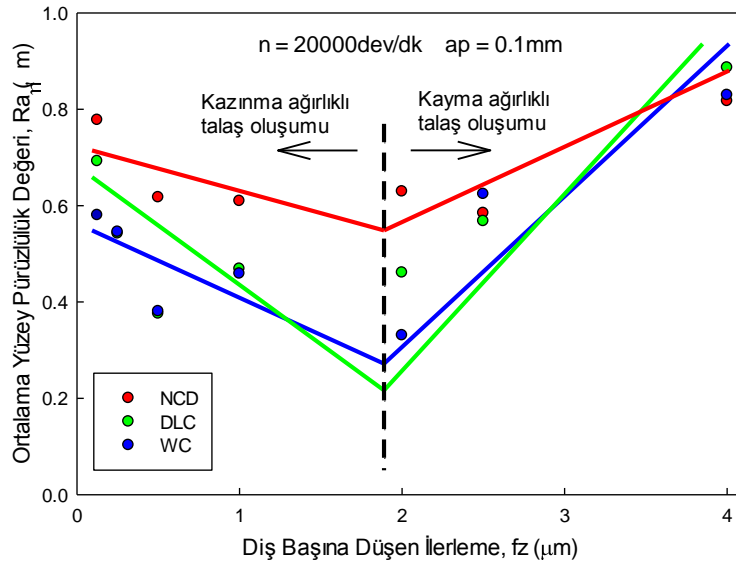




Şekil 6. Ra değerlerinin kanal genişliği boyunca f_z değerlerine bağlı olarak değişimi.

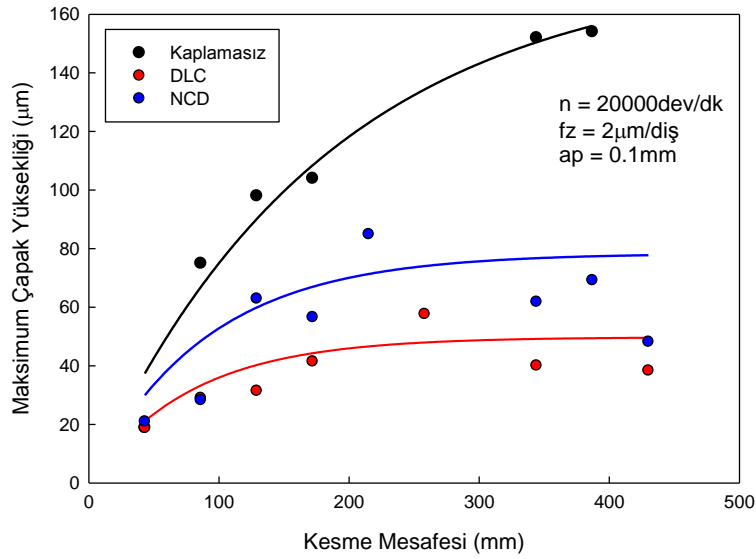
Kanalın orta kısmı referans alındığında, özellikle $1\mu\text{m}$ ve $2\mu\text{m}$ olan ilerleme değerlerinde elde edilen Ra değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Buna karşın yine kanalın orta kesiminde maksimum Ra değerlerinin $f_z = 0.125$ ve $4\mu\text{m}$ ilerleme değerlerinde olduğu açıkça görülmektedir. Bunun da en önemli nedeni, $0.125\mu\text{m}$ olan ilerleme değerinin takım radyüsü (ki bu çalışmada yaklaşık 1 ile $1.5\mu\text{m}$) ile kıyaslandığında, kritik talaş derinliğine çok yakın olmasıdır. Bunun da sonucu olarak kazınma mekanizmasının hakim olduğu bir kesme işlemiyle talaş oluşumu meydana gelmiş ve bu da Ra değerlerinin artmasına neden olmuştur. Bununla birlikte $f_z \leq 2\mu\text{m}$ olması durumunda eş yönlü frezeleme ve zıt yönlü frezeleme bölgelerinde Ra değerleri maksimum değer alırken, $f_z = 4\mu\text{m}$ için kanalın orta kısmında elde edilen Ra değerlerinin daha büyük olduğu saptanmıştır. Kaplama malzemesinin etkisini gözlemlemek adına Şekil 6' da verilen her üç grafik birbiri ile kıyaslandığında, minimum ve maksimum f_z değerleri için kanalın orta kesiminde elde edilen Ra değerleri arasındaki fark NCD kaplı kesici takımında $0,3\mu\text{m}$ iken, bu değer DLC kaplı takımında $0,6\mu\text{m}$ ve kaplamasız takımında ise $0,5\mu\text{m}$ olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla NCD kaplı kesici takımında f_z ' nin Ra üzerinde daha az bir etkiye sahip olduğunu söylemek mümkündür.

Şekil 7' de diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak her bir takım için elde edilen Ra değerleri verilmiştir. Bu değerler, Şekil 6' da verilen kanal genişliği boyunca elde edilen değerlerin 100 ile $400\mu\text{m}$ aralığındaki Ra değerlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Bilindiği üzere geleneksel kesme işleminde ilerleme değerinin azalması ile Ra değeri de azalır ve daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilir. Burada dikkati çeken en önemli unsur, $f_z = 2\mu\text{m}$ 'den daha küçük değerlerde Ra değerlerinin artmış olmasıdır. İlerleme değerinin azalmasıyla kritik talaş derinliğinin hakim olduğu ϕ açısının değeri artmaktadır. Böylece kayma mekanizmasının aktif olduğu kesme yayı uzunluğu azalmaktadır. Bu durum bir anlamda Şekil 6' da verilen zıt yönlü frezeleme ve eş yönlü frezeleme alanının genişlemesine neden olmaktadır.



Şekil 7. Diş başına düşen ilerleme değerine bağlı olarak Ra değerlerinin değişimi.

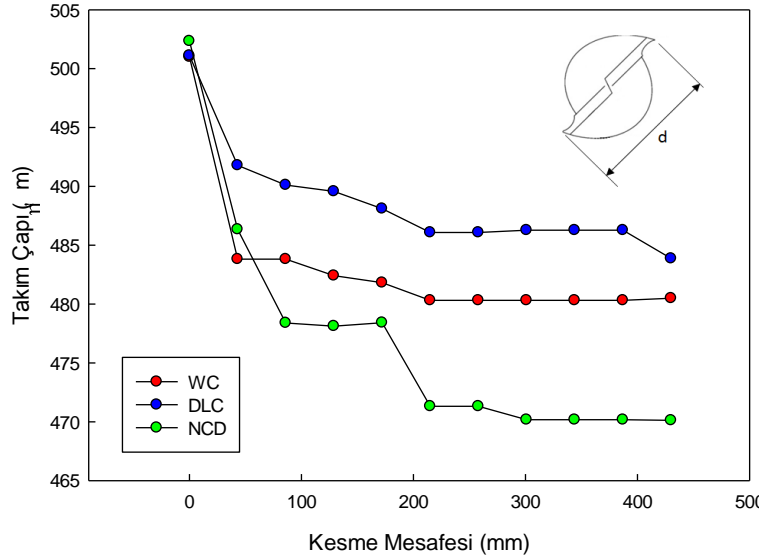
Mikro frezeleme de yüzey pürüzlülüğü kadar önemli bir diğer konuda, kesme işlemi sonrası çapak oluşumudur. Çapak oluşumu, genel olarak talaşlı imalatla üretilen parçalarda istenmeyen bir durumdur. Çapak oluşumunu etkileyebilecek unsurlardan biri de takım kaplamasıdır. Çünkü kaplama takım talaş ara yüzeyinde meydana gelen sürtünme katsayısının değişimine neden olur. Şekil 8’ de kesme zamanına bağlı olarak kaplamalı ve kaplamasız takımlardaki çapak oluşumunun değişimi verilmiştir. Çapak boyut ölçüleri, eş yönlü frezelemenin meydana geldiği kenar boyunca maksimum olan çapak yüksekliğinin ölçülmesi elde edilmiştir. Artan kesme mesafesine bağlı olarak takımda meydana gelen aşınma kesici kenar geometrisinin bozulmasına neden olmuş, bunun sonucunda kenar radyüsü büyümüştür. Büyüyen kenar radyüsü, hem talaşın iş parçasından kopmasını zorlaştıracak hem de takımın malzemeye nüfuz ettiği ve malzemeyi terk ettiği noktalarda kazınmanın meydana geldiği alanın büyümesine neden olacaktır. Bu da, çapak oluşumunun artmasıyla sonuçlanacaktır. Kaplamalı takım ile kaplamasız takım arasındaki farkın nedeni ise kaplama malzemesine ait düşük sürtünme katsayısının olduğu düşünülmektedir. Tablo 1’ de de görüldüğü üzere, kaplama malzemelerine ait sürtünme katsayısı oldukça düşüktür. Düşük sürtünme katsayısı, takım talaş ve takım iş parçası ara yüzeylerindeki sürtünmenin azalmasına katkıda bulunmaktadır. Yapılan bir çalışmada [16] takım yüzeyinde artan sürtünme miktarı kesme bölgesindeki kayma açısının ve plastik şekil değişiminin azalmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Bu da çapak oluşumunu artırmaktadır.



Şekil 8. Kesme mesafesine ve kaplama türüne bağlı olarak çapak yüksekliğinin değişimi

3.3 Takım Aşınması

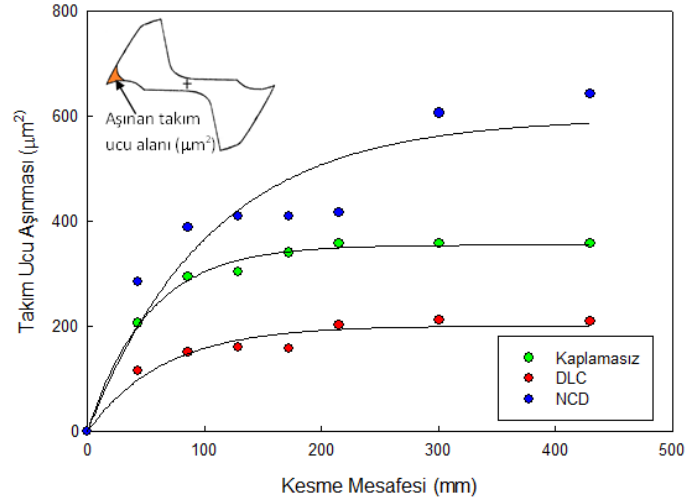
Mikro frezeleme işleminde takım aşınması genellikle iki farklı formda ifade edilir. Bunlardan biri; takım çapında azalmaya neden olan aşınma, bir diğeri de kesici kenarda meydana gelen aşınmadır. Her iki aşınma tipi de daha çok abrasiv aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Abrasiv aşınma mekanizmasının yanı sıra adhesiv aşınma mekanizması sonucunda talaş yapışması da sıkça karşılaşılan bir aşınma tipi olarak karşımıza çıkmaktadır [15]. Bu çalışmada her iki aşınma tipinin kesme mesafesine bağlı olarak değişimi araştırılmış ve elde edilen veriler Şekil 9 ve 10’ da sunulmuştur. Şekil 8’ de takım çapındaki maksimum aşınmanın NCD kaplı kesici takımında meydana geldiği, buna karşın DLC kaplı kesici takımında ise çap değişiminin minimum olduğu net olarak görülmektedir. Kesici takımların başlangıçtaki çapları 508 ile 510µm arasında değişmektedir. Özellikle ilk kesme kanalında (ki kesme mesafesi 43mm’dir) her üç kesici takım çapındaki ani düşüş dikkat çekicidir. Bunun temel nedeni; abrasiv aşınma mekanizması ve mikro düzeyde parçacık kopmalarının (chipping) bir sonucu olarak kesici takımın kenarları keskinliğini kaybetmektedir. Böylece takım çapında ani bir azalma gerçekleşmektedir. Kesme mesafesinin artmasıyla her ne kadar çaptaki azalma devam etse de ilk kanaldaki kadar hızlı gerçekleşmemektedir. Bunun nedeni; takımın iş parçasıyla ilk teması sırasında meydana gelen chipping türü kırılmalardır. Şekil 3-a’dan da görüldüğü üzere takıma ait köşe radyüsü 1,2 ile 1,8 µm arasında değişmektedir. Bu denli zayıf olan kesici kenarın, iş parçası ile ilk temasında, gerçekleşen mikro parça kopmaları takım çapının da değişmesine neden olmuştur.



Şekil 9. Kesme mesafesine bağlı olarak takım çaplarında meydana gelen azalma

NCD kaplanmış kesici takımında meydana gelen çap küçülmesi yaklaşık % 6 civarında iken bu değer DLC kaplanmış kesici takımında % 3,5 ve kaplanmamış takımında % 4,2 civarındadır. Bu açıdan bakıldığında Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezelenmesi işleminde NCD kaplanmış kesici takımında oluşan % 6 'lık çap değişimi, iş parçası ölçü tamlığını daha çok etkileyeceği için Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezelenmesinde kullanılması tavsiye edilmemektedir. Çünkü takım çapında meydana gelen aşınma kaplamasız takıma nazaran daha büyük ve aşınma hızının daha yüksek olduğu bir durum söz konusudur.

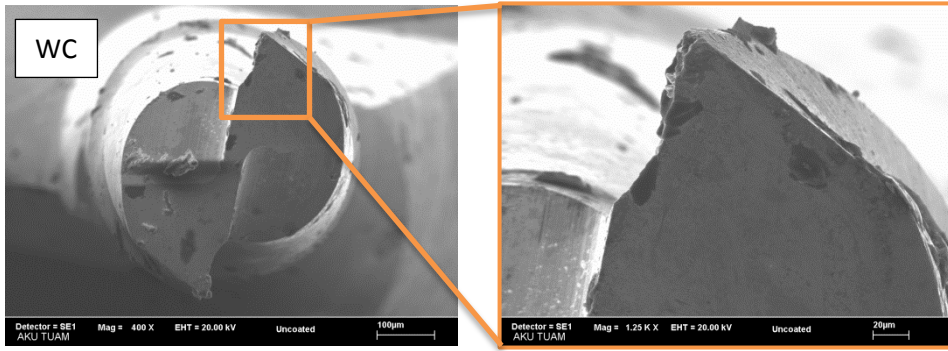
Şekil 10' da takım ucunda meydana gelen aşınmanın alan cinsinden değişimi yine kesme mesafesine ve kaplama türüne bağlı olarak verilmiştir. Takım ucundaki bu aşınma optik mikroskop vasıtasıyla ölçülmüş olup, kıyaslama ve alan hesabı takımın ilk kullanım öncesindeki geometrisine göre yapılmıştır. Şekil 10' da elde edilen sonuç, bir anlamda Şekil 9' da verilen sonuçları hem doğrular niteliktedir, hem de aşınma mekanizmasının tanımlanmasında önemli bilgiler sunmaktadır. Çaptaki aşınma sonuçlarına paralel olarak NCD kaplanmış kesici takımında meydana gelen takım uç aşınması maksimum iken, DLC kaplı takımında bu aşınma minimum seviyede gerçekleşmiştir. Şekil 8' de NCD için verilen eğride, kesme mesafesi 200 mm iken takım çapında hızlı bir düşüş gözlenirken, Şekil 9' da yaklaşık aynı kesme mesafesinde takım uç aşınması artış göstermiştir. Yine benzer şekilde belirli bir kesme mesafesi sonrasında hem çaptaki azalma hem de takım uç aşınması sabit bir seyir izlemektedir. Bu da takım çapı ile takım uç aşınmasının birbiri ile ilişkili olduğu sonucunu doğurmaktadır. Mikro frezeleme işleminde kesme esnasında meydana gelen kuvvetler kritik talaş kalınlığının belirlenmesine yönelik bize ipuçları vermektedir. Genellikle literatürde kritik talaş kalınlığı belirlenirken takıma ait köşe radyüsünün 0.1 katı kriter olarak alınır. Fakat bu değer genel bir kabuldür ve iş parçasına ve takım talaş ara yüzeyindeki sürtünme katsayısına bağlı olarak değişebilir. Çalışmada kullanılan kesici takımlara ait köşe radyüsü yaklaşık 2-3 μm ölçüldüğü dikkate alınacak olursa, kritik talaş kalınlığı 0.2 ile 0.3 μm olması beklenir.



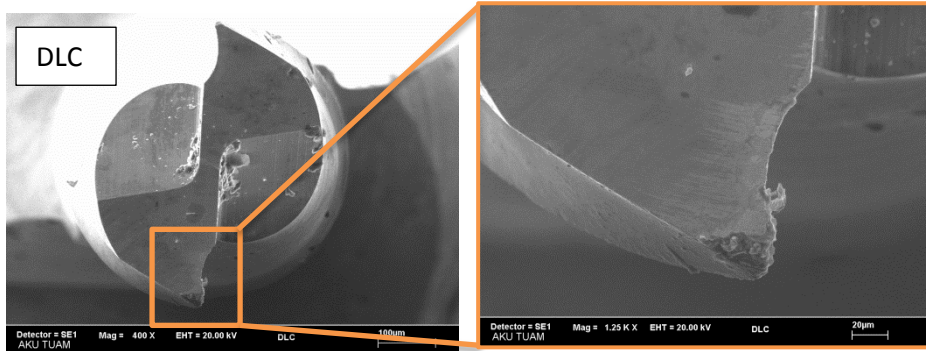
Şeki

110. Kesme mesafesine bağlı olarak kesme kenarı aşınması.

Tüm deneylerde kullanılan sabit kesme uzunluğu (430 mm, toplam 10 adet kanal) sonrasında yapılan SEM analizleri ile mikro takımlarda meydana gelen aşınma tipi ve mekanizması tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 11’ de kesme işlemi sonrasında kaplamasız takımın SEM görüntüsü verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere, kesme yapan kenarlarda hem talaş yapışması hem de mikro düzeyde parçacık kopması söz konusudur. Bununla birlikte her iki ağızda meydana gelen geometrik bozulmanın aynı olmadığı da net olarak gözlemlenmektedir. Kesici takıma etki eden kesme yükleri (özellikle F_{rad}) kesici takımını elastik olarak eğmeye zorlamış ve bu da takımın salıya neden olmuştur. Bunun sonucunda her kesici ağızın kaldırmaya çalışacağı talaş kesiti değişmiştir. Bu da kesici ağızların eşit olmayan zorlanmaya maruz kalmasına neden olmuştur. Benzer bir durum DLC kaplanmış kesici takımda daha net olarak görülmektedir (Şekil 12). Kesme yapan kenarda kısmen talaş yapışması göze çarpsa da daha çok chipping türü hasar tipinin hakim olduğu gözlemlenmektedir.

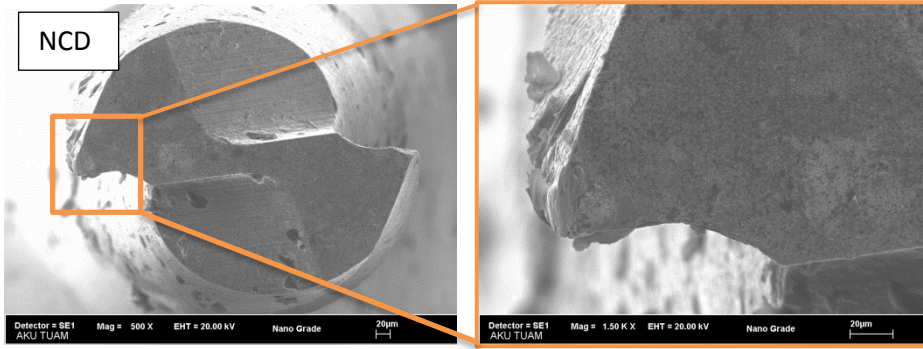


Şekil 11. Kaplamasız takımda 430 mm lik kesme mesafesi sonrasında meydana gelen aşınma



Şekil 12. DLC kaplanmış takımda 430 mm lik kesme mesafesi sonrasında meydana gelen aşınma.

Şekil 13' te ise NCD kaplı kesici takımında meydana gelen aşınmanın SEM fotoğrafları verilmiştir. Kaplamasız ve DLC kaplanmış kesici takıma nazaran, önemli oranda bir talaş yapışmasının meydana geldiği net olarak gözlemlenmektedir. DLC kaplama, içerdiği karbon ve hidrojen elementleri sebebiyle dizilişlerine bağlı olarak grafit veya elmas gibi yapılara sahip olmaktadır. DLC kaplamadaki karbonun atomik yapısı ise, hem grafitteki hem de elmastaki baskın bağların kombinasyonu ile oluşan amorf bir yapıdadır [17-18-19]. Sahip olduğu bu yapısal özellikler, kaplamanın kimyasal olarak kararlı bir hal almasını sağlamaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak, DLC kaplamalar düşük bir yapışma özelliğine sahiptirler [20-21]. Bu sebeple, DLC takım üzerinde BUE oluşumunun görülmemesi, kaplamanın elmas ve grafit özelliklerini birlikte barındırmasından dolayıdır. DLC kaplamanın PVD yöntemi ile yapılmış olması takım ömrü açısından önemli bir avantaj sağladığını söylemek mümkündür. Çünkü CVD yöntemiyle yapılan NCD kaplamada işlem sıcaklığı PVD yöntemine göre daha yüksektir. Bu da oldukça küçük bir kesit alanına sahip olan kesici takımın sıcak sertlik özelliğinin de kaplama sırasında olumsuz etkilenmiş olması ihtimalini akla getirmektedir. Bu nedendir ki NCD kaplanmış kesici takımında aşınma hızı daha yüksektir. Meydana gelen aşınma/chipping, kaplamanın fonksiyonunu yitirmesine neden olacaktır. Böylece takım talaş ara yüzündeki sürtünme katsayısı da artacaktır. Hem takım geometrisinin bozulması hem de sürtünme katsayısının artması takım ucunda talaş yapışmasına neden olmuştur. Bu durum hem kesme kuvvetlerinin hem de çapak boyutunun neden NCD takımında daha büyük çıktığını açıklamaktadır.



Şekil 13. NCD kaplanmış takımında 430 mm lik kesme mesafesi sonrasında meydana gelen aşınma.

4. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezelenmesinde ilk defa elmas esaslı iki kaplama (NCD ve DLC) malzemesinin performansı araştırılmıştır. Bahsi geçen her iki kaplamanın performansları değerlendirilirken takım aşınması, kesme kuvvetinin değişimi, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu dikkate alınmıştır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmanın neticesinde aşağıda sıralanan sonuçlar ön plana çıkmaktadır.

- Kesme kuvveti açısından değerlendirildiğinde kritik olan ilerleme değerinin $f_z = 0,5 \mu\text{m}$ olduğu saptanmıştır. Bu ilerleme değerinden daha küçük seçilen değerlerde kazanma mekanizmasının baskın olduğu kesme işlemi meydana gelmektedir.
- Kanal genişliği boyunca elde edilen Ra değerleri de göstermiştir ki, $f_z = 1 \mu\text{m}$ değeri yüzey kalitesi açısından kritik bir değerdir. Bu değer altındaki ilerleme değerlerinde kanalın ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri artmaktadır.
- Kesme uzunluğunun artmasıyla, takım üzerine etkileyen kuvvetlerin artması; takım kesici köşesinin aşınmasına ve kenar radyüsünün büyümesine yol açmıştır. Bu olay aynı zamanda, artan köşe radyüsü ile birlikte ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) düşmüştür.
- DLC kaplanmış kesici takımın, kaplamasız ve NCD kaplamalı takıma nazaran daha az aşındığı ve buna bağlı olarak çap değişiminin de daha az olduğu saptanmıştır. Buna neden olan ise, DLC kaplamanın PVD yöntemiyle kaplanmış olmasıdır.

- DLC kaplamalı kesici takımla elde edilen çapak yüksekliklerinin diğerlerine göre daha az olması kaplamanın aşınmaya karşı direncinin yüksek olmasıyla açıklanabilir. Kaplamasız ve NCD kaplı takımlardaki çapak genişliği maksimumdur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 213M572 no'lu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK' a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

1. Chae, J., Park, S.S., Freiheit, T., 2006. "Investigation of Micro-Cutting Operations", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Pages 313-332.
2. Filiz, S., Conley, C.M., Wasserman, M.B., Özdoğanlar, O.B., 2007. "An Experimental Investigation of Micro Machinability of Copper 101 Using Tungsten Carbide Micro Endmill", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Pages 1088-1100.
3. Tansel, I.N., Arkan, T.T., Bao, W.Y., Mahendrakar, N., Shisler, B., Smith, D., McCool, M., 2000. "Tool Wear Estimation in Micro-Machining. Part I: Tool Usage-Cutting Force Relationship", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, Pages 599-608.
4. Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., Yang, S., Cooke, K.E., Teer, D.G., 2008. "Evaluation and Selection of Hard Coatings for Micro Milling of Hardened Tool Steel", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 48, Pages 1578- 1584.
5. Sein, H., Ahmed, W., Jackson, M., Woodward, R., Polini, R., 2004. "Performance and Characterisation of CVD Diamond Coated, Sintered Diamond and WC-Co Cutting Tools for Dental and Micromachining Applications", Thin Solid Films, Volume 447-448, Pages 455-461.
6. Baharudin, B.T.H.T., Dimou, N., Hon, K.K.B., 2004. "Tool Wear Behaviour of Micro-Tools in High Speed Cnc Machining", Proceedings of the 34th International MATADOR Conference, 7-9 July, Manchester, England, Pages 111-118.
7. Uhlmann, E., Sascha, P., Schauer, K., 2005. "Micro Milling of Sintered Tungsten Copper Composite Materials", Journal of Materials Processing Technology, Volume 167(2-3), Pages 402-407.
8. Chang, C., Liao, Y., Wang, G.Z., Ma, Y.R., Fang, R.C., 2003. "CVD Diamond Growth", Byrappa, K., Ohachi, T., (Ed.), Crystal Growth Technology, Volume 93-132 Springer Heidelberg, Pages 611, Newyork.
9. Jackson, M.J., Gill, M.D.H., Sein, H., Ahmed, W., 2003. "Manufacture of Diamond Coated Cutting Tools for Micromachining Applications", Proceedings of IMechE Part L: Journal of Materials Design and Applications, Volume 217(1), Pages 77-83.
10. Sein, H., Ahmed, W., Jackson, M., Woodward, R., Polini, R., 2004. "Performance and Characterisation of CVD Diamond Coated, Sintered Diamond and WC-Co Cutting Tools for Dental and Micromachining Applications", Thin Solid Films, Volume 447-448, Pages 455-461.
11. Torres, C.D., Heaney, P.J., Sumant, A.V., Hamilton, M.A., Carpick, R.W., Pfefferkorn, F.E., 2009. "Analyzing the Performance of Diamond Coated Micro End Mills", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 49, Pages 599-612.
12. Zaman, M.T., Senthil Kumar, A., Rahman, M., Sreeram, S., 2006. "A Three-Dimensional Analytical Cutting Force Model for Micro End Milling Operation", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46(3-4), Pages 353-366.
13. Weinert, K., Petzoldt, V., 2008. "Machining NiTi Micro-Parts by Micro-Milling", Materials Science and Engineering-A, Volume 481-482, Pages 672-675.
14. Li, P., 2009. "Micromilling of Hardened Tool Steels", Technical University of Delft, PhD Thesis, 160p, Delft.
15. Ucu I., Aslantas K., Bedir F. "An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of inconel 718 super alloy" 2013;8-19

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

16. Niknam S. A., Songmene V., 2014. "Analysis of Friction and Burr Formation in Slot Milling" Procedia CIRP Volume 17, Pages 755–759
17. Erdemir, A., Fenske, G.R., Terry, J., Wilbur, P., 1997. Effect of Source Gas and Deposition Method on Friction and Wear Performance of Diamond like Carbon Films. *Surface and Coatings Technology*, 94-95, 525-530.
18. Sheeja, D., Tay, B.K., Lau, S.P., Shi, X., 2001. Tribological Properties and Adhesive Strength of DLC Coatings Prepared Under Different Substrate Bias Voltages. *Wear*, 249, 433–439.
19. Sedlacek, M., Podgornik, B., Vizintin, J., 2008. Tribological Properties of DLC Coatings and Comparison with Test Results: Development of A Database. *Materials Characterization*, 59, 151 – 161.
20. Taube, K., Grischke, M., Bewilogua, K., 1994. Improvement of Carbon-based Coatings for Use in the Cold Forming of Non-Ferrous Metals. *Surface Coatings and Technology*, 68-69, 662-668.
21. Choi, H.W., Gage, D.M., Dauskardt, R.H., Lee, K.R., Oh, K.H., 2009. Effects of Thermal Annealing and Si Incorporation On Bonding Structure and Fracture Properties of Diamond-Like Carbon Films. *Diamond and Related Materials*, 18, 615-619.

KESİCİ TAKIM TEKNOLOJİSİ – 2

SERTLEŞTİRİLMİŞ SOĞUK İŞ TAKIM ÇELİĞİNİN İŞLENMESİNDE KESİCİ TAKIMDA OLUŞAN GERİLMELERİN İNCELENMESİ

Mehmet Erdi KORKMAZ^a, Mustafa GÜNAY^a

*a, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük/TÜRKİYE,
merdikorkmaz@karabuk.edu.tr
mgunay@karabuk.edu.tr*

Özet

Bu çalışmada, sertleştirilmiş DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliği malzemesi üzerinde sert tornalama yöntemiyle işleme deneyleri yapılmıştır. Taguchi L_{27} deney tasarımı uygulanarak gerçekleştirilen deneyler sonrasında; kesme derinliği, ilerleme miktarı, kesme hızı ve kesici uç yarıçapının kesici takımında oluşan kesme kuvveti ve gerilmeler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen kuvvet değerleri kullanılarak ANSYS paket programı yardımıyla kesici takımında meydana gelen gerilmeler sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Hesaplanan bileşke kuvvet (F_R) değerleri ve von-Mises (S_{EQV}) gerilmeleri grafik halinde yorumlanarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Son olarak her bir kesici uç yarıçapı için alınan birer aşınma görüntüsü ile sonlu elemanlar analizinden alınan görüntüler karşılaştırılmış ve görüntülerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuç, analizde kullanılan yöntemlerin ve sınır şartlarının, kesici takımın aşınmasının başlangıç yerini tespit etmede büyük rol oynadığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Sert tornalama, DIN 1.2210, kesme kuvveti, sonlu elemanlar yöntemi.

INVESTIGATION OF CUTTING TOOL STRESSES ON MACHINING OF HARDENED COLD WORK TOOL STEEL

Abstract

In this study, machining experiments on DIN 1.2210 hardened cold work tool steel by hard turning process were carried out. The effects of cutting depth, feed rate, cutting speed and tool nose radius on cutting forces and stresses in cutting tool were determined in the experiments carried out with L_{27} experimental design. In this study on ceramic cutting tools, stresses on cutting tool were analyzed with ANSYS package program by the help of cutting forces measured by dynamometer. The calculated resultant cutting force and cutting tool stresses values were graphically interpreted, the results were evaluated. Finally, a wear image of each tool nose radius and the images from finite element analysis have been compared and it was seen that the images are very similar. This result shows that the methods and boundary conditions in analysis play a big role to estimate the initial point of cutting tool wear.

Keywords: Hard turning, DIN 1.2210, cutting force, finite element method.

1. GİRİŞ

Farklı geometrilerdeki iş parçalarını talaşlı imalat yöntemiyle şekillendirebilmek için çeşitli talaşlı imalat işlemleri ve işlemlere özgü takım tezgâhları geliştirilmiştir. Talaşlı imalat işlemlerinde; kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, enerji tüketimi gibi işleme çıktılarına etkileyen en önemli kesme parametreleri, kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliğidir [1]. Kesme kuvvetleri, kesici takım performansını doğrudan etkilemesi sebebiyle, talaşlı imalatta önem arz eden hususlardan birisidir. Ayrıca, takım tezgâhı imalatı yapanlar için kesme kuvvetlerinin bilinmesi gerekir. Çünkü tezgâh gücünün ne olması gerektiği bilindiği takdirde tezgâhın parçaları kesme kuvvetleri sonucu oluşan gerilmelere dayanabilecek rijitlikte ve titreşimsiz olarak tasarlanabilir. Talaş kaldırma parametrelerinin işlenebilirliğe etkileri birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve halen de araştırılarak en uygun kesme koşulları tespit edilmeye çalışılmaktadır [2]. Günümüzde sertleştirilmiş çelikler, yüksek aşınma dirençleri ve dayanımları nedeniyle başta makinelerin aşınabilecek kısımları olmak üzere birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir [3]. Özellikle, kesici takımlar alanında sağlanan gelişmeler sonucunda, sertleştirilmiş çeliklerin geleneksel talaşlı imalat yöntemleriyle (tornalama, frezeleme vb.), taşlama işlemine gerek kalmadan, son geometrilerinde işlenmesi mümkün hale gelmiştir [4].

Ucun ve arkadaşları, çok kaplamalı kesici takımla tornalama işleminde deneysel olarak tespit edilemeyen ya da tespit edilmesi çok zor olan bazı verileri (takım gerilmeleri, takımdaki sıcaklık dağılımı vb.) sonlu elemanlar yöntemiyle modellemeyi amaçlamışlardır. AISI 4340 çeliği kullanılarak yapılan deneylerde beş farklı kesme hızı ve dört farklı ilerleme miktarı seçilmiştir. Deneyler sonucunda, kesme hızının artmasıyla takım yüzeyinde meydana gelen gerilmelerin azaldığı, fakat ilerleme miktarının artmasıyla bu gerilmelerin arttığı sonucuna varmışlardır. DEFORM 2D yazılımı kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizinde, benzer sonuçlarla karşılaşmışlardır. Deneysel veriler ile sonlu elemanlar analizi arasında yaklaşık % 10'luk bir hata olduğunu ve dolayısıyla oluşturulan modelin kabul edilebilir olduğunu belirtmişlerdir [5]. Umbrello ve arkadaşları, AISI H13 takım çeliğinin sert tormalanmasının sayısal simülasyonu için sertliğe bağlı akma gerilmelerini incelemişlerdir. Malzeme sertliği, kesme hızı ve kesme derinliği gibi kesme parametreleri kullanılarak yapılan deneyler sonucunda kesme hızının artmasıyla takım üzerinde oluşan gerilmelerin azaldığı, fakat malzemenin sertliğinin artmasıyla gerilmelerin arttığı sonucuna varmışlardır. DEFORM yazılımı kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizi ile deneylerden elde edilen veriler karşılaştırıldığında, sonuçların çok yakın olduğunu fark etmişlerdir. Buradan, sonlu elemanlar modelinin kullanılabilirliğinin çok yüksek olduğunu vurgulamışlardır [6]. Kurt ve Şeker, Al 2007 alüminyum alaşımının dik kesme işleminde kullanılan 0.1, 0.2 ve 0.4 mm paso derinliğinin normal, kayma ve von Mises gerilmeleri üzerindeki etkilerini ANSYS yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve derinliğe bağlı olarak kesme kenarındaki gerilmelerin değişimini incelemişlerdir. Analiz sonucunda, bütün paso derinlikleri için maksimum von Mises gerilmesinin yaklaşık olarak yuvarlatılmış kenarın orta noktasında gerçekleştiği görülmektedir. Esas kesme kuvvetinin radyal kuvvetten büyük olması sebebiyle, Y-ekseni doğrultusundaki normal gerilmelerin, X-ekseni doğrultusundaki normal gerilmelerden daha büyük olduğu gözlenmiştir [7]. Literatür genel olarak değerlendirildiğinde; talaşlı imalat işlemlerinde oluşan kesme kuvvetlerinin ölçülmesi ve modellenmesi üzerine birçok çalışmanın yapıldığı görülmektedir. Ayrıca, farklı malzemelerin değişik kesme şartları altında sonlu elemanlar yöntemi esaslı nümerik analiz ve talaş kaldırma simülasyonlarının gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda, kesme kuvvetleri, takım aşınması, takım gerilmeleri, kesme sıcaklıkları vb. işleme çıktıları analiz edilmiştir. Fakat özellikle sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde oluşan kesme kuvvetleri, kesici takım üzerinde meydana gelen gerilmeler ve bunların matematiksel modelleri ile ilgili yeterli çalışmanın olmadığı belirlenmiştir.

Bu çalışmada, sertleştirilmiş DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliğinin tormalanmasında kesme derinliği, ilerleme miktarı, kesme hızı ve kesici uç yarıçapının kesici takımda oluşan kesme kuvveti ve gerilmeler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. ANSYS paket programı yardımıyla kesici takımda meydana gelen gerilmeler sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. Son olarak deneylerden alınan aşınma görüntüleri ile sonlu elemanlar analizinden alınan görüntüler karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deney Numuneleri

Deneysel çalışmalarda, DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliği iş parçası malzemesi olarak kullanılmıştır. Kılavuzlar, iticiler, pimler, deliciler, zımbalar, havşa açma takımları, matkaplar, raybalar, oyma takımları kılavuz pimleri, burğu matkaplar, delik açma zımbaları, eğeler, miller ve hassas ölçü gerektiren makine parçalarının imalatında kullanılmaktadır [8]. Ülkemizde civa çeliği olarak isimlendirilen DIN 1.2210, krom ve vanadyum alaşımı, kolay işlenebilen ve ısı işlem yapılabilen, kesici kenarlardan parça kopmama özelliğine sahip, aşınmaya dirençli bir soğuk iş takım çeliğidir. DIN 1.2210 çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

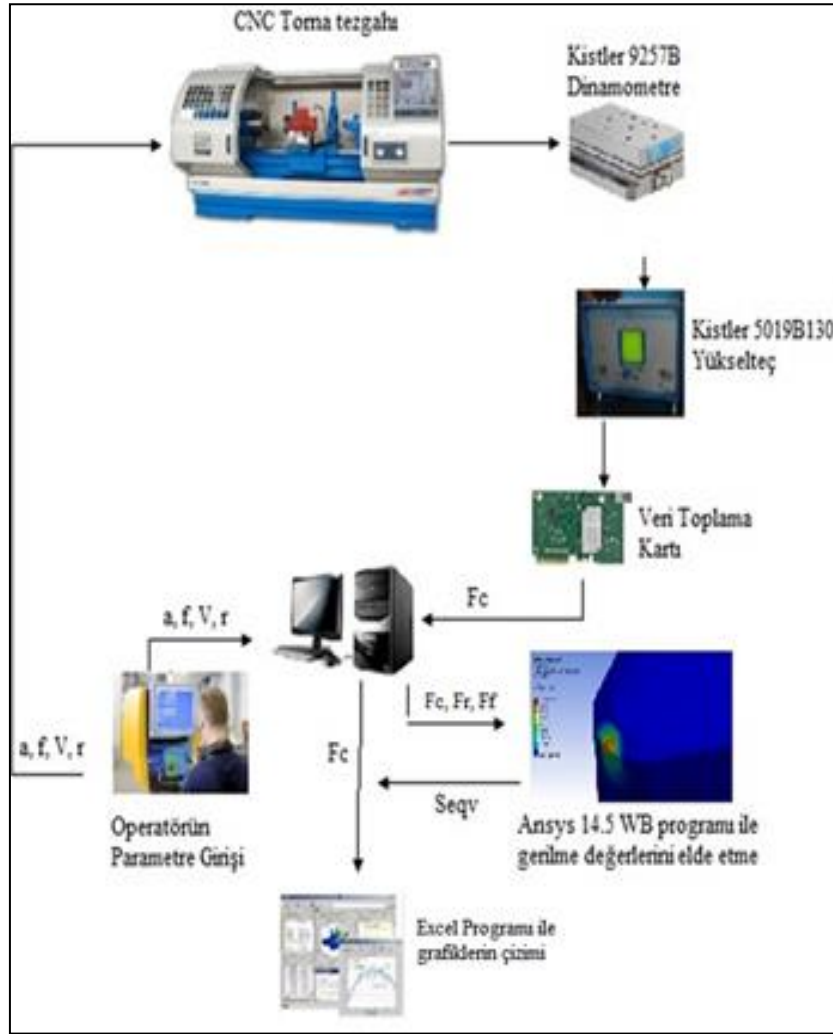
Tablo 1. Deney numunesinin kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %).

C	Si	Mn	Cr	V	P	S	Fe
1,10-1,25	0,15-0,30	0,20-0,40	0,50-0,80	0,07-0,12	0,03	0,03	Kalan

2.2. Deney düzeneği

Deneylerde kullanılan takım tezgahı, Johnford TC 35 CNC Fanuc-OT marka olup motor gücü 20 HP’dir. İşleme deneylerinde, kesici takım olarak KYOCERA firmasından temin edilen PVD yöntemiyle TiN kaplamalı DNGA150604S01525, DNGA150606S01525 ve DNGA150612S01525 kodlu seramik kesici takımlar kullanılmıştır. Takım tutucu olarak ise kesici takımların rijit bir şekilde bağlanmasını sağlayan PDJNR 2525M-15 kodlu KYOCERA ürünü dış tornalama kateri kullanılmıştır. Kesici takım ile takım tutucunun birleşmesiyle; etkin talaş açısı (γ_c) -31° , boşluk açısı (α) -6° , talaş açısı (γ) -6° ve yanaşma açısı (χ_r) 93° olarak oluşmuştur.

Silindirik tornalama esnasında oluşan üç kuvvet bileşeni olan; esas kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvet (F_r), KISTLER 9257B tipi piezoelektrik dinamometre ile ölçülmüştür. Deney düzeneği ve deneysel verilerin analiz aşamaları Şekil 1’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği

2.3. Deney Tasarımı

Taguchi yöntemine göre yapılan deney tasarımında, ilk olarak kesme parametreleri belirlenmiş ve bu amaçla, A- Kesme derinliği (mm), B- İlerleme miktarı (mm/dev), C- Kesme hızı (m/dak), D- Kesici uç yarıçapı (mm) olmak üzere dört faktör seçilmiştir. Bu faktörlerin seviyeleri ise kesici takım firması ve literatürdeki sert tormalama işlemleri dikkate alınarak tespit edilmiştir. Bu faktör ve seviyelere göre yapılan deney tasarımı için L_{27} dikey dizini kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan faktörler ve seviyeleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Faktörler ve seviyeleri.

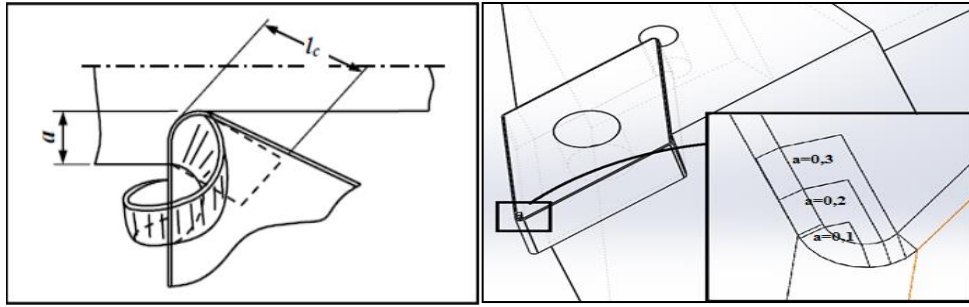
Sembol	Faktörler	Seviye		
		1	2	3
A	Kesme derinliği, a (mm)	0,1	0,2	0,3
B	İlerleme miktarı, f (mm/dev)	0,05	0,1	0,15
C	Kesme hızı, V (m/dak)	90	120	150
D	Kesici uç yarıçapı, r (mm)	0,4	0,8	1,2

Sert tormalama deneyleri, her bir deney için iki tekrarlı olarak yapılmıştır. Deneysel sonuçlara %95 güven aralığında varyans analizi (ANOVA) uygulanarak bileşke kuvvet (F_R) üzerinde değişkenlerin etki seviyeleri belirlenmiştir. Deney tasarımı ve varyans analizi Minitab17 paket programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

2.4. Analiz Çalışmaları

Kesici takımında oluşan gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak ANSYS 14.5 paket programı kullanılarak analiz edilmesi amacıyla çözüm öncesinde bazı hazırlıklar yapılmıştır. Bu hazırlıklar; kesici takımlara ait katı modellerin oluşturulması, kesici takımlar için gerekli malzeme modellerinin çıkartılması, kullanılacak eleman tipi ve eleman boyutunun belirlenmesi, katı modellerin elemanlara ayrılması (ağ oluşturma, meshing), sınır şartlarının belirlenmesi, yükleme durumunun belirlenmesi ve kullanılacak çözüm metodunun seçilmesi olarak özetlenebilir.

Solidworks ile oluşturulan modelin ANSYS'te düzenlenerek katı model oluşturulması sırasında, kesme kuvvetlerinin literatüre uygun olarak kesici uca uygulanması amacıyla Toropov ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalara göre belirlenen ve deneysel çalışmalarla da doğrulanan Eş. 1'deki takım-talaş temas boyu dikkate alınmıştır [9]. Buna göre kesici takımların katı modelleri, Şekil 2'de gösterilen takım-talaş temas alanı dikkate alınarak, takım-talaş temas boyu (l_c) ve kesme derinliği (a)'ne göre oluşturulmuştur. Eş. 1'de λ talaşın yığılma faktörünü göstermektedir.



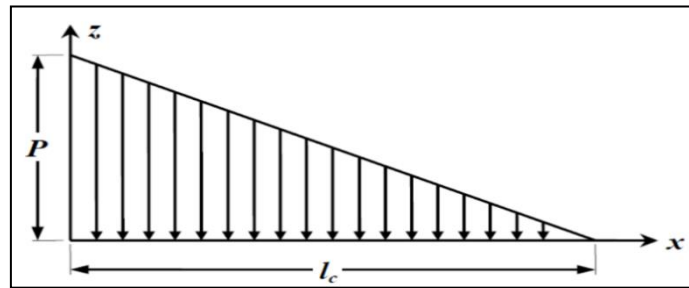
Şekil 2. Takım-talaş temas alanı [10].

$$l_c = 2 \cdot \lambda \cdot a$$

(1)

Sert tornalama deneyleri sonucunda ölçülen kesme kuvveti bileşenleri (F_c , F_f , F_r) Şekil 2'de seramik kesici takımlar için belirlenen takım-talaş temas alanına uygulanmıştır. Yapılan denemeler ve literatürden desteklenen sonuçlara göre ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvet (F_r) kesici uç yarıçapının takım-talaş temas alanı içinde kalan pahlı kısmına düğüm başına gelen kuvvet biçiminde, esas kesme kuvveti (F_c) ise tüm takım-talaş temas alanı üzerine üçgen yayılı yük şeklinde uygulanmıştır [10].

Analizlerde F_c 'nin esas kesme kenarı üzerinde en yüksek olacak şekilde üçgen yayılı yük olarak uygulanmasında; Şekil 3'te gösterilen yükleme durumu referans alınmıştır. Yayılı yükleme için ANSYS'te program tarafından girilmesi istenilen basınç değeri (Şekil 3'te "P" ile gösterilmiştir) Eş. 2'ye göre ve eğim değeri de Eş. 3'e göre hesaplanmıştır.



Şekil 3. F_c 'nin yayılı yük biçiminde uygulanması [10].

$$P = \frac{2 \cdot F_c}{l_c}$$

(2)

$$Eğim = -\frac{P}{l_c} \quad (3)$$

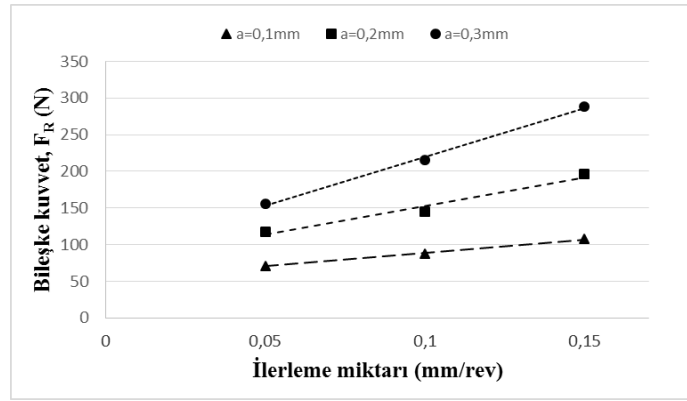
Analiz öncesinde yapılan bu hazırlıklar sonrasında analiz tipi olarak statik (denge durumu) analiz kullanılmıştır. Kesici takım ile takım tutucu arasında yapışık bağlantı tipi uygulanmıştır. Gerilme analizi sonuçlarının değerlendirilmesinde, kesici takım kırılma kriteri olarak von Mises (S_{EQV}) gerilmesi kullanılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

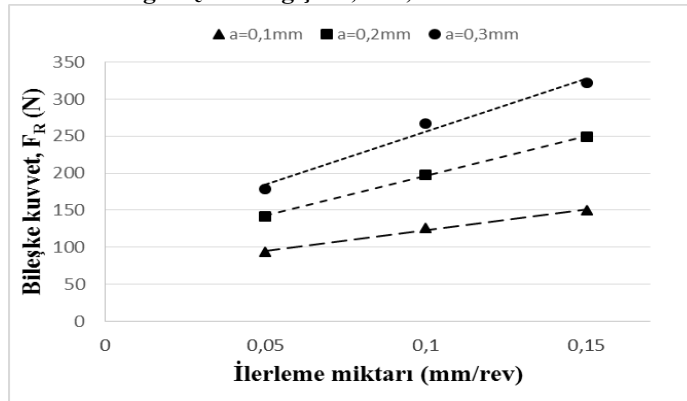
3.1. Kesme Kuvveti Analizi

Sert tornalama sonucunda oluşan kesme kuvvetlerinin analizinde, F_c , F_r , F_f kuvvet bileşenlerinin üçü de von-Mises gerilmeleri açısından önemli olduğu için bu üç kuvvetin bileşkesi olan F_R değerleri dikkate alınmıştır (Eş. 4). Farklı kesici uç yarıçapına sahip kesici takımlarla elde edilen F_R değerlerinin değişimini daha detaylı incelemek için grafikler oluşturulmuştur. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da kesme derinliği (a), ilerleme miktarı (f) ve kesme hızı (V)'na bağlı olarak F_R 'nin değişimi grafik olarak verilmiştir.

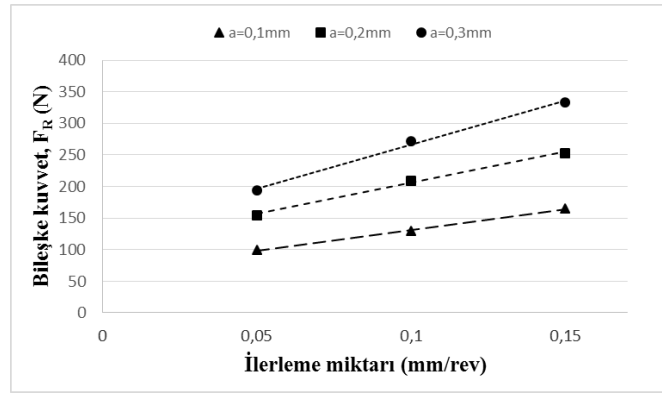
$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_r^2 + F_f^2} \quad (4)$$



Şekil 4. Kesme parametrelerine bağlı F_c 'nin değişimi; $r=0,4$ mm.



Şekil 5. Kesme parametrelerine bağlı F_c 'nin değişimi; $r=0,8$ mm.



Şekil 6. Kesme parametrelerine bağlı F_c 'nin değişimi; $r=1,2$ mm.

Kesici takım geometrisinin talaş oluşumunu ve dolayısıyla kesme kuvvetlerini olumlu veya olumsuz etkileyen önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Bu bağlamda, Şekil 4-6 yardımıyla kesici uç yarıçapı (r)'nın bileşke kuvvet üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Kesici uç yarıçapı arttıkça, F_R değerlerinde belirli bir artışın olduğu (yaklaşık %10) gözlemlenmiştir. Bu sonuç, kesici uç yarıçapı (r)'ndaki artışın daha çok radyal kuvvet (F_r)'i etkileyeceği [11], dolayısıyla F_R 'yi artıracığı bilgisi ile paralellik göstermektedir. Grafikler genel olarak incelendiğinde, üç farklı kesici uç yarıçapı için kesme kuvvetindeki değişimlerin benzer olduğu görülmektedir. Grafikler incelenecek olursa; kesme derinliğinin artmasıyla birlikte bileşke kuvvetinin de belirli bir oranda arttığı görülmektedir. Üç farklı kesici uç yarıçapı için de bu sonuç paralellik göstermektedir. Diğer yandan, ilerleme miktarının artması ile kesme kuvvetindeki artışın düzenli bir eğilimde olduğu görülmektedir (Şekil 4-6). İlerleme miktarı (f) ve kesme derinliği (a)'nin artmasıyla birlikte kesme kuvvetlerinin artması talaşlı imalatta beklenen bir durumdur. Bu sonucun nedeni olarak, f ve a değerlerindeki artışla beraber artan takım-talaş temas alanı ve dolayısıyla talaş oluşumuna harcanan enerji tüketiminin artmasını göstermek mümkündür.

Şekil 4-6'dan da anlaşılacağı gibi, deneysel sonuçlar ışığında en küçük F_R değeri; $r=0,4$ mm'lik kesici takımla, kesme hızının 90 m/dak, ilerleme miktarının 0,05 mm/dev ve kesme derinliğinin 0,1 mm olduğu durumda 71,19 N olarak ölçülmüştür. En büyük bileşke kuvvet; $r=1,2$ mm'lik kesici takımla, kesme hızının 90 m/dak, ilerleme miktarının 0,15 mm/dev ve kesme derinliğinin 0,3 mm olduğu durumda 333,46 N olarak ölçülmüştür.

DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliği malzemesinin işlenmesinde kesici uç yarıçapı, ilerleme miktarı, kesme hızı ve kesme derinliği (Faktörler)'nin üç farklı seviyesi kullanılarak toplam 27 adet deney yapılmıştır. Faktörlerin F_R üzerindeki etki seviyelerini belirlemek amacıyla % 95 güven düzeyinde yapılan varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Burada, her bir faktör/değişkenin önem seviyesini gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO), F değerleri ve yüzde etki oranları (PCR) görülmektedir. Değişkenlerin önem seviyesi, ANOVA tablosundaki P değeri dikkate alınarak belirlenmektedir. Herhangi bir değişkenin kuvvet üzerinde etkili olduğunu söyleyebilmek için % 95 güven seviyesinde P değerinin 0,05'ten düşük olması gerekmektedir.

Tablo 3. Bileşke kuvvet için ANOVA sonuçları.

Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F değeri	P değeri	PCR (%)
a (mm)	2	205,837	102,919	440,46	0,000	60,99
f (mm/dev)	2	93,509	46,754	200,1	0,000	27,70
V (m/dak)	2	0,174	0,087	0,37	0,694	0,05
r (mm)	2	33,745	16,872	72,21	0,000	10,02
Hata	18	4,206	0,234			1,24
Toplam	26	337,471				100

Tablo 3'e bakıldığında, bileşke kuvvet üzerinde en fazla öneme sahip değişken % 60,99 PCR ile kesme derinliği olarak bulunmuştur. F_R üzerinde ikinci derecede öneme sahip değişken ise % 27,7 PCR ile ilerleme miktarıdır.

Ayrıca, kesici uç yarıçapı % 10,02'lik PCR değeri ile az da olsa önemli bir faktördür. Diğer yandan, ANOVA tablosundaki P değerlerine göre, bu kesme şartları için kesme hızının % 95 güven düzeyinde F_R için önemli olmadığı belirlenmiştir.

3.2. Gerilme Analizi

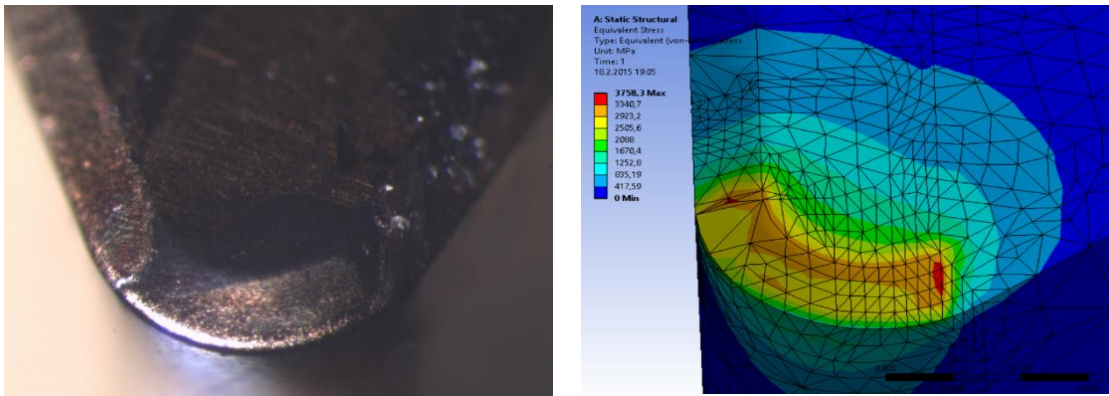
DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanması sırasında oluşan kesme kuvvetleri ölçülmüş olup, bu kuvvetler kullanılarak her bir kesici uç yarıçapı için 3 adet gerilme analizi yapılmıştır. Kesme derinliği (a), ilerleme miktarı (f), kesme hızı (V) sabit tutulup, kesici uç yarıçapı (r)'nin artırılmasına bağlı olarak kaplamalı seramik kesici takımlarda oluşan gerilmeler sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenmiştir. Gerilme analizleri sonucunda, uç yarıçapının kesici takım üzerindeki etkileri von Mises (S_{EQV}) gerilmelerine göre değerlendirilmiştir.

Analizler incelendiğinde, kesici uç yarıçapının artmasıyla von Mises gerilmelerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, kesici uç yarıçapının artmasıyla talaş takım temas alanındaki artışın, kesme kuvvetlerindeki artıştan daha büyük olmasına atıf edilebilir.

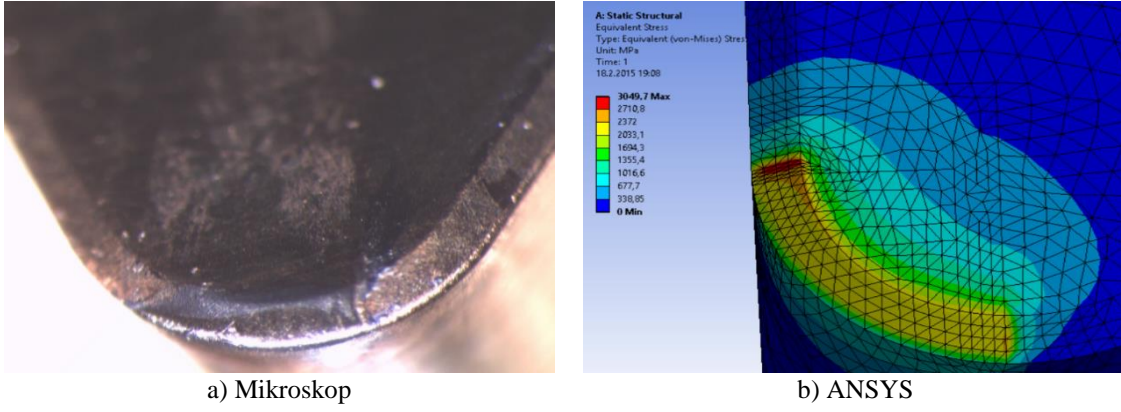
Gerilme analizi sonuçları incelendiğinde; kesme derinliğinin 0,3 mm ve ilerleme miktarının 0,15 mm/dev olduğu durumda von Mises (S_{EQV}) gerilmeleri $r=0,4$ mm'lik kesici takımla 3758 MPa, $r=0,8$ mm'lik kesici takımla 3050 MPa ve $r=1,2$ mm'lik kesici takımla 2429 MPa olarak bulunmuştur.

DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliğinin kaplamalı seramik kesici takımlar ile sert tornalanması sonucu oluşan von Mises gerilmeleri ANSYS 14.5 paket programı yardımıyla elde edilmiştir. Kesici takımlarda meydana gelebilecek aşınma bölgesinin veya aşınma biçiminin, özellikle von Mises gerilme dağılımlarına bağlı olarak tahmin edilebileceğinden bahsedilmektedir [12]. Bu bağlamda, 0,4 mm, 0,8 mm ve 1,2 mm kesici uç yarıçapı için ANSYS ile gerçekleştirilen gerilme analizi sonuçları (S_{EQV}) Şekil 7b, Şekil 8b ve Şekil 9b'de gösterilmiştir. Ayrıca, hem ANSYS programından elde edilen sonuçların tutarlılığını göstermek, hem de kesici takımlarda olası muhtemel aşınma bölgesini belirlemek için Nikon SMZ745T model takım mikroskobundan görüntüler alınmıştır (Şekil 7a-9a).

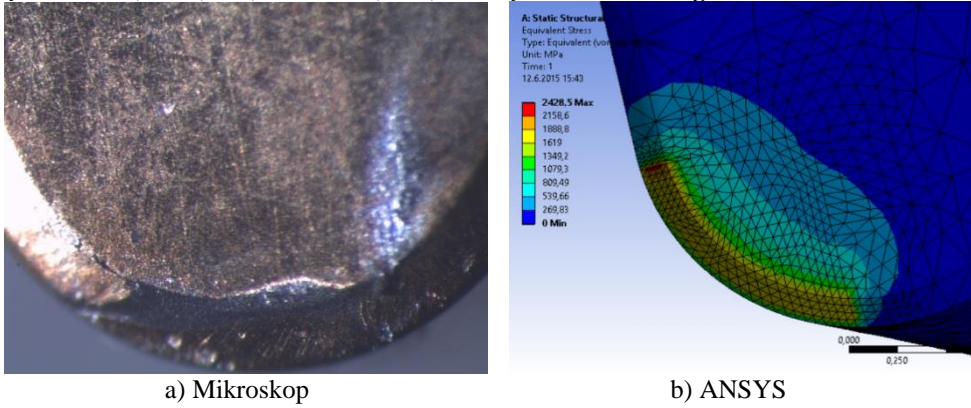
Kesici takımın olası muhtemel aşınma bölgelerinin tespiti için ANSYS'te yapılan gerilme analizi sonucunda oluşan takım görüntüleri ile takım mikroskobuyla kesici takımlardan alınan fotoğraflar çok benzerdir. Bu sonuç, gerilme analizinde kullanılan takım-talaş temas alanı modeli ve kesme kuvveti bileşenlerinin seçilen takım talaş alanına uygulanması yönteminin doğruluğunu göstermektedir.



a) Mikroskop
b) ANSYS
Şekil 7. $a=0,3$ mm, $f=0,15$ mm/dev, $r=0,4$ mm için kesici takım görüntüleri.



Şekil 8. $a=0,3\text{mm}$, $f=0,15\text{mm/dev}$, $r=0,8\text{mm}$ için kesici takım görüntüleri.



Şekil 9. $a=0,3\text{mm}$, $f=0,15\text{mm/dev}$, $r=1,2\text{mm}$ için kesici takım görüntüleri.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sertleştirilmiş DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliği malzemesi üzerinde sert tornalama yöntemiyle işleme deneyleri yapılmış; kesme derinliği, ilerleme miktarı, kesme hızı ve kesici uç yarıçapının kesici takımda oluşan kesme kuvveti (bileşke kuvvet) ve gerilmeler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

- DIN 1.2210 soğuk iş takım çeliğinin kaplamalı seramik kesici takımlar ile işlenmesinde, ilerleme miktarı, kesme derinliği ve kesici uç yarıçapının artmasıyla bileşke kuvvetinde bir artış olduğu belirlenmiştir.
- En küçük F_R değeri; $r=0,4$ mm'lik kesici takımla, kesme hızının 90 m/dak, ilerleme miktarının 0,05 mm/dev ve kesme derinliğinin 0,1 mm olduğu durumda 71,19 N olarak ölçülmüştür. En büyük bileşke kuvvet; $r=1,2$ mm'lik kesici takımla, kesme hızının 90 m/dak, ilerleme miktarının 0,15 mm/dev ve kesme derinliğinin 0,3 mm olduğu durumda 333,46 N olarak ölçülmüştür.
- Faktörlerin F_R üzerindeki etki seviyelerini belirlemek amacıyla % 95 güven düzeyinde varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. F_R üzerinde en fazla öneme sahip değişken % 60,99 PCR ile kesme derinliği olarak bulunmuştur.
- Sonlu elemanlar analizi sonucunda, aynı ilerleme ve kesme derinliğinde kesici takım yarıçapının artmasıyla kesici takım gerilmelerinin azaldığı belirlenmiştir.
- Kesici takımların Mikroskoptan alınan görüntüleriyle ANSYS'ten alınan görüntüleri karşılaştırılmış ve görüntülerin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, analizde kullanılan yöntemlerin ve sınır şartlarının, kesici takımın aşınmasının başlangıç yerini tespit etmede büyük rol oynadığını göstermektedir.

SEMBOLLER

a: Kesme derinliği

f: İlerleme miktarı

F_c : Esas kesme kuvveti

F_f : İlerleme kuvveti

F_r : Radyal kuvvet

F_R : Bileşke kuvvet

l_c : Takım–talaş temas boyu

r: Kesici uç yarıçapı

S_{EQV} : Von-Mises gerilmesi

V: Kesme hızı

γ_e : Etkin talaş açısı

α : Boşluk açısı

γ : Talaş açısı

χ : Yanaşma açısı

λ : Talaşın yığılma faktörünü

KAYNAKLAR

[1] DeGarmo, E. P., Black, J. T. and Kohser, R. A., 2013, Materials and Processes in Manufacturing, ISBN : 978-0-470-87375-5, Prentice-Hall Inc., New Jersey.

[2] Yurtkuran H., 2013. “DIN 1.2344 çeliğinin tormalanmasında oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

[3] Shivpuri, R., 2005. “Dies and die materials for hot forging”, Dies and Die Materials ASM Handbook, ASM International, US, pages 47–61.

[4] Grzesik, W., Rech, J. and Wanat, T., 2007. “Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, volume 47, pages 255–262.

[5] Uçun, İ., Aslantaş, K. ve Apaydın, D., 2010. “Çok kaplamalı kesici takım ile tormalama işleminin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, cilt 7, sayı 1, s. 69-82.

[6] Umbrello, D., Rizzutia, S., Outeiro, J. C., Shivpuri, R. and M’Saoubi, R., 2008. “Hardness-based flow stress for numerical simulation of hard machining AISI H13 tool steel”, Journal of Materials Processing Technology, volume 199, issue 1-3, pages 64-73.

[7] Kurt, A. ve Şeker, U., 2005. “Kesici takım gerilmelerinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt 20, sayı 4, s. 491-497.

[8] Korkmaz, M. E., 2015. “Sertleştirilmiş soğuk iş takım çeliğinin işlenmesinde kesici takımda oluşan gerilmelerin modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

[9] Toropov, A. and Ko, S. L., 2003. "Prediction of tool-chip contact length using a new slip-line solution for orthogonal cutting", International Journal of Machine Tools and Manufacturing, volume 43, issue 12, pages 1209–1215.

[10] Kurt, A., 2006. "Talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve mekanik gerilmelerin deneysel olarak incelenmesi ve matematiksel modellerinin oluşturulması", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[11] Günay, M., 2013. "AISI 316L çeliğinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu", Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt 28, sayı 3, s. 437-444.

[12] Kurt, A., 2009. "Modelling of the cutting tool stresses in machining of Inconel 718 using artificial neural networks", Expert Systems with Applications, volume 36, issue 6, pages 9645-9657.

316L ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLERİN FREZELENMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN KESME KUVVETLERİ VE TAKIM AŞINMASI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Yusuf Fedai^a ve Ali Ünüvar^b

*a, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye MYO Osmaniye/TÜRKİYE, yusuffedai@osmaniye.edu.tr
b, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Müh. Bölümü, Konya/TÜRKİYE, aunuvar@selcuk.edu.tr*

Özet

Talaşlı imalatta işlenebilirlik kabiliyetini belirlemede genellikle, kesme kuvvetleri, takım ömrü, aşınma ve yüzey kalitesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada AISI 316L paslanmaz çeliklerin frezelemesinde, işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve takım aşınması üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve bulunan sonuçlar yorumlanmıştır. Yapılan 25 deneyde kesme kuvvetleri ile takım aşınması ölçülmüştür. Kuvvetlerin aşınma üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre aynı işleme parametrelerinde aşınmaya bağlı olarak kuvvetlerdeki artış ortalama %55 civarında olmaktadır. Takım tahribatında en fazla kırılma ve çentiklenme görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: 316L Paslanmaz Çelik, Kesme kuvvetleri, Takım Aşınması

THE EFFECTS OF MACHINING PARAMETERS ON THE CUTTING FORCES AND TOOL WEAR IN MILLING OF AISI 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL

Abstract

In machining, cutting forces, tool life and surface quality are commonly used to define machinability. In this study, the effects of machining parameters on the cutting forces and tool wear were investigated and discussed in milling of AISI 316L stainless steel. As a result of 25 experimental, cutting forces and tool wear were obtained. The effects of cutting force and tool wear were measured and investigated in the experimental study. Experimental results have shown that the increase in cutting forces due to wear is about average 55 per cent in same cutting conditions. Tool failure observed the mode of fracture and notching.

Keyword: 316L Stainless steel, Cutting forces, Tool wear

1. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler, bileşimlerinde % 10,5 üzeri krom (Cr) ve %25'e kadar nikel içeren demir esaslı alaşımlarıdır. Paslanmaz çelikler, yüksek korozyon direnci, düşük ısıl iletkenlikleri, kimyasal bileşiminden kaynaklanan özellikler ortaya koymakta ve bu avantajlarıyla imalat sanayinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadırlar. Paslanmaz çeliklerin temel karakteristiklerini krom, nikel, karbon, kükürt ve molibden gibi elementler oluştururlar. Bu elementler alaşıma işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyen ve imalat safhasında büyük problemler meydana getiren yüksek mekanik özellikler, yüksek deformasyon sertleşmesi ve süneklik gibi özellikler kazandırır[1].

Paslanmaz çelikler, düşük ısıl iletkenlik özellikleriyle işlenmesi zor malzemeler sınıfına girmektedir. Bu özellikler yüksek kesme kuvvetleri, yüksek kesme sıcaklığı, hızlı takım aşınması, zor talaş kırılabilirliği, takım kesici kenarına talaş yapışması ve kötü yüzey kalitesine sebep olmaktadır[2,3]. Bu sebeple paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesme parametrelerinin seçimi işleme maliyetlerinin düşmesi verimin artması ve ürün kalitesinin yükselmesinde önemli rol oynar. Bu bağlamda kuvvetlerin ölçülmesi optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi açısından çok önemlidir. Çünkü kesme kuvvetlerinin takım ömrü üzerinde büyük bir etkisi vardır[4].

Çalışma esnasında yüksek kesme kuvvetleri aşırı ısınma, kesici takıma talaş sıvanması gibi sebeplerden dolayı düşük bir kesme yüzeyi kalitesi elde edilmektedir.

Paslanmaz çeliklere bazı kimyasal bileşenlerin değişik oranlardaki katkıları, işlenebilirliğinin iyileştirilmesi gibi farklı özellikler kazandırmasına yol açar. AISI 316 paslanmaz çeliğinin tornalamada işlenebilirliğinin incelendiği bir çalışmada ölçülen esas kesme kuvveti (Fc)'nin daha yüksek olduğu ve bunun malzemenin kimyasal bileşimindeki %2 Mo'den kaynaklandığı vurgulanmıştır[5]. Sülfür, selenyum, kurşun, bakır, alüminyum, kalsiyum ve fosfor gibi elementler eriyik halindeyken ayarlanarak alaşımın işlenebilirlik karakteri olumlu yönde değiştirilir. Bu elementler iş parçası ve takım arasındaki sürtünme kuvvetini azaltır kırılğan talaş oluşturur, yığıntı talaş oluşumunu engeller, plastik akışı bozamaz ve takım-talaş ara yüzeyinde yağlayıcı görevi görür ve talaşın takım üzerinden daha yumuşak kayarak kesilen bölgeden uygun bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar. [6,7] Metalürjik yapılarına göre değişik şekillerde isimlendirilen paslanmaz çeliklerden 316 kalite, 304'ten sonra en bilinen paslanmaz çeliktir, en büyük farklılığı molibden(Mo) ihtiva etmektedir. Molibden(Mo) 316'ya korozif ortamlarda, 304'ten daha iyi dayanmasını sağlar, özellikle yüzey ve içyapısında çatlak ve çukur oluşumlarına karşı başarılıdır. Şekillenme ve kaynak kabiliyeti yüksektir. Endüstri, mimari, ulaşım gibi sektörlerde değişik amaçlarla kullanılır. İnce kesitlerde kaynak sonrası tavlama gerektirmez 316L, 316'nın düşük karbonlusudur. Diğer çeliklere oranla yüksek korozyon direnci, iyi kaynak kabiliyeti ve hijyen oluşuyla kullanım alanları giderek artmaktadır.

Yapılan literatür araştırmasında yoğun kullanımından dolayı paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğiyle ilgili çok sayıda araştırma ve deneyler yapıldığı görülmüştür. Ok ve arkadaşları yaptıkları çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerin frezelenmesi esnasında çok tabakalı karbür uçların işleme performansları üzerine yaptıkları deneysel çalışmada, takım performansı ve yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme kuvvetleri, ilerleme, radyal ve aksel kesme derinliği gibi parametrelerin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmanın sonunda yüzey pürüzlülüğüne en büyük etkinin ilerlemeden kaynaklandığını belirtmişlerdir[8]. Lui ve ark. tarafından, işlenmesi zor bir malzeme olan östenitik paslanmaz çeliği kuru kesme şartlarında tornalama işlemine tabi tutarak kesme kuralları oluşturmak ve optimum işleme parametrelerini belirlemek ve yüzey pürüzlülüğünde iyileştirme sağlamak için kesme parametrelerinin optimizasyonu yapılmıştır. Yapılan çoklu regresyon ve varyans analizi sonucunda yüzey pürüzlülüğünde % 23 civarında iyileşme belirlenmiştir[9].

Çiftçi yaptığı çalışmada[5] AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çeliğinin CVD çok katmanlı sert metal takımlarla kuru tornalama deneyine tabi tutarak kesme hızı, kesici takım kaplaması ve iş parçası malzemesinin işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre artan kesme hızının yüzey pürüzlülüğünü belli bir minimum değere kadar azalttığı gözlemlenmiştir.

Paslanmaz çeliklerin işlenmesi sırasında yüksek kesme kuvvetine meydana geldiği, bunun neticesinde aşırı takım aşınmasının olduğu görülmektedir. Üretimde en önemli maliyet faktörlerinden birini enerji sarfiyatı oluşturmaktadır. Talaş kaldırma sırasında harcanan güç enerji sarfiyatını belirleyen unsurdur. Talaş kaldırma sırasında ihtiyaç duyulan asıl kesme kuvveti, talaş kaldırmak için harcanan gücü dolayısıyla enerji maliyetini belirleyen en önemli parametredir. Dolayısıyla giriş parametrelerine bağlı olarak doğru kesme kuvvetlerinin tayini, işleme maliyet ve performansı açısından büyük önem taşır[10].

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Deneylerde, kesme kuvvetlerinin ve takım aşınma değerlerinin daha iyi incelenebilmesi için iş parçası olarak, 50*50*300 kare kesitli 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. İş parçasının 3000 mm boyundaki tek bir malzemeden kesilerek fiziksel ve kimyasal özelliklerin farklı olması önlenmiştir.

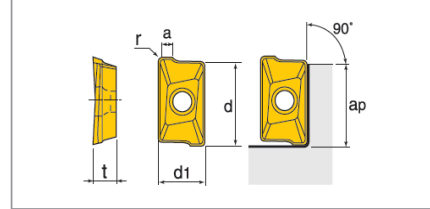
İş parçasının çalışma esnasındaki rijitliğini sağlamak için özel bir bağlama aparatı tasarlanmıştır (Şekil 1). İş parçası bağlama aparatına beş adet saplama ile monte edilerek sabitlenmiştir.



Şekil 1. İş parçası ve bağlama aparatı

Uygun işleme koşullarını sağlamak için 16 mm çapında takım seçilmiştir. Çalışma esnasındaki tırlamaların etkisini en aza indirmek için takım boyu mümkün olduğunca kısa tutulmuştur. Takımdaki ağız sayısının artması takım aşınmasını artırırken yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olduğu Dilipak tarafından [11] yapılan çalışmada belirtilmiştir. Tek ağızlı bir takım ile pürüzlülük ve takım aşınmasında stabiliteyi sağlamak zor olacağı için iki takma uçlu PVD kaplamalı freze takımı tercih edilmiştir. Üretici koduna göre takım; APKT 09P3 PER - EM TT8080 PVD dir. (Şekil 2)

Kesici Uçlar



APKT 09

Ürün Kodu	Boyut(mm)							Kalite			
	d	d ₁	t	a	r	a _p	TT8080	TT8080	TT7080	TT6800	
APKT 09T3 PER-EM	9.8	6.2	3.8	1.2	0.4	8.8	•	•	•	•	
APKT 09T308H-EM	9.8	6.2	3.8	1.0	0.8	8.8	•	•	•	•	
APKT 09T316R-EM	9.8	6.2	3.8	0.7	1.6	8.8	•	•	•	•	

Şekil 2. Deneylerde kullanılan kesici takım ve özellikleri

Deneylerde Frezeleme işlemi, Mazak Variaxis 500-5X, 5 eksen CNC dik işleme tezgâhında yapılmıştır. Kesme kuvveti sinyallerinin ölçülmesinde Kistler firmasına ait 9257-B modeli dinamometre kullanılmıştır. Deneylerde kesme esnasında takımın her 300 mm'lik kesme boyu bir kuvvet ölçümü olarak kaydedilmiştir. Ölçme işlemi yüzeyden kaldırılan her pasodan sonra yapılmıştır. Paso sonunda kesici uçlar sökülerek meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarı (Flank wear VB) Mitutoyo marka (Toolmaker's Microscope) takımçı mikroskobuyla ölçülmüştür. Ölçme esnasında mikroskoptaki aşınma görüntüsü yüksek çözünürlüklü bir fotoğraf makinasıyla resimlenmiştir. Kesici takım aşınma kriteri, TS ISO 8688'e bağlı kalınarak yan yüzey aşınma şeridi genişliği (VB=0,3 mm) esas alınmıştır. Ölçme işlemi yapılırken, takımı mikroskobun altında tutulabilecek bir aparat hazırlanmış ve bu sayede aşınan kenara dik bakılarak ölçme yapılmıştır. Ölçülen değer 0,3 mm seviyesine geldiğinde takım aşınmış kabul edilmiştir. Kesmede kullanılan her iki takımında ayrı ayrı ölçülerek değerleri kaydedilmiştir. Aşınma miktarı olarak iki takımın ortalaması alınmıştır.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Her paso sonunda kesilen parçaların yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Ölçüm işlemi parçanın 3x3 matris şeklinde 9 noktasından yapılarak ortalaması alınmıştır. Yapılan ölçümler Mitotuyu marka Surfrest SJ-301 Portatif Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile yapılmıştır.

Talaş kaldırma işleminin gerçekleştirilmesi için öncelikle işlenecek malzeme, kesici takım ve takım tezgâhına bağlı kesme hızı (v), ilerleme(f), talaş derinliği(a_p) ve talaş genişliği(a_e) gibi değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. İşlenecek malzemenin, istenilen amaçlar doğrultusunda en uygun şekilde işlenmesi için gerekli olan bu değişkenlere, işleme parametreleri denir. İşleme parametreleri talaş kaldırma işlemi doğrudan etkilediğinden bu parametreler için en uygun değerler seçilmelidir[12]. Bu çalışmada, aşağıda verilen işleme parametrelerinin sınırları, takımçı firmadan alınan görüşler doğrultusunda kataloglardan ve tecrübelerin ışığında aşağıdaki şartlarda seçilmiştir.

$$\text{Kesme hızı; } V_{min} \leq V \leq V_{max} \rightarrow 100 \leq V \leq 200 \text{ m/dk}$$

$$\text{İlerleme; } f_{min} \leq f \leq f_{max} \rightarrow 0,08 \leq f \leq 0,16 \text{ mm/diş}$$

$$\text{eksenel kesme derinliği; } a_{p_{min}} \leq a_p \leq a_{p_{max}} \rightarrow 0,5 \leq a_p \leq 1,5 \text{ mm}$$

$$\text{Radyal Kesme genişliği; } a_{e_{min}} \leq a_e \leq a_{e_{max}} \rightarrow 7 \leq a_e \leq 10 \text{ mm}$$

Her bir değişken için $x = (-2, -1, 0, +1, +2)$ olmak üzere beş seviye aralığı belirlenmiş ve parametrelerin max. değerleri (+1) seviyesine, min. değeri (-1) seviyesine karşılık gelecek şekilde (1)formülüyle, diğer seviyelerde bulunarak işleme aralıkları belirlenmiş olur(Tablo 1).

$$x_i = 2 \left(\frac{\ln x - \ln x_{min}}{\ln x_{max} - \ln x_{min}} \right) - 1 \quad (1)$$

Tablo 1. Değişkenler ve seviyeleri

x	2	1	0	-1	-2
v (m/dk)	283	200	141	100	71
f (mm/diş)	0,226	0,16	0,113	0,08	0,028
A_e (mm)	11,95	10	8,37	7	2,92
a_p (mm)	2,59	1,5	0,866	0,5	0,144

Belirlenen seviyelere göre yapılan deneyler ile 6 tekrardan meydana gelmektedir. Tablo 2’de görüldüğü gibi deney planı aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

Tablo 2. Deney tasarımı

Deney No	v (m/dk)	f (mm/diş)	a _p (mm)	a _e (mm)
1	100	0,08	0,5	10
2	200	0,08	0,5	10
3	100	0,16	0,5	10
4	200	0,16	0,5	10
5	100	0,08	1,5	10
6	200	0,08	1,5	10
7	100	0,16	1,5	10
8	200	0,16	1,5	10
9	100	0,08	0,5	6,667
10	200	0,08	0,5	6,667
11	100	0,16	0,5	6,667
12	200	0,16	0,5	6,667
13	100	0,08	1,5	6,667
14	200	0,08	1,5	6,667
15	100	0,16	1,5	6,667
16	200	0,16	1,5	6,667
17	71	0,113	0,866	8,37
18	283	0,113	0,866	8,37
19	141	0,028	0,866	8,37
20	141	0,226	0,866	8,37
21	141	0,113	0,144	8,37
22	141	0,113	2,59	8,37
23	141	0,113	0,866	2,92
24	141	0,113	0,866	11,95
25	141	0,113	0,866	8,37

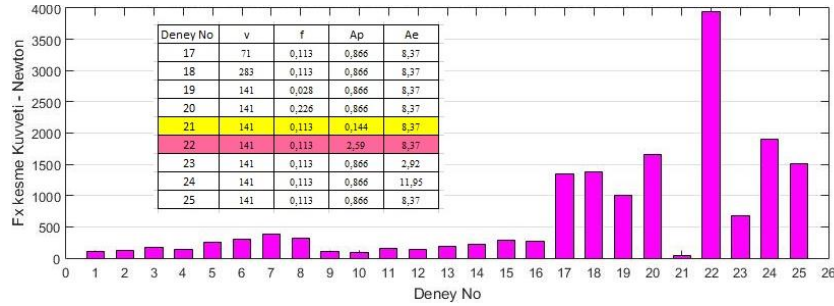
Not: 25. Deney 6 kez tekrarlanmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Kesme işlemi esnasında kesici takımında oluşan kesme kuvvetleri, kesme işleminin ekonomikliğini ve gerekli güç ihtiyacının belirlenmesi açısından en önemli parametredir. Kesme kuvvetleri ile kesici takım arasındaki etkileşimler, kesici takım aşınması veya kırılması açısından büyük önem arz etmektedir[13].

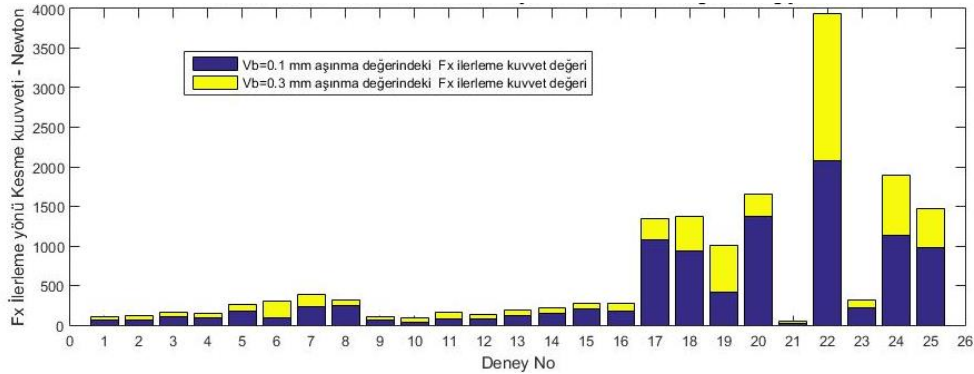
Yapılan deneylerde kesme kuvvetleri, aynı işleme koşullarında takım aşınması sürecinde kuvvetlerin değişimi ve deney tasarımına göre yapılan deneylerdeki kuvvetlerin $V_b=0,2$ mm aşınma oranındaki kuvvetlerin değişimi olmak üzere iki yönden incelenmiştir.

Şekil 3’de takımların $V_b=0.3$ mm ile tam aşınmış durumdaki kesme kuvvet değerleri görülmektedir. Grafîğe göre en büyük kuvvet 22 no’lu deneye karşılık en küçük kuvvet 21 no’lu deneyde meydana gelmiştir. Grafîkteki tablodan görüldüğü gibi iki deney arasındaki kesme şartlarına göre kuvvete etki eden en önemli faktörün kesme derinliği olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3. $V_b=0.3$ mm aşınma değerindeki Fx- ilerleme yönü kesme kuvvet değerleri

Takım aşınırken kesme kuvvetleri de değişir ve bu değişim takım aşınmasının bir göstergesi olarak kullanılır[14]. Farklı kesme parametreleriyle yapılan deneylerde kesme başlangıcında takıma etkiyen kuvvet ile kesme bitiminde takıma etkiyen kuvvetlerin değişim grafîği şekil 4’de, bu kuvvetlere ait yüzdelik değişim ise tablo 3’te görülmektedir.



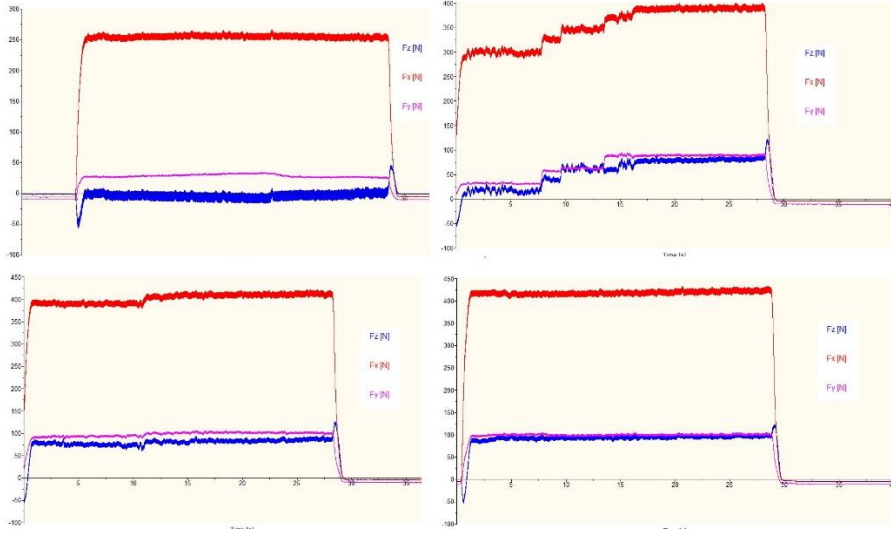
Şekil 4. Serbest Yüzey Aşınma miktarı 0,1~0,3 mm arasındaki Fx ilerleme yönü kuvvetleri

Grafîğe göre ortalama kuvvet değişiminin %55 civarındır. % 100’ün üzerinde değişim gösteren 6, 10, 19 ve 21 nolu deneylerde ise takımlardaki uç kırılmalarının kuvvet artışının aşırı artmasına sebep olduğu belirlenmiştir.

Tablo 3. Fx ilerleme kuvvetlerinin yüzdelik değişim oranı

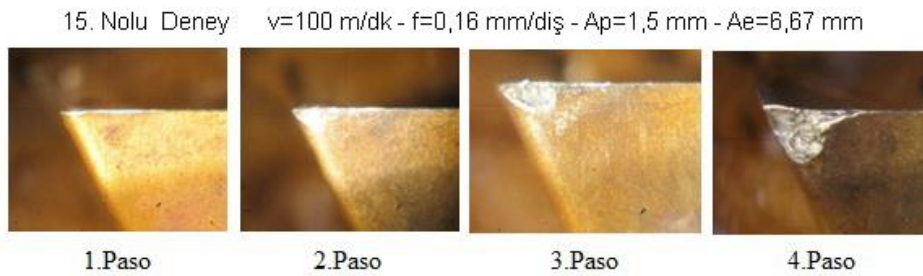
Deney No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
% Değişim	44	93	63	46	46	211	72	29	83	171	87	67	56
Deney No	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
% Değişim	55	40	63	26	46	140	20	197	90	40	67	50	

Dinamometreden alınan F_x , F_y ve F_z kuvvetlerinin takım ömrü boyunca değişimini gösteren grafik şekil 5'te verilmiştir. Grafiklere göre takımın aşınma başlangıcındaki F_x ilerleme kesme kuvveti değeri 250 N iken takım ömrünün 0,3 mm ile tam aşınmanın olduğu yerdeki değeri 425 N civarındadır. Yine grafikten F_y yanıl kesme kuvveti ile F_z eksenel kuvvetlerinde de benzer kuvvet değişimleri olduğu görülmektedir.



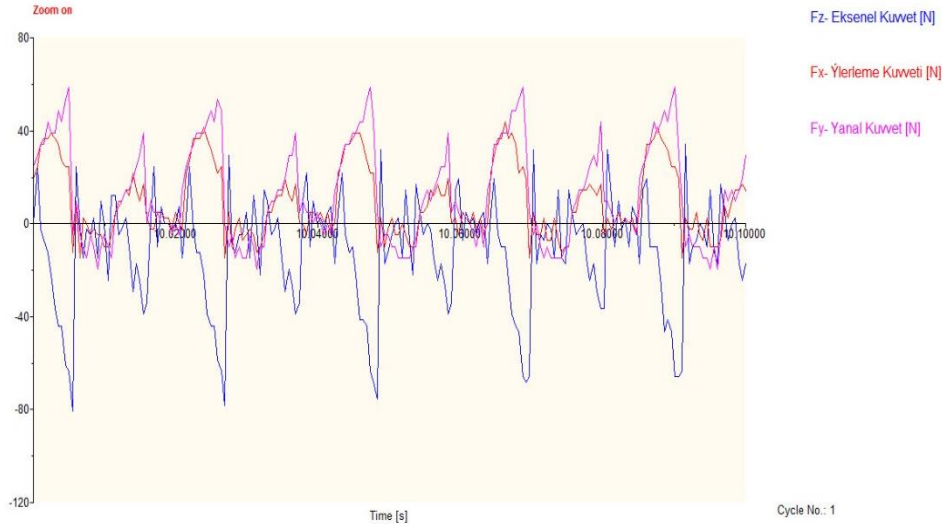
Şekil 5. Örnek 15 nolu deney için F_x , F_y , ve F_z kuvvetlerinin ilk ve son pasodaki değişimi

Deneylerde kesme esnasında kesici takımların aşınma miktarı ölçümü esnasında resimleri çekilerek uçlarda meydana gelen aşınma türleri de incelenmiştir. Uçlarda oluşan aşınma türleri genellikle ince talaş kalınlığı ve düşük ilerleme hızları için normal yanıl yüzey aşınması görülürken, deney şartları içerisinde yüksek ilerleme veya büyük kesme derinliklerinde genellikle uç kırılması ve literatüre uygun olarak görülen çentik aşınması görülür. Çentik aşınması talaş derinliği çizgisindeki kesici ucun hem eğimli yüzünde hem de serbest yüzeyinde aşırı derecede bölgesel hasarla belirlenen uç aşınmasıdır. Yüksek kesme hızlarında ortaya çıkan aşırı ısının kesici takım malzemesinde deformasyonlara yol açmasına bağlanabilir[15]. Yapışma (talaşların basınç ile kaynaması) ve bir deformasyon sertleşmesine maruz kalmış yüzey neden olur. Takım ucu kırıldığı zaman frezelemede tüm kuvvetlerde belirgin bir değişim görülür. Kuvvetlerdeki değişimini büyüklüğü kesme kenarı boyunca takımdaki kırılmanın uzunluğu ile orantılıdır. Şekil 6'da, 15. Deney sonuçlarına ait örnek 2 no'lu ucun aşınmasının 1. Pasodan 4. Pasoya kadar olan değişimi görülmektedir.

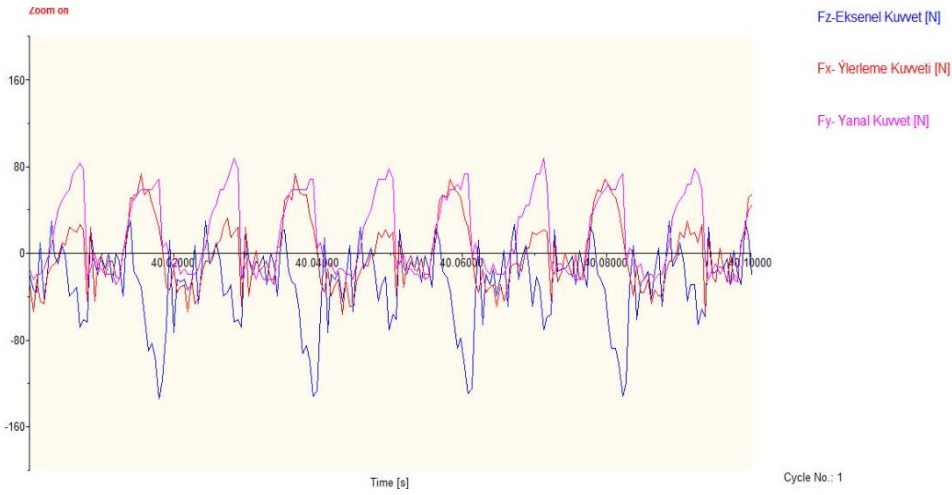


Şekil 6. 15 nolu deney 1-4. Pasolar 1. Takım ucu aşınma resimleri

Kesme başlangıcında takım aşınması çok az olduğu için takıma gelen kuvvetlerde düşük seviyelerdedir. Her iki takımda ki aşınma benzer düzeylerde olduğu için oluşan kuvvetlerde de benzerlik göstermektedir(Şekil 7). Ancak kesmenin ileri aşamalarında takımların birinde meydana gelen farklı aşınma veya uç kırılması aynı şekilde kuvvetlerin oluşumuna da yansımaktadır(Şekil 8).

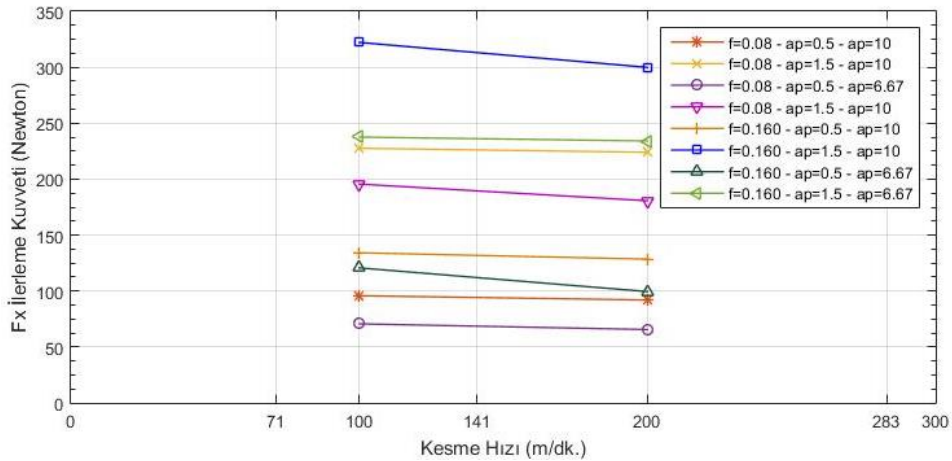


Şekil 7. Aşınmamış takımın kesme başlangıcındaki Fx, Fy ve Fz kuvvetleri



Şekil 8. Aşınmış takımın kesme başlangıcındaki Fx, Fy ve Fz kuvvetleri

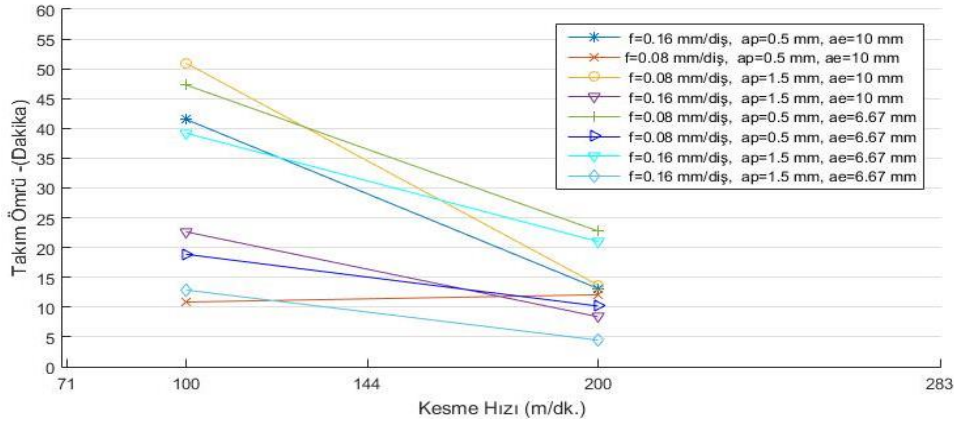
Şekil 9'da serbest yüzey aşınmasının $V_b=0,2$ sabit olduğu, Kesme kuvvetinin 100-200 m/dk aralığındaki ölçülen Fx ilerleme kuvvetinin grafiği verilmiştir. Grafiğe göre kesme kuvvetinin artışıyla kuvvetlerin genellikle değişmediği fakat değişimin çok azda olsa düşme eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu durum literatürde kesme hızının kesme kuvvetine etkisinin olmadığı şeklinde literatürle paralellik göstermektedir.



Şekil 9. $V_b=0,2$ mm Sabit Aşınmada İlerleme Kuvveti – Kesme Hızı Değişim Grafiği

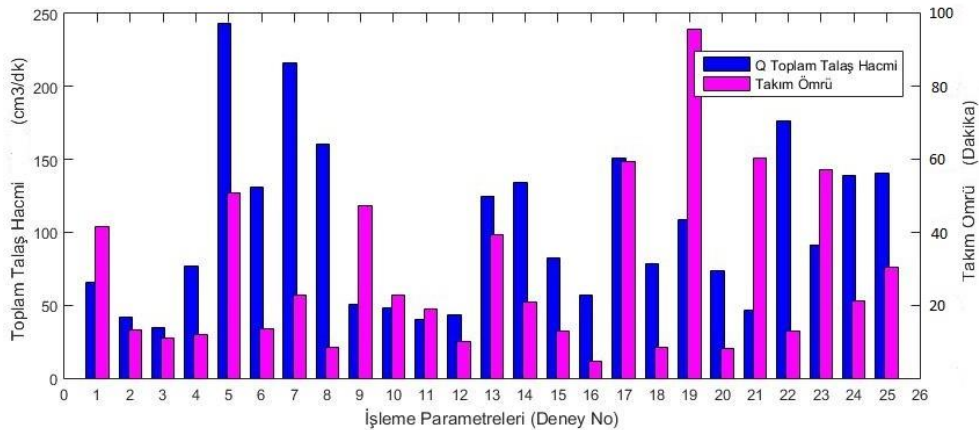
6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Şekil 8'deki grafikte, takım ömrünün kesme hızına göre değişimi görülmektedir. Yapılan deneylerde kesme hızının 100 m/dk dan 200 m/dk ya çıkışı ile takım ömründe büyük oranda azalmalar olduğu görülmektedir. Bu durum literatürle paralellik göstermektedir.



Şekil 9. Kesme hızı- Takım ömrü değişimi

İmalatta ekonomik işleme şartlarını sağlamak için minimum üretim maliyeti, minimum üretim zamanı (veya her iki yöntemin bileşimi), maksimum talaş hacmi, maksimum fayda oranı gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır[16]. Her iki kriter için takım ömrü ve talaş hacmi belirleyici parametrelerdir. Yapılan deneyler sonucunda en yüksek oranlar; Kesme hızı 100 m/dk, ilerleme 0.08 mm/dis, Kesme derinliği 1.5 mm ve kesme genişliği 10 mm işleme şartlarında ve talaş hacmi 243 cm³ ile 5 nolu deneyden, takım ömrü olarak ise; Kesme hızı 141 m/dk, ilerleme 0.028 mm/dis, Kesme derinliği 0.866 mm ve kesme genişliği 8.37 mm işleme şartlarında ve 95.55 dk. takım ömrü ile 19 nolu deneyden elde edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. $V_b=0,3$ mm aşınma kriterine göre Takım ömrü- Toplam Talaş Hacmi

Korelasyon, iki veya daha fazla değişken arasında bir ilişki olup olmadığını, eğer ilişki varsa bu ilişkinin miktarını ve yönünü sayısal olarak belirlememizi sağlayan istatistiksel bir tekniktir. İki değişken arasındaki ilişkinin derecesine ise korelasyon katsayısı denir. Hesaplanan korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değer alır. -1'den küçük ve +1'den büyük olamaz. Korelasyonun pozitif (+) olması durumunda değişkenler aynı yönde değişmiş demektir. Korelasyon katsayısının + olması iki değişkenin aynı yönde bir ilişkide olduğunu, negatif (-) olması ise iki değişkenin arasında ters yönde bir ilişki olduğunu gösterir. Eğer değişkenlerdeki artış veya azalış birbirine bağlı değilse korelasyon sıfır olur. Bu da değişkenler arasında ilişki yok anlamına gelir.

Yapılan çalışmada girdi ve çıktı verilerinin benzer özellikteki sonuçlarının değerlendirilebilmesi için tüm deneylerde ortak olan 5,7 dakikalık kesme süresi (takım ömrü) kriter olarak alınmıştır. Bu kritere göre kesme parametreleri ile kuvvet verileri arasındaki ilişkinin korelasyon katsayıları hesaplanarak Tablo 4'te verilmiştir. Tabloya göre F_x ve F_y kuvvetleriyle, kesme hızı arasındaki ilişkinin yok denecek kadar az olduğu görülmektedir. Buna karşın F_x kuvvetiyle en yüksek ilişki düzeyinin kesme derinliğindedir.

Tablo 4. 5,7 Dk. Takım Ömrüne Göre Elde Edilen Korelasyon Katsayıları

	Vc-Kesme Hızı	f - İlerleme	Ap - Kesme Derinliği	Ae - Kesme Genişliği	Vf - Tabla İlerlemesi	Σ Q - Talaş Hacmi
Fx	0,02	0,20	0,43	0,13	0,14	0,42
Fy	0,00	0,17	0,16	0,40	0,12	0,21

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada AISI 316L Östenitik paslanmaz çelik deney tasarımına göre belirlenen şartlarda frezelenerek işleme parametrelerinin takıma gelen kesme kuvvetleri ve takım aşınması üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Verilerin daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi için takım aşınmasının 0,1 mm, 0,2 mm ve 0,3 mm deki kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Buna göre takımın aşındığı kabul edilen 0,3 mm aşınma ölçülerinde en büyük ilerleme kuvveti 3942 Newton ile $v=141$ m/dk, $f=0,113$ mm/diş, $a_p=2.59$ mm ve $a_e= 8.37$ mm şartlarında, en düşük kesme kuvvet değeri ise 44.1 Newton ile $v=141$ m/dk, $f=0,113$ mm/diş, $a_p=0.144$ mm ve $a_e= 8.37$ mm şartlarında meydana gelmiştir. İki işleme arasındaki tek fark kesme derinliğidir. Belirlenen kesme parametrelerindeki işleme esnasında meydana gelen kuvvetlerin çok büyük oranda değişim göstermesi, kesme koşullarının seçimi açısından önem arz etmektedir. Aynı zamanda bu durumun, malzemenin işlenmesinde kullanılacak tezgâhların seçiminde göz önüne alınmasını zorunlu kılmaktadır.

Farklı kesme koşullarında aşınmaya bağlı olarak, kuvvetlerdeki değişim %20 ile % 211 arasında olmaktadır. Deneylerdeki uç kırılmaları kuvvet artışını aşırı artırdığı için yüksek değerler çıkartılarak yapılan hesaplamada ortalama kuvvet değişimlerinin % 55 civarında olduğu tespit edilmiştir.

Deneylerde, resimlerde de görüldüğü gibi, düşük hızlarda talaş yığılmasına (BUE) bağlı olarak takımlarda kırılma veya çentiklenme şeklinde oluşum meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kuvvetlerdeki artışlar incelendiğinde takım ucu kırılmaları ile kuvvetlerde gözle görülür oranlarda artma meydana gelmektedir. Bu durum ise genellikle büyük kesme derinliği veya ilerleme değeri yüksek olan işleme şartlarında karşımıza çıkmaktadır. Kesme kuvvetleri ile kesme parametreleri arasında ilişki, basit korelasyon katsayısı hesabı ile bulunmuştur. Belirlenen katsayılar göre eksenel kesme derinliği en yüksek etkiye, kesme hızı ise en düşük etkiye sahiptir.

Aynı kesme şartlarında hız değişimlerinin kuvvet üzerinde çok az etkisi olduğu hızın artışı ile küçük oranlarda kuvvetin azaldığı gözlemlenmiştir.

Deney sonuçlarına göre AISI 316L Östenitik paslanmaz çeliğin ekonomik işlenmesi, maksimum talaş hacmi veya minimum maliyet olarak iki farklı kriterde yapılabilir. Deneylerde takım ömrü boyunca en fazla talaş hacmi 243 cm^3 , en az talaş hacmi ise 34.3 cm^3 olarak elde edilmiştir. Takım ömrünün en büyük ve en küçük değerleri ise 95.55 dakika ile 5.46 dakika olarak gerçekleşmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Outokumpu, 2013, "Handbook of stainless steel", www.outokumpu.com, 2015
- [2] Günay M., 2013, "AISI 316L Çeliğin İşlenmesinde Takım Radyüsü ve Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu", Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 28, No 3, 437-444, 2013
- [3] Yeyen H., E., Korkut İ., Turgut Y., Çiftci İ., 2009, "AISI 303 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenmesinde Kesme Hızı ve İlerlemenin Kesme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkileri" 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye
- [4] Kara, F., K. Aslantas, and A. Çiçek. 2015., "ANN and multiple regression method-based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel." *Neural Computing and Applications* 26.1 237-250.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [5] Ciftci, I., 2006. "Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools". *Tribology International*, 39(6), 565-569.
- [6] Stainless steel for machining- specialty steel endustry of North America, http://www.ssina.com/download_a_file/machining.pdf - 2015
- [7] Özer A., Bahçeci E., 2009. "AISI 410 Martensitik Paslanmaz Çeliklerin Kesici Takım ve Kaplamasına Bağlı İşlenebilirliği", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 24, No 4*, 693-698.
- [8] Ok M., 2009. "AISI 304 Paslanmaz Çeliklerin Frezelenmesinde İşlenebilirliğin İncelenmesi ve Tahmin Modellerinin Oluşturulması", *Selçuk Üniv. Fen Bil. Ens.*
- [9] Li, Deng Wan, et al. 2010. "Study on turning parameter optimization of austenitic stainless steel." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 34.
- [10] Kıvak T., Çetin Ş., 2014., "15-5 PH Paslanmaz Çeliğin Tornalanmasında Kesme Kuvvetinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu" *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu* s. 437-447, Bursa.
- [11] Dilipak H., 2010. AISI D3 Çeliğinin Frezelenmesinde, Kesici Uç Sayısı, Kesme Hızı ve İlerleme Miktarının Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Journal of Polytechnic*, 13, 1, 4.
- [12] Zeyreli M., 2003. "Frezeleme İşlemlerinde Ekonomik İşleme Şartlarının Optimizasyonu", *Niğde Üniv. Müh. Bil. Der. Cilt 7 Sayı 1-2, s 1-14*,
- [13] Tekaslan Ö., Gerger N., Günay M., Şeker U., 2007 "AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Titanyum Karbür Kaplamalı Kesici Takım ile tormalama İşleminde Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi, Pamukkale Üniv. Müh. Fak. Der. C. 13 sayı 2. S. 135-144
- [14] Sağlam H., 2000, "Frezelemede Yapay Sinir Ağları Kullanarak, Çok Elemanlı Kuvvet Ölçümlerine Dayalı Takım Durumu İzleme", *Doktora tezi, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.*
- [16] Tolouei-Rad, M., I. M. Bidhendi. 1997. "On the optimization of machining parameters for milling operations." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37.1 : 1-16.
- [15] Altınkaya E., Güllü A., 2008., AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliğin İşlenmesinde Kesme Hızının ve Takım Kaplamasının Takım Aşınmasına Etkileri. *Politeknik Dergisi, Cilt:11 Sayı: 3 s.243-247.*

AISI 304 PASLANMAZ ÇELİĞİN NANO GRAFEN KATKILI BİTKİSEL ESASLI KESME SIVISI VE MQL YÖNTEMİ KULLANILARAK FREZELENMESİNDE TAKIM AŞINMASI

Alper Uysal^a, Furkan Demiren^a ve Erhan Altan^a

*a, Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul/TÜRKİYE,
auysal@yildiz.edu.tr
f.demiren@hotmail.com
ealtan@yildiz.edu.tr*

Özet

Paslanmaz çelik malzemeler işlem sırasında gösterdikleri pekleşme eğilimlerinden, düşük ısı iletkenliklerinden ve yüksek mekanik dayanımlarından dolayı talaşlı şekillendirilmesi zor malzeme grubuna girmektedirler. Bu malzemelerin çeşitli kesme sıvıları kullanılarak işlenebilmesi mümkün olmakta ancak, kesme sıvılarının çevre ve sağlık açısından zararlı olması ve bol miktarda kullanılmalarından doğan maliyet gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin frezelenmesinde ağırlıkça %1 oranında nano grafen katkılı ticari bitkisel kesme sıvısı kullanılarak MQL (Minimum Miktarla Yağlama) yöntemi uygulanmıştır. Nano grafen katkılı kesme sıvısının ve MQL debisinin takım aşınmasına etkileri incelenmiş ve deneyler saf bitkisel kesme sıvısı kullanılarak ve kuru şartlarda da tekrarlanmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Minimum serbest yüzey aşınması nano grafen katkılı kesme sıvısının kullanıldığı MQL yönteminde elde edilmiştir. Ayrıca, MQL debisinin artırılmasıyla daha az takım aşınmaları gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: MQL, nano grafen, paslanmaz çelik, takım aşınması

CUTTING TOOL WEAR IN MILLING OF AISI 304 STAINLESS STEEL BY USING NANO GRAPHENE REINFORCED VEGETABLE BASED CUTTING FLUID AND MQL METHOD

Abstract

Stainless steel materials are categorized under a group of materials that are hard to machine due to high strength, low thermal conductivity and work hardening tendency during machining. It is possible that these materials can be machined by using various cutting fluids, but cutting fluids have disadvantages such as being harmful to the environment and health and cost due to using copiously. In this study, MQL (Minimum Quantity Lubrication) method was applied by using 1%wt. of nano graphene reinforced commercial vegetable cutting fluid during milling of AISI 304 austenitic stainless steel. The effects of nano graphene reinforced cutting fluid and MQL flow rate on the cutting tool wear were investigated and the experiments were repeated even by applying pure vegetable cutting fluid and performing dry cutting. Minimum flank wear rate was obtained by MQL method using nano graphene reinforced cutting fluid. In addition, lower flank wear rates were observed when the MQL flow rate was increased.

Keywords: MQL, nano graphene, stainless steel, tool wear

1. GİRİŞ

Kimya, petrokimya, medikal, otomotiv, havacılık, gıda sanayi gibi birçok alanda kullanılan paslanmaz çelik malzemeler; yüksek mekanik dayanım, düşük ısıl iletkenlik, yüksek süneklik ve yüksek pekleşme eğilimi özelliklerinden dolayı talaşlı şekillendirilmesi zor malzeme grubuna girmektedir. Talaşlı şekillendirilmesinde güçlüklerle karşılaşılan paslanmaz çelik malzemelerin frezelenmesi konusunda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş ve gerçekleştirilmeye devam etmektedir. Selinder vd. [1] paslanmaz çelik malzemelerin frezelenmesinde kaplamalı karbür takımların performanslarını araştırmışlardır. Nordin vd. [2] ise paslanmaz çelik malzemelerin frezelenmesinde çok katmanlı kaplamaların performanslarını takım aşınması ve kopmaları inceleyerek belirlemişlerdir. Endrino vd. [3] çeşitli alüminyum esaslı kaplamalı takımlarla, paslanmaz çelik malzemelerin frezelenmesinde takım aşınmasını araştırmış ve minimum takım aşınma değeri nano kaplamalı karbür takımla elde edilmiştir. Liew [4] paslanmaz çelik malzemelerin düşük hızlarda frezelenmesinde, kaplamasız, TiAlN (Titanyum Alüminyum Nitrür) tek katman kaplamalı ve TiAlN/AlCrN (Titanyum Alüminyum Nitrür/Alüminyum Krom Nitrür) nano çok katman kaplamalı karbür takımlar kullanmışlardır. Düşük takım aşınmasının nano kaplamalı takımlarla elde edildiği belirtilmiştir. Biermann vd. [5] paslanmaz çelik malzemelerin mikro frezelenmesinde farklı kaplama malzemelerinin takım aşınması üzerine etkilerini araştırmışlardır. Kaplama malzemesi olarak, CrN (Krom Nitrür), TiN (Titanyum Nitrür), AlCrN (Alüminyum Krom Nitrür), AlTiN (Alüminyum Titanyum Nitrür) ve TiAlN (Titanyum Alüminyum Nitrür) kullanılmıştır. Takım aşınması açısından TiAlN ve AlCrN kaplamaların en iyi sonuç verdiği belirtilmiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, paslanmaz çelik malzemelerin talaşlı şekillendirilmesinde kaplamalı takımların kullanılmasının iyi sonuçlar verdiği görülmekte ancak kaplama maliyetlerinin yüksek olması dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, kesme sıvılarının kullanıldığı çalışmalar gerçekleştirilmiş ancak kesme sıvılarının özellikle de sentetik ve yarı sentetik kesme sıvılarının çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkilerinden dolayı bu malzemelerin işlenmesinde yeni gelişmelerden faydalanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. MQL (Minimum Miktarla Yağlama) yöntemi, talaşlı şekillendirme işlemlerinde karşılaşılan yüksek takım aşınması ve sıcaklık ve düşük yüzey kalitesi gibi olumsuzluklardan kaçınmak ve aynı zamanda çevreye duyarlı talaşlı şekillendirme işlemi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Çakır vd. [6] AA7075 alüminyum alaşımının MQL yöntemi kullanılarak tornalanmasında kesme hızı, ilerleme ve MQL debisinin takım aşınması ve yüzey kalitesine etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, kesme hızının ve ilerlemenin artırılmasının takım aşınmasını ve yüzey kalitesini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. MQL debisinin artırılmasının ise hem yüzey kalitesini hem de takım aşınmasını olumlu etkilediği belirlenmiştir. Çakır vd. [7] AA7075 alüminyum alaşımının MQL yöntemi kullanılarak delinmesinde ilerlemenin, kesme hızının ve soğutma yönteminin (içten MQL, dıştan MQL, geleneksel soğutma ve basınçlı hava ile soğutma) yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemiştir. Deneyler sonucunda, ilerlemenin artırılmasının yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve kesme hızının artırılmasının yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, içten MQL yönteminin kullanılması ile geleneksel soğutma yöntemine yakın sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. İlhan vd. [8] AISI 1040 çeliğinin MQL yöntemi kullanılarak tornalanmasında MQL debisinin ve kesme hızının yüzey kalitesine etkilerini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda, kesme hızının artırılmasıyla yüzey kalitesinin iyileştiği gözlemlenmiştir. MQL yönteminin kullanıldığı deneylerde ise MQL debisindeki artışın özellikle düşük kesme hızlarında yüzey kalitesini olumlu etkilediği ve yüksek kesme hızlarında MQL debisinin artırılmasının talaşın erken kırılmasına sebep olduğundan yüzey kalitesini olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Kuzu vd. [9] MQL sisteminin soğutma kapasitesini arttırmak için sisteme CO₂ (Karbondioksit) gazı beslemesi yaparak AISI 1040 çeliğin tornalanmasında sıcaklıkları, kesme kuvvetlerini, yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmalarını incelemiştir. MQL sisteminde CO₂ gazının kullanılmasının kesme kuvvetlerinde, sıcaklıklarda ve takım aşınma değerlerinde azalmaya neden olduğu belirtilirken, yüzey pürüzlülüğü değerlerinde ise MQL ve CO₂ beslemeli MQL kullanılması arasında pek fark olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca MQL yönteminde kullanılan kesme sıvılarının ısıl iletkenlik, yağlayıcılık vb. özelliklerini arttırmak amacıyla bu sıvılara çeşitli nano parçacıklar da eklenmektedir. Hwang vd. [10] akışkanların ısıl iletkenliğini ve yağlayıcılık özelliklerini iyileştirmek için MWCNT (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp), fulleren, CuO (Bakıroksit), SiO₂ (Silisyumdioksit) ve Ag (Gümüş) nano katkıları kullanmışlardır. Araştırmacılar, fullerenin yağ içerisinde MWCNT'den daha iyi dağılım gösterdiğini ancak çeşitli yüzey etken maddeler kullanılarak MWCNT'nin dağılımının homojenleştirilebileceğini belirtmişlerdir. Hazırlanan karışımların ısıl iletkenliklerinin, karışımın homojenliği ile ilgili olduğu tespit edilmiştir. Shen vd. [11] dökme demir malzemelerin farklı yağlama koşullarında (MQL, kuru,

akışkan sıvı) taşlanmasını incelemişlerdir. MQL yönteminde, Al_2O_3 (Alüminyum Oksit) ve elmas esaslı nano akışkanlar kullanılmıştır. Nano akışkanın kullanılmadığı MQL yönteminde işlem sıcaklığının kuru işleme göre düştüğü, ancak MQL yönteminde nano akışkan kullanılmasının sıcaklık azalmasında çok fazla bir fark yaratmadığı belirtilmiştir. Shen vd. [12] dökme demir malzemelerin MQL yöntemi uygulanarak taşlanmasında MoS_2 (Molibdensülfür) katkılı nano akışkan kullanılmasını incelemişlerdir. Kesme sıvısı olarak, parafin yağı, soya yağı ve CANMIST yağ kullanılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için seçilen kesme sıvıları MQL yönteminde nano MoS_2 katkılı ve katkısız olarak uygulanmış ve ayrıca su bazlı taşlama sıvısı kullanılarak ıslak taşlama işlemi ile de karşılaştırılma yapılmıştır. Araştırmacılar, nano MoS_2 katkısının taşlama işleminde önemli bir etki oluşturduğunu ve avantaj sağladığını ortaya koymuşlardır. Kwon ve Drzal [13] nano grafit parçacıklarını kesme yağlarına ekleyerek MQL yönteminde kullanmışlardır. Araştırmacılar kesme sıvısı olarak UNIST marka bitkisel kesme yağını kullanmışlardır. Park vd. [14] AISI 1045 çeliğin frezelenmesinde nano grafen katkılı kesme sıvısının MQL yöntemi uygulanarak kullanılmasının takım aşınması üzerine etkilerini incelemiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla, nano katkılı ve katkısız MQL yöntemi ve kuru işleme uygulanmıştır. Nano grafen katkılı MQL yönteminin uygulanması takım aşınması açısından en iyi sonucu vermiştir. Ayrıca küçük çaplı nano grafen katkısının bitkisel yağ içinde daha iyi dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Mao vd. [15] nano akışkan kullanılan MQL yöntemi ile AISI 52100 çeliğin taşlanmasını incelemiştir. Nano Al_2O_3 katkılı deiyonize su ve MoS_2 katkılı kanola yağı nano akışkan olarak MQL yönteminde ve sentetik emülsiyon yağı akışkan sıvı ile işleme yönteminde kullanılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek amacıyla kuru işleme de yapılmıştır. Kesme sıvısındaki nano parçacık konsantrasyonunun artırılmasının taşlama performansını artırdığı ancak nano parçacık çapının artırılmasının taşlama sıcaklığı üzerine fazla etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

Paslanmaz çelik malzemelerin talaşlı şekillendirilmesi konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu malzemelerin talaşlı şekillendirilebilme kabiliyetlerinin düşük olduğu görülmektedir. Bu malzemelerin talaşlı imalatında MQL yönteminin kullanımına yönelik çok az çalışma olmakla birlikte, MQL yönteminin yüksek sıcaklıklarda avantajını kaybettiği de bilinmektedir. Ayrıca, MQL yönteminde kullanılan kesme sıvılarına soğutma ve yağlama özelliklerini geliştirmek amacıyla çeşitli nano tozların katılmasının belirli şartlarda avantaj sağladığı belirtilmektedir.

Paslanmaz çelik malzemelerin işlenmesinde nano akışkan kullanılan MQL yöntemi uygulamasına literatürde rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, ticari bitkisel kesme sıvısına ağırlıkça %1 nano grafen katılarak hazırlanan kesme sıvısının MQL yönteminde kullanılmasıyla AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzeme frezelenmiştir. Nano grafen, karbon atomunun bal peteği örgüsü şeklindeki iki boyutlu düzlemsel halidir ve üstün mekanik özelliklere, yüksek ısıl ve elektrik iletkenliklerine, düşük gaz geçirgenliğine ve yağlayıcılık özelliklerine sahiptir. Deneysel saf bitkisel kesme sıvısı kullanılarak ve kuru şartlarda da tekrarlanmıştır. Nano grafen katkılı MQL yönteminin paslanmaz çeliğin frezelenmesinde takım aşınmasına etkileri incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Frezeleme işlemleri, First MCV-300 CNC işleme merkezi kullanılarak Tablo 1’de kimyasal bileşimi verilen 250x200x6 mm boyutlarında AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin MQL yöntemi kullanılarak işlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Frezeleme parametreleri Tablo 2’de verilmektedir. Deneysel, 32 mm çapında takım tutucuya mekanik olarak bağlanmış SPHN 120404 WC (Tungsten Karbür) kesici takımlar kullanılmıştır. Takım tutucuya dört kesen ağıza sahip iki adet insert şeklindeki kesici takım bağlanmıştır.

Tablo 1. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik kimyasal bileşimi

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	N [%]
0,023	0,49	1,51	0,027	0,003	18,1	8,1	0,054

MQL sistemi olarak, Werte DKN 25 mikro yağlama sistemi kullanılmış ve Eraoil KT/2000 bitkisel kesme sıvısı yağlayıcı olarak seçilmiştir. Sentetik ve yarı sentetik kesme sıvılarının çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkilerinden dolayı bitkisel esaslı kesme sıvılarına duyulan ilginin artmasından dolayı bu çalışmada ticari bitkisel kesme sıvısı kullanılmıştır. Ayrıca, MQL sisteminin yağ haznesine basit bir mekanik karıştırıcı konularak tüm işlem süresince kesme sıvısının sürekli karışması sağlanmıştır. Nano grafen katkılı bitkisel kesme sıvısını

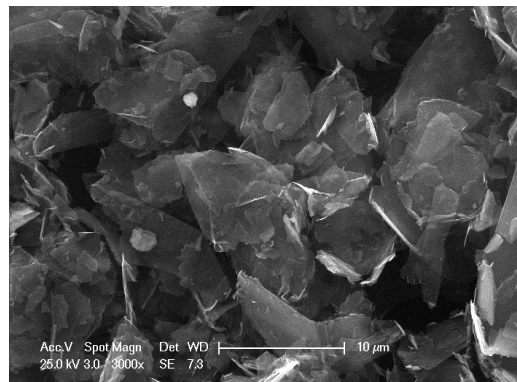
6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

hazırlamak için Şekil 1’de görülen nano grafen parçacıklar 2 saat süre ile 120°C sıcaklıkta neminin alınması amacıyla Termal marka G11420SD model Etüv’de kurutulmuştur. Kullanılan nano grafen parçacıklar, GRAFEN®-NG5 marka ve model olup %99 saflık ve yaklaşık 0,05 g/cm³ yoğunluğa sahiptir (Şekil 1). Nano grafen parçacıkların çapı 5-10 µm, kalınlığı 5-8 nm ve özgül yüzey alanı 120-150 m²/g aralıklarında değişmekte ve ısı iletkenlik katsayısı yaklaşık 5000 W/mK’dir. Kurutulan nano parçacıkların oda sıcaklığına kadar soğuma işlemi fırında bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Kurutulan nano grafen parçacıklar, yapılan çalışmalar incelenerek ve gerçekleştirilen ön deneylerden elde edilen bilgiler ışığında belirlenen ağırlıkça %1 oranında ticari bitkisel kesme sıvısına katılmıştır. Karışımın homojenliğini arttırmak için kesme sıvısı-nano grafen parçacık karışımına ağırlıkça %0,1 oranında Sodyum Dodesil Sülfat eklenmiştir. Karışım, Daihan marka WiseTis HG-15D model dijital homojenizatör kullanılarak 500 dev/dak devirde 2 saat karıştırılarak elde edilmiştir. Malzemelerin oranları, Radweg marka PS 510.R1 model hassas terazi kullanılarak ayarlanmıştır.

Tablo 2. Frezeleme parametreleri

Frezeleme şartları	kuru, MQL ve %1 nano grafen katkılı MQL
MQL debisi	20ml/saat ve 40 ml/saat
MQL basıncı	5 bar
Nozül açısı	10° (iş parçası yüzeyine paralel doğrultu ile)
Nozül mesafesi	50 mm
Nozül uç çapı	1 mm
Kesici takım	kaplamasız WC
Kesme hızı	100 m/dak
İlerleme	0,18 mm/dev
Kesme derinliği	0,5 mm

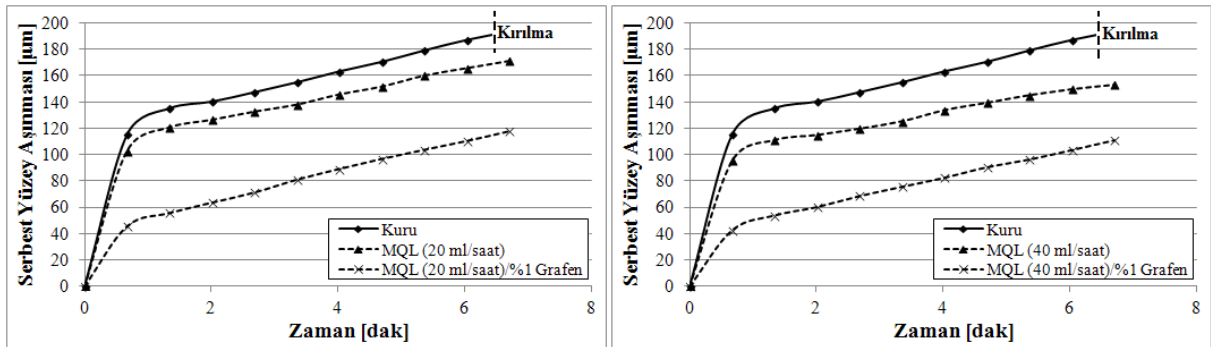
Kesici takım serbest yüzey aşınmaları, SOIF XJP-6A trinoküler mikroskop kullanılarak görüntülendi ve aşınma ölçümleri MShot yazılımı kullanılarak gerçekleştirildi. Deneyler bir kez yapıldı ve oluşan serbest yüzey aşınma alanı boyunca çeşitli bölgelerden beşer ölçüm yapılarak aritmetik ortalaması alındı ve serbest yüzey aşınma değeri belirlendi. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) incelemeleri ise FEI Philips XL30 ESEM-FEG cihazı kullanılarak yapıldı.



Şekil 1. Nano grafen SEM görüntüsü

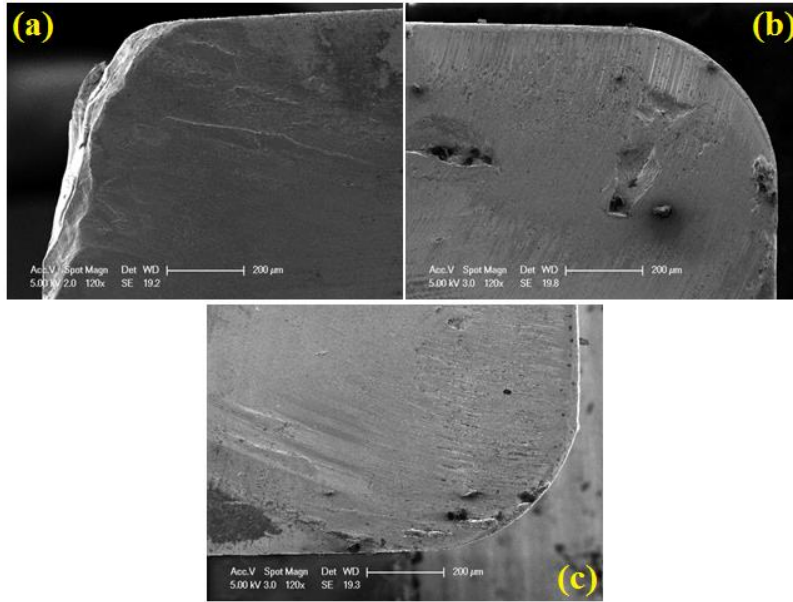
4. DENEYSEL SONUÇLAR

AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin frezelenmesinde, kesici takım serbest yüzey aşınmalarının değişimi Şekil 2’de verilmektedir. Maksimum aşınmanın kuru şartlarda olduğu ve MQL yönteminin kullanılmasıyla aşınma değerlerinde azalma gözlemlendiği Şekil 2(a) ve Şekil 2(b)’de görülmektedir. Ayrıca, kuru işleme sırasında 6,7 dak. geçtikten sonra yapılan gözlemlerde kesici takım ucunda kırılma gözlemlenmiştir. Saf ve %1 nano grafen katkıli bitkisel kesme sıvılarının kullanıldığı MQL yöntemi ile frezeleme işlemlerinde ise ortama gönderilen kesme sıvısı-basınçlı hava karışımının yağlama, soğutma ve talaşı uzaklaştırma etkilerinden dolayı kırılma ile karşılaşmamaktadır. Bu durum, Şekil 3’de verilen 40 ml/saat MQL debisinde 6,7 dak. frezeleme işleminden sonra elde edilen talaş yüzeyi SEM görüntülerinden de görülmektedir. Kesici takım ucundan parça kopması ile sadece Şekil 3(a)’da verilen kuru frezeleme işleminde karşılaşılmaktadır. MQL frezeleme işleminde nano grafen katkıli bitkisel kesme sıvısının kullanılması ile takım aşınması, saf bitkisel kesme sıvısına göre 20 ml/saat ve 40 ml/saat MQL akış hızlarında sırasıyla %31,15 ve %27,32 azalma göstermiştir. Takım aşınmasında sağlanan bu yüksek azalmaların sebebi, nano grafen parçacıkların yüksek ısı iletkenlikleri ve yağlayıcılık özellikleridir. Ayrıca, nano grafen parçacıkların, karıştırma sırasında bitkisel kesme sıvısı içerisinde homojen bir şekilde dağılması ve kullanım sırasında çökme oluşmaması da takım aşınmasının azalmasında etkin faktörlerdendir.

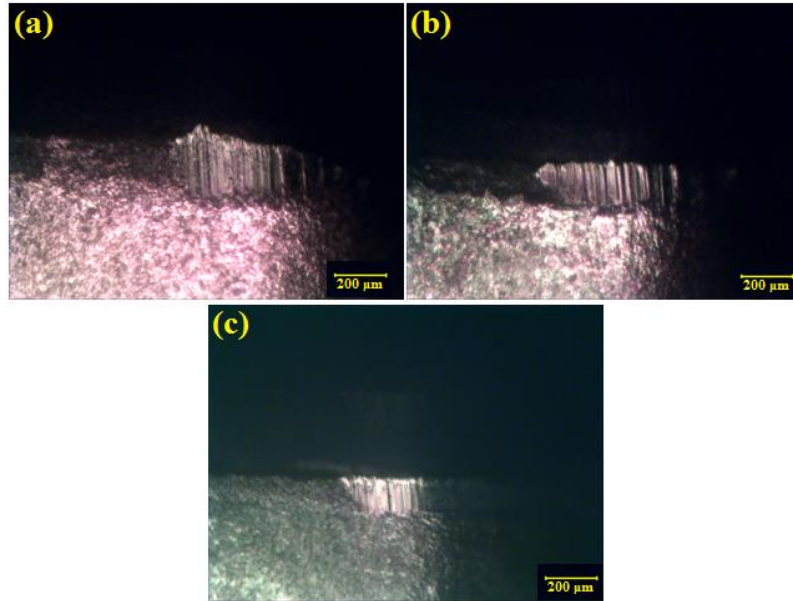


Şekil 2. Serbest yüzey aşınması, a) 20 ml/saat MQL debisi ve b) 40 ml/saat MQL debisi

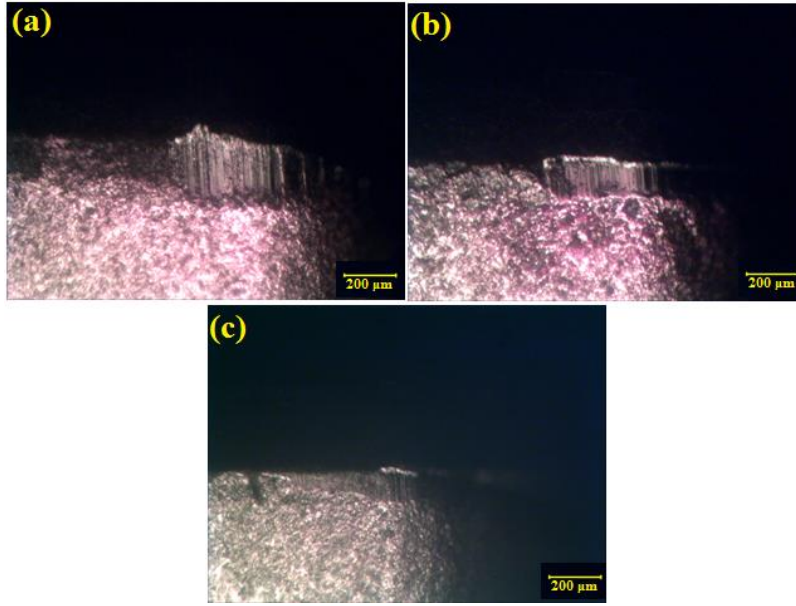
Şekil 4 ve Şekil 5’de, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 20 ml/saat ve 40 ml/saat MQL akış hızlarında 5,4 dak. frezelenmesinden sonra gözlemlenen serbest yüzey aşınma görüntüleri verilmektedir. Buradan da görüldüğü gibi, MQL yönteminin kullanılması takım aşınmasında azalmaya neden olmakta fakat nano grafen katkısının yağlayıcılık ve soğutma etkilerinden dolayı hem kuru işlemeye hem de saf kesme sıvısının kullanıldığı MQL yöntemine göre daha düşük takım aşınması oluşmasına neden olmaktadır. MQL debisinin takım aşınması üzerine etkileri incelenecek olursa, ortama gönderilen kesme sıvısı-basınçlı hava karışım miktarının daha fazla olmasından dolayı MQL debisi arttıkça takım aşınması azalmıştır (Şekil 2). Bu azalma, MQL debisi 20 ml/saat’den 40 ml/saat’e artırıldığında, 6,7 dak. frezeleme için saf bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı durumda %10,67 olurken %1 nano grafen katkıli bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı durumda %5,7 olmaktadır. Ayrıca, Şekil 3’de verilen talaş yüzeyi SEM görüntüleri incelendiğinde, saf bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı durumda (Şekil 3(b)) talaş yüzeyinde, östenitik paslanmaz çeliğin sıcaklık artışı ile sünek özellik göstermesinden dolayı oluşan talaşın kesici takıma yapışma eğilimi ve işlem sırasında talaş yüzeyinden kopması sonucu krater aşınması görülmektedir. Ancak, nano grafen katkısının soğutma ve yağlayıcılık etkilerinden dolayı krater aşınması ile karşılaşmamıştır (Şekil 3(c)).



Şekil 3. MQL debisi 40 ml/saat için talaş yüzeyi SEM görüntüleri (6,7 dak. frezeleme işleminden sonra), a) kuru, b) saf bitkisel kesme sıvısı ile MQL ve c) %1 nano grafen katkılı bitkisel kesme sıvısı ile MQL



Şekil 4. MQL debisi 20 ml/saat için serbest yüzey aşınma görüntüleri (5,4 dak. frezeleme işleminden sonra), a) kuru, b) saf bitkisel kesme sıvısı ile MQL ve c) %1 nano grafen katkılı bitkisel kesme sıvısı ile MQL



Şekil 5. MQL debisi 40 ml/saat için serbest yüzey aşınma görüntüleri (5,4 dak. frezeleme işleminden sonra), a) kuru, b) saf bitkisel kesme sıvısı ile MQL ve c) %1 nano grafen katkılı bitkisel kesme sıvısı ile MQL

5. SONUÇLAR

Paslanmaz çelik malzemeler, düşük ısıl iletkenlikleri ve yüksek dayanım, süneklik ve pekleşme eğilimlerinden dolayı talaşlı şekillendirilmesi zor malzeme grubuna girmektedirler. Ancak, bu malzemelerin talaşlı şekillendirilmesine duyulan ihtiyaçtan dolayı bu konu üzerine çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin frezelenmesinde oluşan takım aşınması üzerine MQL yöntemi kullanılmasının etkileri incelenmiştir. Kesme sıvısı olarak, ticari bitkisel kesme sıvısı ve ağırlıkça %1 oranında nano grafen katkılı bitkisel kesme sıvısı kullanılmıştır. Ayrıca, MQL debisinin takım aşınması üzerine etkileri de belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Maksimum serbest yüzey aşınması kuru frezeleme işleminde gözlemlenirken MQL yönteminin kullanılması ile ortama gönderilen kesme sıvısı-basınçlı hava karışımının olumlu etkilerinden dolayı serbest yüzey aşınmasında azalma görülmüştür.
- Kuru frezeleme işleminde, 6,7 dak. sonra yapılan ölçümlerde kesici takım ucunda kopma gözlemlenirken MQL yöntemi kullanıldığında kopma ile karşılaşmamıştır.
- Minimum serbest yüzey aşınması nano grafenin yüksek ısıl iletkenliği ve yağlayıcılık özelliklerinden dolayı nano grafen katkılı bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MQL yönteminde görülmüştür.
- MQL debisinin artırılmasıyla, ortama gönderilen kesme sıvısı-basınçlı hava karışım miktarının daha fazla olması nedeniyle serbest yüzey aşınma değerlerinde azalma sağlanmıştır.
- Talaş yüzeyleri incelendiğinde, kuru frezeleme de kopma ve saf bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MQL yönteminde ise krater aşınması gözlemlenmiştir. Ancak, nano grafen katkılı bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MQL yönteminde talaş yüzeyinde krater aşınması ile karşılaşmamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 114M098 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Selinder, T.I., Sjöstrand, M.E., Nordin, M., Larsson, M., Östlund, Å., Hongmark, S. 1998. "Performance of PVD TiN/TaN and TiN/NbN Supperlattice Coated Cemented Carbide Tools in Stainless Steel Machining", Surface and Coatings Technology, cilt 105, s. 51-55
- [2] Nordin, M., Sundström, R., Selinder, T.I., Hogmark, S. 2000. "Wear and Failure Mechanisms of Multilayered PVD TiN/TaN Coated Tools when Milling Austenitic Stainless Steel", Surface and Coatings Technology, cilt 133-134, s. 240-246
- [3] Endrino, J.L., Rabinovich, G.S.F., Gey, C. 2006. "Hard AlTiN, AlCrN PVD Coatings for Machining of Austenitic Stainless Steel", Surface and Coatings Technology, cilt 200, s. 6840-6845
- [4] Liew, W.Y.H. 2010. "Low-Speed Milling of Stainless Steel with TiAlN Single-Layer and TiAlN/AlCrN Nano-Multilayer Coated Carbide Tools under Different Lubrication Conditions", Wear, cilt 269, s. 617-631
- [5] Biermann, D., Steiner, M., Krebs, E. 2013. "Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel", Procedia CIRP, cilt 7, s. 246-251
- [6] Çakır, A., Yağmur, S., Şeker, U. 2013. "Farklı Şartlarda Uygulanan Minimum Miktarda Soğutma Yönteminin AA7075 Alüminyum Alaşımının Tornalanması Sürecine Olan Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi", 4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Kuşadası
- [7] Çakır, A., Yıldırım, F., Şeker, U. 2014. "AA7075 Alüminyum Alaşımının Delinmesinde Farklı Soğutma Şartları ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi", 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Bursa
- [8] İlhan, M., Çavuşoğlu, O., Duran, A., Şeker, U. 2013. "Talaş Kaldırma İşlemlerinde Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Uygulamasının Kesme Hızı ve Yağlama Debisine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkisinin Araştırılması", 4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Kuşadası
- [9] Kuzu, A.T., Tülü, T., Baysal, G., Çelik, C., Bakkal, M. 2013. "CO₂ – MQL Sisteminin İşlenebilirliğe Etkisi", 4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Kuşadası
- [10] Hwang, Y., Park, H.S., Lee, J.K., Jung, W.H. 2006. "Thermal Conductivity and Lubrication Characteristics of Nanofluids", Current Applied Physics, cilt 6S1, s. e67-e71
- [11] Shen, B., Shih, A.J., Tung, S.C. 2008. "Application of Nanofluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding", Tribology Transactions, cilt 51, s. 730-737
- [12] Shen, B., Malshe, A.P., Kalita, P., Shih, A.J. 2008. "Performance of Novel MoS₂ Nanoparticles Based Grinding Fluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding", Transactions of NAMRI/SME, cilt 36, s. 357-364.
- [13] Kwon, P., Drzal, L.T. 2010. "Nanoparticle Graphite-Based Minimum Quantity Lubrication Method and Composition", Patent Numarası: US 2010/0204072 A1
- [14] Park, K.H., Ewald, B., Kwon, P.Y. 2011. "Effect of Nano-Enhanced Lubricant in Minimum Quantity Lubrication Balling Milling", Journal of Tribology, cilt 133, s. 031803-1-8
- [15] Mao, C., Zhang, J., Huang, Y., Zou, H., Huang, X., Zhou, Z. 2013. "Investigation on the Effect of Nanofluid Parameters on MQL Grinding", Materials and Manufacturing Processes, cilt 28, s. 436-442

DIŞ BÜKEY YÜZEYLERİN FREZELENMESİNDE FORM HATALARININ DENEYSEL VE NÜMERİK İNCELENMESİ

Arif Gök^a, Kadir Gök^b, Süleyman Yıldız^c, Süleyman Neşeli^c

a, Amasya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya/TÜRKİYE, arif.gok@amasya.edu.tr

b, Dumlupınar Üniversitesi Teknik Bilimler MYO Makine Bölümü, Kütahya/TÜRKİYE, kadirgok67@hotmail.com

c, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Konya/TÜRKİYE, syaldiz@selcuk.edu.tr, sneseli@selcuk.edu.tr

Özet

Konveks yüzeylerin küresel parmak frezlenmesinde sehim değerlerinin ve bunlara bağlı form hatalarının bulunması daha az üretim maliyetleri ve uygun toleransların içinde üretimin yapılabilmesi için çok önemlidir. Bu çalışmanın amacı TiC kaplı kesici takım ve EN X40CrMoV5-1/DIN 1.2344 malzeme kullanılarak konveks yüzeylerin frezelenmesinde form hatalarını değerlendirmektir. Deneyler farklı takım yolu stratejileri, kesme parametreleri ve ilgili seviyeleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırılan parçaların form hataları 3 boyutlu optik tarama ile belirlenmiştir. Aynı zamanda kalıntı malzeme analizi ticari CAD yazılımı ile yapılmıştır. Sonuç olarak en büyük form hataları ilgili yüzey tipi için 45° ve 60° frezeleme pozisyon açı değerlerinde ve tırmanma bölgelerinde belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Küresel parmak frezeleme, form hatası, optik tarama

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF FORM DEFECTS IN BALL END MILLING OF CONVEX SURFACES

Abstract

Finding deflection values and related form defects in ball end milling of convex surfaces has a significant importance for keeping the production within the appropriate tolerances and in reducing production costs. The aim of this study is to evaluate form defects in milling of convex surfaces of EN X40CrMoV5-1/DIN 1.2344 using TiC coated cutting tool. The experiments have been conducted with different cutting tool path strategies and cutting parameters at related parameter levels. The form defects of machined specimens are determined by 3D optical scanning. At the same time, the analysis of residual material is made with commercial CAD software. As a result, the largest form defects are detected at the ramping regions with the milling position angles of 45° to 60° for the convex surface type.

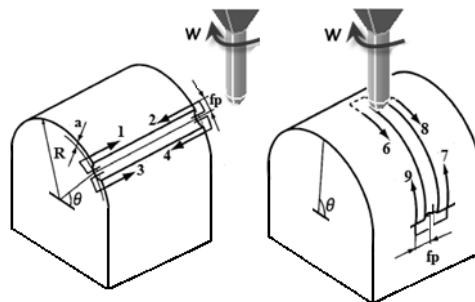
Keywords: Ball end milling, form defect, optical scanning

1. GİRİŞ

Üretim sektöründe talep edilen toleranslar çok dardır ve bu yüzden boyutsal hataların en aza indirilmesi zorunludur [1, 2]. Parmak frezelerden kaynaklanan hatalardan takım üzerindeki salgi ve aşınma öne çıkmaktadır. Bunların yanında, kesme esnasında takım esnemesinden doğan eğilme, üretimde çoğu kez göz ardı edilen önemli bir hatadır [3]. Ikua vd. [4] işleme hatalarının teorik analizleri üzerine çalışmışlardır. Kesme kuvvetleri eğik (oblique) kesme teorisi tabanlı değerlendirilmiştir. Takım sehiminin sebep olduğu kuvvetlerden kaynaklanan işleme hataları işlenen yüzeyin çeşitli bölgelerinde hesaplanmıştır. Kim vd. [5] kesici takımın eğilmesinden kaynaklanan sehimler yüzünden frezeleme esnasında oluşan üç boyutlu şekil hatalarının analizi için geliştirdikleri yöntemi sunmuşlardır. Lacalle vd. [6] çalışmada sertleştirilmiş çelik yüzeylerin yüksek hızda frezelenmesinde takım sehiminden kaynaklanan boyutsal hataları incelemişler ve ilgili yüzeyler için boyutsal hataları tespit etmişlerdir. Zhang vd. [7] serbest şekilli yüzeylerin frezelenmesinde şekilsel doğruluğa ve yüzey kalitesine çeşitli takım yolu stratejilerinin etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Son yıllarda sayısallaştırma sistemlerinin aktif kullanımı bu hatların ortaya çıkarılmasında büyük katkılar sağlamaktadır. Üç boyutlu sayısallaştırma işlemi, var olan bir fiziksel nesnenin üç boyutlu bilgisayar modelini elde etme yöntemidir. Nesneden elde edilen ve ham olan bu bilgi, optik tarama yazılımları ve uygulamaları sayesinde ürün geliştirme sürecinin ilerideki aşamaları için kullanılabilir hale getirilmektedir [8]. Tasarımların değiştirilmesi, yeniden gerçekleştirilmesi ve kalite kontrolü amacıyla, iş parçasının orijinal BDT modeli ile ölçülen iş parçasının oluşturulan BDT verisi karşılaştırılmaktadır [9]. Orijinal BDT verisi ile bu veriye bağlı olarak imal edilmiş parçanın 3B sayısallaştırma verisinin karşılaştırıldığı uygulamalara nadiren rastlanmaktadır. Elmas vd. [10] işlenmiş bir yüzeyin optik profil ölçme teknikleri (ışık kesiti ve fotometrik görünüm) ile analizi üzerine çalışmışlardır. Optik ölçme yöntemi ile elde edilen sonuçlar mekanik ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Vorburger vd. [11] yüzey yapılarının ölçülmesi için optik ve iğneli ölçüm yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Optik metotlar ile iğneli ölçümler arasında %75'e yakın farklar ortaya koymuşlardır. Lin ve Chin [12] aksenal fan bıçaklarının optik taranması için otomatik 3B ölçüm sistemleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmada geometrik hesap algoritması ile uygun ölçüm yönünü belirlemişlerdir. Bu sayede esnek ve kolay ölçüm sistemi oluşturmuşlardır. Huang vd. [13], Quan vd. [14] and Chen ve Huang [15] fringe izdüşümü optik ölçme yöntemi ile şekillerin ölçümü üzerine çalışmışlardır. Bu sayede fringe izdüşümünün ölçümlerde faydalı bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Frank vd. [16] optik ölçme yöntemlerini kullanarak üç boyutlu şekillerin ölçülmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada amaç, eğimli yüzeylerin küresel parmak frezelenme form hatalarının tespitidir. Aynı zamanda nümerik yöntemler ile bu ölçümlerin karşılaştırılmasıdır.

1.1. İşleme Stratejileri

Deneysel çalışmalarda, dış bükey yüzeyin imali için Tırmanma ve Kontur takım yolları, aynı yönlü ve ters yönlü frezeleme üzerine kurularak oluşturulmuştur. Her iki takım yolunda da adımlar sabittir ve kesici her bir adımı işledikten sonra o adımın başlangıç noktası hizasına gelecek şekilde parçaya temas etmeden bir adım yana ilerlemekte ve bundan sonra diğer adımı işlemektedir [17]. Belirlenen bu şartlar altında 4 adet işleme tarzı oluşturulmuş ve bunlar; aynı yönlü tırmanma (AYT), aynı yönlü kontur (AYK), ters yönlü tırmanma (TYT) ve ters yönlü konturdur (TYK) (Şekil 1). Şekil 1'de R iş parçasının yarıçapı, θ frezeleme pozisyon açısı, ap talaş derinliği, f_p kesici yanal adımı ve S devir sayısıdır.



Şekil 1: Takım yolu tarzları-kontur: 1 ters yönlü: (yanal adım yukarı), 2 aynı yönlü (yanal adım yukarı), 3 ters yönlü (yanal adım aşağı), 4 aynı yönlü (yanal adım aşağı); 5 ters yönlü (yanal adım sol), 6 aynı yönlü (yanal adım sol), 7 ters yönlü (yanal adım sağ), 8 aynı yönlü (yanal adım sağ) [18]

1.2. Parametrelerinin Belirlenmesi

Çalışmada form hatları üç boyutlu optik tarama sayesinde ortaya koyulmuştur. Kesici ve kullanılan malzemeye göre son talaş kaldırma operasyonu için işleme tarzına ek olarak üç farklı değişken kontrol edilebilir parametre kullanılmıştır. Bunlar; kesme hızı (V_c), ilerleme (V_f) ve kesici yanal adımıdır (f_p). Talaş kaldırma operasyonlarında yanal adım değeri, kesici çapının %5'i alınarak oluşturulmuştur [18]. Kesme hızı ve ilerleme değer aralıkları, kesici üreticisi firmanın (Sandvik Coramant) malzeme ve kesici takıma bağlı olarak önerdiği değerlerdir (Çizelge 1) [19]. Kullanılan dört farklı parametre ve her bir parametre için dört farklı seviye için L16 standart dikey dizine göre deney tasarımı yapılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 1. Faktör düzeylerinin atanması

Faktörler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Kesme hızı, V_c (m/min)	70	80	90	100
İlerleme, V_f (mm/min)	223	255	286	318
Yanal adım, f_p (mm)	0,8	1	1,5	2
Takım yolu tarzları	Ters	Aynı	Ters	Aynı
	Yönlü	Yönlü	Yönlü	Yönlü
	Kontur	Kontur	Tırmanma	Tırmanma
	(ZYK)	(AYK)	(ZYT)	(AYT)

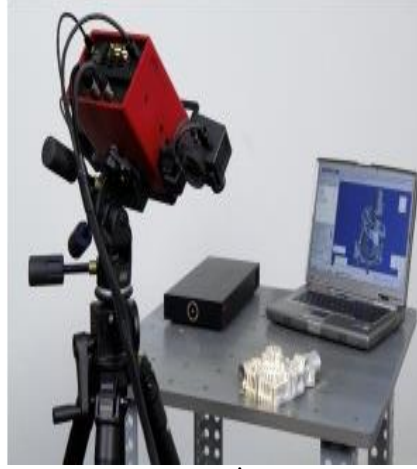
Çizelge 2. TiC kaplama için L16 standart deney parametreleri dizisi

Deney No	Parametre 1	Parametre 2	Parametre 3	Parametre 4
	Kesme Hızı V_c [m/dak] (A)	İlerleme V_f [mm/dak] (B)	Yanal Adım f_p [mm] (C)	Takım Yolu Tarzı (D)
1	70	223	0,8	AYT
2	70	255	1	AYK
3	70	286	1,5	ZYT
4	70	318	2	ZYK
5	80	223	1	ZYT
6	80	255	0,8	ZYK
7	80	286	2	AYT
8	80	318	1,5	AYK
9	90	223	1,5	ZYK
10	90	255	2	ZYT
11	90	286	0,8	AYK
12	90	318	1	AYT
13	100	223	2	AYK
14	100	255	1,5	AYT
15	100	286	1	ZYK
16	100	318	0,8	ZYT

1.3. Üç Boyutlu Optik Tarama İle Sayısallaştırma

Deneylerde Breukmann firmasının opto-TOP-HE tarama sistemi kullanılmıştır (Şekil 2) [20]. Numunelerin optik taranmasında fringe izdüşümü yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntemde çoklu ışık kesitleri başka bir deyişle siyah ve beyaz şeritler halindeki desenler cismin yüzeyine düşürülerek ve bir ya da daha fazla yüksek çözünürlükteki

kamera yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılarak 3 boyutlu yüzey bilgisi elde edilir [21]. Çalışmada, fringe izdüşümü yöntemi ile elde edilen nokta bulutu öncelikle yüzey modele çevrilmiş ve bu yüzey küçük üçgen yüzeylere bölünmüştür [22]. Bu üçgen yüzeyler ise köşelerinin kartezyen koordinatları ve yüzey normal vektörü ile temsil edilmiştir. Taramalar ile gerçek parçaların karşılaştırılmasında öncelikle yüzeyin normaline göre belirlenmeler yapıldıktan sonra z ekseninde köşe koordinatına göre yerleşim yapılmıştır.



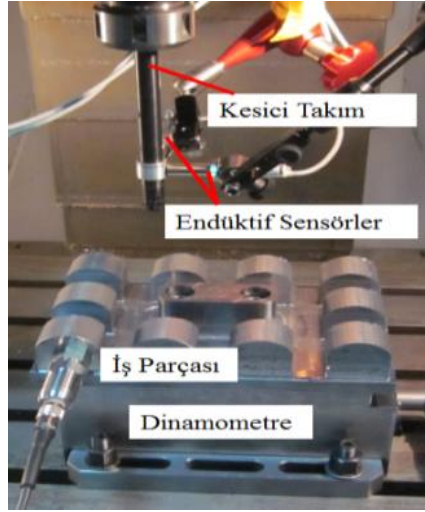
Şekil 2. Üç Boyutlu Optik Tarama İle Form Hatalarının Ölçülmesi

1.4. Nümerik Artık Malzeme Analizi

İşlenecek yüzeyin eğrilik parametresi, kullanılan kesici takımın çapı, kesici takımın tipi ve işleme stratejilerinin işleme sonrası kalan talaş miktarı üzerinde etkilidir. Burada amaç, işleme sonrası kalan talaşların sebep olduğu form hatası değerlerini ve bölgelerini imalattan önce öngörmektir. Çalışmada kaba ve ince işleme sonrası kalan talaşı tespit etmek yani hata miktarını bulmak için Catia V5 R19 paket programının CAM modülü kullanılmıştır. Bu işlemde işleme simülasyonu sonrası elde edilen yüzeyle tasarım yüzeyi kıyaslaması yapılarak kalan talaş miktarı bulunmaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada DIN 1.2344 (Böhler W302) sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır. Malzeme 1650 N/mm² akma dayanımı ile 22-25 HRC sertliğe sahiptir. 1020-1080°C sıcaklıkta 25-30 dakika ısıl işleme tabi tutulup yağ içerisinde soğutulduğunda sertliği yaklaşık 50-54 HRC' ye çıkmaktadır. Endüstrideki kullanımına paralel olması açısından sertleştirme yapılmamış, fakat malzeme talaş kaldırma operasyonları tamamlandıktan sonra ısıl işleme tabi tutulmaktadır. İlgili malzemenin kimyasal özellikleri %0,39 C, %1 Si, %0,40 Mn, %5,10 Cr, %1,3 Mo, %0,025 P, %0,005 S ve %1 V'dur. Kesici olarak, değiştirilebilir uçlu (R216-16A20-045), Ø16 mm silindirik saplı, 30° helis açılı parmak freze kullanılmıştır. Kesici uç olarak 3 mikron kalınlığında TiC kaplı (R216-16 03 M-M H13A) uçları kullanılmıştır. Ölçümler JohnFord VMC 550 dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deneyle KISTLER 9265B dinamometre kullanılmıştır. Kesme kuvveti sinyalleri X ve Y yönlerinde alınmıştır. Tırmanma operasyonları için ilerleme kuvveti Y yönünde oluşurken kontur operasyonları için X yönünde oluşmaktadır. Her iki operasyon için kesici takıma teğet gelen kuvvetler esas kesme kuvvetlerini oluşturmaktadır. Deney düzeneği Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği

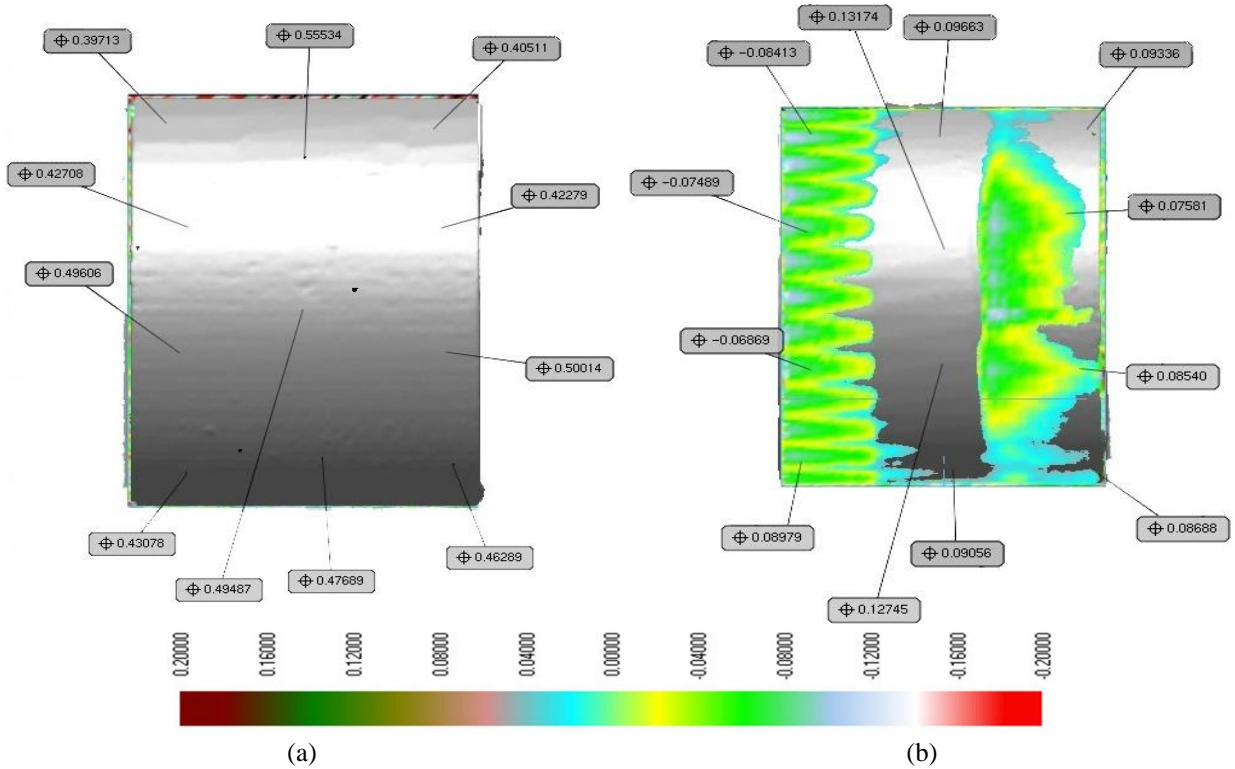
2.1. Üç Boyutlu Optik Tarama Sonuçları

Optik taramadan elde edilen model ile BDT modeli karşılaştırılmış ve parça üzerindeki takım sehiminden kaynaklanan form hataları sayısal olarak ölçülerek işaretlenmiştir. Parça üzerinde meydana gelen negatif veya pozitif form hataları ve oluştuğu bölgeler üç boyutlu optik tarama çıktıları ile gösterilmiştir. Parça üzerinde form hata değerleri renklendirmeler yardımı ile belirginleştirilmiştir. Form hatalarının büyük olması birçok tarama için sadece gri rengin oluşmasına sebebiyet vermiştir. Yapılan deneylerde meydana gelen en büyük ve en küçük form hata değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

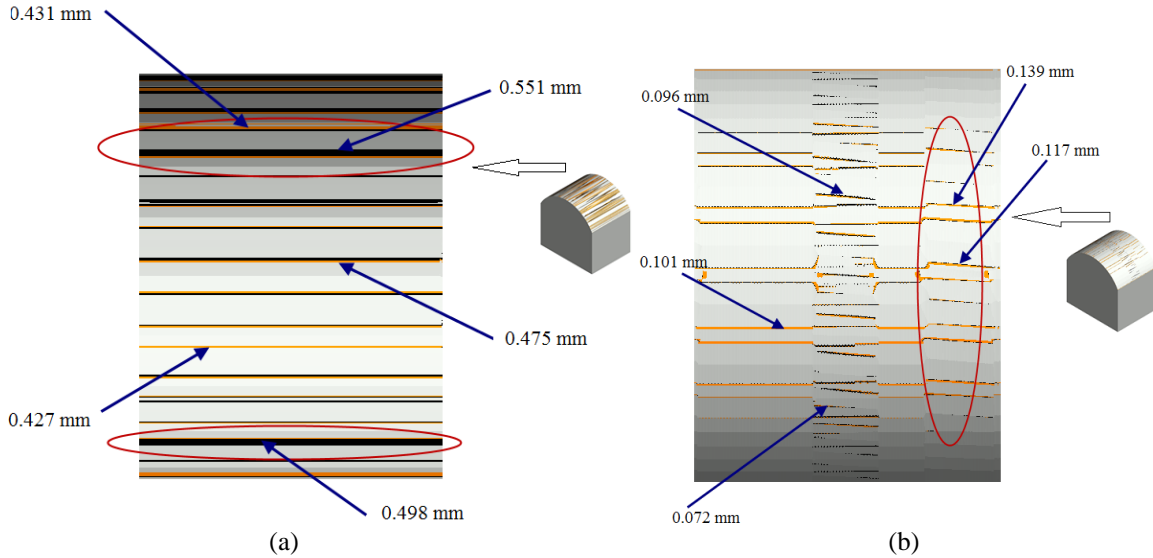
Çizelge 2. Taramalar sonrası form hata değerleri

Deney Numarası	En Büyük Form Hata Değeri (mm)	En Küçük Form Hata Değeri (mm)
1	0,12745	0,06869
2	0,28750	0,23057
3	0,29299	0,25703
4	0,41516	0,36537
5	0,16926	0,08269
6	0,20721	0,13412
7	0,40825	0,37694
8	0,46842	0,43079
9	0,37024	0,30281
10	0,55534	0,40511
11	0,20077	0,11334
12	0,21189	0,13592
13	0,37429	0,23749
14	0,16740	0,11610
15	0,23537	0,12012
16	0,14853	0,08589

Çizelge 2’de görüldüğü gibi en büyük form hatası 0,555 mm ile Deney 10’da oluşmuştur. En küçük form hatası 0,068 mm ile Deney 1’de oluşmuştur. Deney 10 ve Deney 1’e ait optik tarama görüntüleri sırasıyla Şekil 4 (a) ve 4 (b)’de verilmiştir. Bu değerlere paralel olarak nümerik çalışma sonuçları da aynı bölgelerde en büyük ve en küçük form hata değerlerini göstermiştir (Şekil 5).

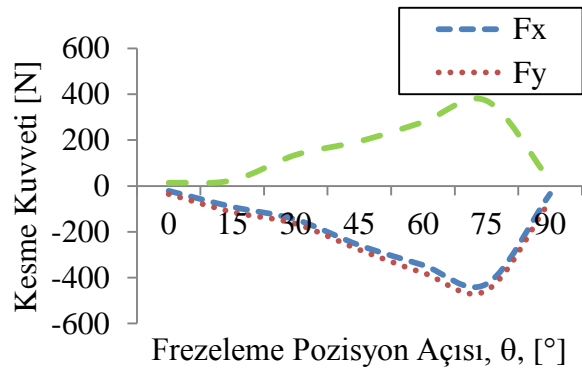
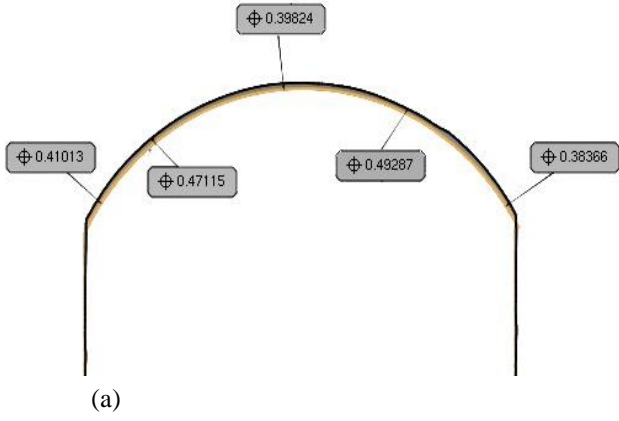


Şekil 4. Dışbükey yüzey form hataları; a) en büyük form hatası (Deney 10), b) en küçük form hatası (Deney 1).

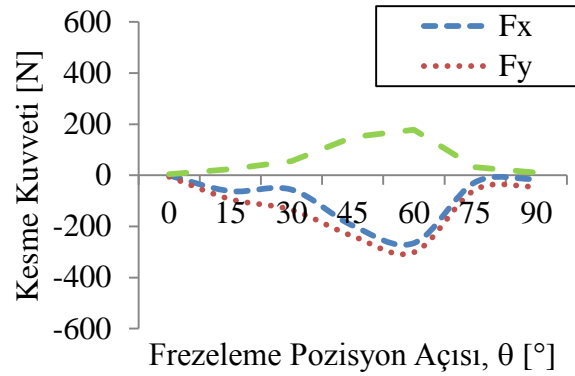
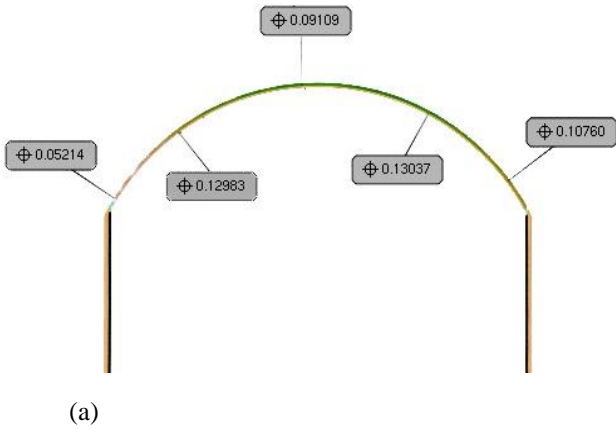


Şekil 5. Dışbükey yüzey form hataları; a) en büyük form hatası (0,551 mm), b) en küçük form hatası (0,072 mm).

Dışbükey yüzey formunda en büyük ve en küçük form hata çıktılarının meydana geldiği ilgili deney için frezeleme pozisyon açısına göre form hataları ve kesme kuvvetlerinin değişimi ile Şekil 6 ve 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Dışbükey yüzey formunun; a) en büyük form hatası için frezeleme pozisyon açısına göre, b) kesme kuvvetlerinin değişimi.



Şekil 7. Dışbükey yüzey formunun; a) en küçük form hatası için frezeleme pozisyon açısına göre, b) kesme kuvvetlerinin değişimi

Şekil 6 ve 7'den görüldüğü gibi dışbükey numunelerin simetrik yarısı için frezeleme pozisyon açısının 45° - 60° aralığında en büyük form hata değerleri oluşmuştur. Kesici efektif çapın sıfıra yaklaştığı bölgelerde kesme kuvvetleri ve form hata değerleri azalmıştır. Takım temas uzunluğu efektif çapın büyüdüğü pozisyon açılarında büyümüş, bu durum kesme kuvvetlerini ve buna bağlı form hatalarını artırmıştır. Dışbükey yüzey tipi için zıt yönlü frezeleme tekniğinde takım sehimi ve buna bağlı form hata değerleri yüksek çıkmıştır. Nedeni ise hem yüzeyin formu hem de takımın az talaştan çok talaşa doğru girmesi kesme kuvvetlerini artırmış ve takım boyunun uzun olmasından dolayı tırlama titreşimi oluşturmuştur. Kontur takım yolu tarzı form hataları açısından küçük çıkmıştır. Çünkü kontur operasyonları kavis eksenine paralel ve kısa süreli işlemeyi içermektedir.

3. SONUÇLAR

Bu çalışmada dışbükey yüzeyin son talaş kaldırma işleminde kesme parametreleri ve farklı takım yolu tarzları dikkate alınarak form hatası araştırılmıştır. Eğimli yüzeyin işlenmesi için değiştirilebilir uçlu küresel parmak freze ve TiC kaplama kesici uçlar kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar neticesinde yanal ilerleme ve ilerleme değerlerinin artması form hataları artış göstermiştir. Elde edilen bulgular Bağcı'nın [22] çalışmasının sonuçları ile yakinen örtüşmüştür. Bağcı [22], ilerleme hızının artması form hatalarının arttığına ulaşılmış ve yapılan çalışma paralel sonuçlar vermiştir. Ek olarak parça eksenine paralel takım yolu hareketlerinin, talaşın kesme bölgesinden kolay atılmasında önemli bir etmen olduğunu vurgulamışlar bu sonuç elde edilen veriler ile yakinen örtüşmüştür. Eğimli yüzey üzerinde takım frezeleme pozisyonu arttıkça form hatasının arttığı görülmüştür. 45°-60° frezeleme pozisyon açısı aralığında en büyük form hataları oluşmuş, takım efektif çapının sıfır olduğu noktalara doğru azalmıştır. Dışbükey yüzey tipi için zıt yönlü frezeleme tekniğinde takım sehimi ve buna bağlı form hata değerleri yüksek çıkmıştır. Nedeni ise hem yüzeyin formu hem de takımın az talaştan çok talaşa doğru

girmesi kesme kuvvetlerini artırmış ve takım boyunun uzun olmasından dolayı tırlama titreşimi oluşturmuştur. Kontur takım yolu tarzı form hataları açısından küçük çıkmıştır. Çünkü kontur operasyonları kavis eksenine paralel ve kısa süreli işlemeyi içermektedir. Form hatlarının tespitinde üç boyutlu optik tarama sistemlerinin, nümerik çalışma sonuçları ile aynı bölgelerde form hata sonuçları vererek iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmanın yürütülmesinde sağladıkları finansal destekten dolayı Amasya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (Proje kodu: FMB-BAP 15-0137) teşekkür ederler.

4. REFERANSLAR

- [1] Trent E.M., Wright P, 2000. Metal Cutting, Butterworths Press, 4th Edition, London
- [2] Zhou, J.M., Andersson, M., Ståhl J.E. 2004. "Identification of cutting errors in precision hard turning process", Journal of Materials Processing Technology, 153–154, 746-750
- [3] Shaw M.C., 2005. Metal Cutting Principles, Oxford University Press, 2nd Edition, Oxford
- [4] Ikuu, B.W., Tanaka, H., Obata, F., Sakamoto, S., "Prediction of cutting forces and machining error in ball end milling of curved surfaces -I theoretical analysis", Precision Engineering, 25, 266–273, 2001.
- [5] Kim, G.M., Kim, B.H., Chu, C.N., "Estimation of cutter deflection and form error in ball end milling processes", Machine Tools & Manufacture, 43, 917-924, 2003.
- [6] Lacalle, L.N.L., Lamikiz, A., Sanchez, J.A., Salgado, M.A., "Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 24, 621-631, 2004.
- [7] Zhang, X.F., Xie, J., Xie, H.F., Li, L.H., "Experimental investigation on various tool path strategies influencing surface quality and form accuracy of CNC milled complex freeform surface", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58, 5-8, 647-654, 2012.
- [8] Kim, S.W., Choi, Y.B. Oh J.T. 1999. "Reverse engineering: high speed digitization of free-form surfaces by phase-shifting grating projection moiré topography", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 39, no. 3, pp. 389-401
- [9] Broggiato, G.B., Campana, F., Gerbino S. 2001. "Shape deviation analysis on sheet-metal parts through reverse engineering techniques", XII ADM International Conference-Italy-Sept, 5th-7th, Italy
- [10] Elmas, S., Islam, N., Jackson, M.R., Parkin R.M. 2011. "Analysis of profile measurement techniques employed to surfaces planed by an active machining system", Measurement, 44, 365–377
- [11] Vorburger, T.V., Rhee, H.G., Renegar, T.B., Song, J.F., Zheng A. 2007. "Comparison of optical and stylus methods for measurement of surface texture", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33, 1-2, 110-118
- [12] Lin, A.C., Chin C.H. 2011. "Automatic 3D measuring system for optical scanning of axial fan blades", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 57, 5-8, 701-717
- [13] Huang, P.S., Zhang, C., Chiang F.P. 2003. "High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection", Optical Engineering, 42, 163
- [14] Quan, C., He, X.Y., Wang, C.F., Tay, C.J., Shang H.M. 2001. "Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting", Optics Communications, 189, 21-29

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [15] Chen, L.C., Huang C.C. 2005. “Miniaturized 3D surface profilometer using digital fringe projection”, *Measurement Science and Technology*, 16, 1061-1068
- [16] Chen, F., Brown, G.M., Song M. 2000. “Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods”, *Optical Engineering*, 39, 10
- [17] Gök, A., Gologlu, C., Demirci H. 2013. “Investigation of Cutting Force and Tool Deflection Effects on Ball End Milling of Convex and Concave Inclined Surfaces”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69, 1063-1078
- [18] Gök, A., Gologlu, C., Demirci H. 2012. “Effects of Different Cutting Styles on End Milling of DIN 1.2344 Steel”, *International Iron & Steel Symposium*, 02-04 April, Karabük, Turkey
- [19] Sandvik Coromant, CoroMill Ball Nose Endmill, (Erişim;<http://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/downloads/pages/default.aspx>), 2012
- [20] Defne Mühendislik, Tasarım, Ürün Geliştirme ve İmalat ve Sanayi LTD. ŞTİ., 2012
- [21] The Basics Of Photo Grammetry, Geodetic Services, Inc, (www.geodetic.com), 2012
- [22] Bağcı E. 2011. “Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling”, *Scientific Research and Essays*, vol. 6(2), pp. 256-27

POSTER BİLDİRİLER

VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN DELİNEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Eyüp Mert^a, Bahattin Yılmaz^a, Ömer Bayraktar^a, Gültekin Uzun^a, İhsan Korkut^a

a, G.Ü. Teknoloji Fakültesi İmalat Bölümü, Ankara/TÜRKİYE,

eyupmert@gazi.edu.tr

bahattinyilmaz@gazi.edu.tr

omerbayraktar@gazi.edu.tr

uzun.gultekin@gazi.edu.tr

ikorkut@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışmada birçok sanayi dalında yaygın olarak kullanılan Vermiküler Grafitli Dökme Demirin (CGI) delinebilirliği araştırılmıştır. Bu araştırma kapsamında CGI 'nın delinebilirliği deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur. Yapılan deneyler kapsamında iki farklı uç açısına (118°-135°) sahip, kaplamasız ve TiN kaplamalı HSS takımlar kullanılmıştır. Deneyler dört farklı kesme hızında (21, 24.2, 27.8 ve 31.9 m/dak), üç farklı ilerleme (0.1, 0.125 ve 0.15 mm/dev) miktarında ve kuru işleme şartlarında delme işlemi yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler ışığında önemli bir işlenebilirlik kriteri olan ilerleme kuvveti ölçülmüş ve seçilen parametrelerin ilerleme kuvvetleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda artan ilerleme miktarı ile kuvvetlerin arttığı ve aratan uç açısının kuvvetleri olumlu etkilediği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Vermiküler Grafitli Dökme Demir (CGI), Delme Operasyonu, Kesme Kuvveti

THE INVESTIGATION OF DRILLABILITY IN COMPACTED GRAPHITE CAST IRON

Abstract

In this study, the machinability of compacted graphite iron (CGI) investigated which is widely used in automobile industry. As a part of this study, the drillability of CGI presented with experimental studies. Two different tool angles (118° and 135°), uncoated and TiN coated HSS tools were used during the tests. The tests were performed done by drilling with four different cutting speeds (21-24,2-27,8-31,9 m/min) and three different feed rate (0,1-0,125-0,15 mm/rev) with dry process conditions. Obtained data from the experimental studies, the feed force which is an important criteria of machinability has qualified and the effect of selected parameters on feed force has investigated. In consequence of these studies, it was determined that the forces increases with increasing feed force and increasing tool included angle influences the forces positively.

Keywords: Compacted Graphite Iron, Drilling Operation, Cutting Force

1. GİRİŞ

Vermiküler grafitli dökme demir, farklı üretim teknolojileri gerektiren özellikleriyle, 1965'ten itibaren dökme demir ailesindeki yerini almıştır [1]. Vermiküler Grafitli Dökme Demirler otomotiv endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle fren diskleri, eksoz manifoldları, motor kapağı ve motor blokları gibi parçaların yapımında tercih edilen bir malzeme olmuştur. Mukavemet özellikleri üstün olan bu malzeme, özellikle yüksek basınçlı yanma odalarının imalatına daha elverişli olup daha verimli yanma ve düşük emisyon değerleri elde edilmesine olanak sağlamaktadır. İnce et kalınlığında parça üretimine uygun olan bu malzeme ile daha hafif motorların imalatı söz konusu olmaktadır. Bunun yanı sıra bu malzemenin işlenmesi esnasında işlenebilirlik açısından birçok problemle karşılaşmaktadır [2, 3]. Dökme demirlerin işlenebilirliği, dökümün tipine ve mikro yapısına bağlıdır. Beyaz dökme demirin işlenebilirliği oldukça zor iken, ferritik dökümün işlenebilirliği ise en kolaydır. Vermiküler Grafitli Dökme Demirin işlenebilirliği, beyaz döküm ile ferritik döküm arasında yer almaktadır [4].

Ülkemizdeki Gayri Safi Milli Hasılanın %24'ünü imalat sektörünün oluşturduğu göz önüne alınırsa imalat işlemlerinde kullanılan kesici takımların bu sektöre ekonomik bazdaki katma değerinin ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır [5]. Kesici takımın daha uzun ömürlü olabilmesi ve iş parçasının istenilen kalitede üretilerek hammadde israfının önlenmesi için, kesme performansın ve şartlarının optimize edilmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bunu gerçekleştirebilmek için, kesici takımların ömrüne tesir eden etkenler ile iş parçasının kalitesinin belirlenmesinde etkili olan etkenler araştırılmaktadır [6].

Talaş kaldırma işlemlerinde, kesme kuvvetlerine birden çok parametreler etki etmektedir. Kesici takım üzerine etki eden kesme kuvvetleri, talaş kaldırmanın önemli bir safhasını oluşturur. Kesme kuvvetleri; takım tezgâhlarının rijit olması ile birlikte kesme derinliği, talaş açısı, kesme hızı, ilerleme miktarı, iş parçasının malzemesi vb. faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir [7]. Delme işlemi en önemli talaş kaldırma işlemlerinden biridir ve talaş kaldırma işlemlerinin %33'ünü içermektedir. Delme işlemi çoğunlukla talaş kaldırma işlemlerinin sonucusudur. İmalat endüstrisinde modern talaşlı imalat yöntemleri geliştirilmesine rağmen, geleneksel delik delme yöntemi ekonomikliği ve basit uygulanabilirliği gibi sebeplerden dolayı hala en yaygın kullanılan işleme yöntemidir [8].

Literatürde yapılan çalışmada değişen matkap uç açılarının etkisini incelemiştir. Deneysel çalışmada 118° ve 130° olmak üzere iki uç açısı, üç farklı ilerleme değeri, sabit bir kesme hızı ve iki çeşit kaplama kullanılmıştır. Sabit kesme hızında artan ilerleme ile yapılan deneylerde 118° kaplamasız takımında kesme kuvvetinde artış gözlenmiştir. 118° TiN kaplı takımında ise kuvvetler %20 ile %27 arasında düşüş göstermiştir. Aynı şartlarda 130° uç açısına sahip kaplamasız takımında, 118°'lik kaplamasız takıma göre %36'lara varan oranlarda azalan kuvvetler görülmüş. TiN kaplamalı 130° açılı matkabın ise 118°'lik kaplamalı takıma göre %17 oranında ilerleme kuvvetinde azalmalar belirlenmiştir. Uç açısındaki artış ve kaplama ile birlikte kuvvetlerde azalma görülürken artan ilerleme değeri ile tüm işlemlerde kuvvetler artmıştır [9].

Bir başka çalışmada CGI ile Gri dökme demirin delinebilirliği karşılaştırılmış. CGI'nın Gri dökme demire göre daha zor delindiği ortaya konulmuştur. Gri dökme demir yapısındaki kükürdün (S) yağlama özelliği, kuvvetleri ve aşınma miktarını azalttığı tespit edilmiş ve CGI'nın işlenmesinde kükürt içeren kesme sıvılarının kullanılması tavsiye edilmiştir [10].

CGI'nın delinmesine yönelik yapılan bir diğer çalışmada ise 3 farklı kaplamalı matkap kullanılarak CGI'nın delinme performansı incelenmiştir. Artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetinin arttığı belirlenmiş. Cr kaplı matkaplarda ise daha uzun takım ömrü elde edildiği tespit edilmiştir [11].

Literatürde delme çalışmalarının dışında CGI'ya başka işleme metotları da uygulanmıştır.

CGI ile yapılan bu çalışmada tornalama işlemi sırasında artan kesme hızlarına bağlı olarak esas kesme kuvvetinin azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Bu eğilimin sebebi olarak artan ısıyla birlikte malzemenin sünekliliği de arttığı gözlenmiştir. Artan ilerleme ile kuvvetlerinde arttığı bu çalışmada ortaya çıkmıştır. İlerlemeye bağlı yine benzer bir sonuç CGI'nın frezelenmesi işleminde de belirlenmiştir [12,13]. CGI'ya yapılan başka bir frezeleme işleminde ise yavaşlama açılarının kuvvetlere etkisi incelenmiştir. Kuru işleme şartlarında

artan yanaşma açılarının kuvvetleri azalttığı buna karşı ıslak işleme şartlarında küçük yanaşma açılarının kuvvetleri düşürürken yüksek yanaşma açılarının kuvvetleri artırıcı etkisi olduğu ortaya konulmuştur [14].

Literatür çalışmaları incelendiğinde CGI'nın delinebilirliği ile ilgili çalışmaların diğer talaşlı imalat operasyonlarına göre az olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada endüstride önemli bir yere sahip olan CGI malzemesinin farklı uç açıları ve farklı kaplamalara sahip matkaplar ile delinebilirliği araştırılmıştır. Farklı uç açılara sahip kaplamalı ve kaplamasız matkaplarla yapılan deneylerde değişen kesme kuvvetleri ölçülerek CGI için optimum kesme şartları ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT

2.1 Deney Numuneleri

Delme deneylerinde kullanılmak üzere deney numunesi olarak Vermiküler grafitli dökme demir (CGI) malzemesi kullanılmıştır. Vermiküler grafitli dökme demir otomotiv endüstrisinde motor bloklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan vermiküler grafitli dökme demir malzemenin kimyasal bileşenleri Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Vermiküler grafitli dökme demirin kimyasal bileşenleri (% ağırlık)

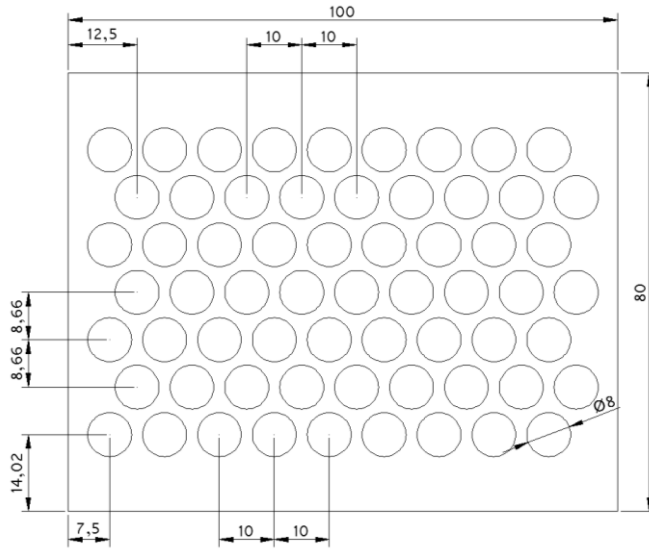
Mikro yapı	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Perlitik	3,82	1,804	0,337	0,031	0,015	0,074	0,013	0,002
	Cu	Mg	Sn	Ti	Al	Zn	Bi	Fe
	0,879	0,014	0,092	0,0203	0,008	0,082	0,007	Kalan

Kimyasal bileşenleri verilen malzemenin mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. Vermiküler grafitli dökme demirin mekanik özellikleri

Özellik	Vermiküler grafitli dökme demir
Çekme Dayanımı (MPa)	502,7
% 0.2 Akma Sınırı (MPa)	284,30
Uzama %	0,40
Sertlik (HV)	280
Darbe Dayanımı (J/cm ²)	8,6

Deneylerde kullanılacak olan deney numuneleri Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında işlenerek 100x80x14 mm boyutlarına getirilmiştir. Testerede numuneler kesilmiş ve üniversal frezede talaş alınarak yüzeyler paralel hale getirilmiştir. Yüzeyleri düzeltilen numuneler düzlem taşlamada taşlanarak delme yüzeylerindeki pürüzlülük giderilmiş ve yüzeyler paralel hale getirilmiştir. Deney numunesi ölçüleri ve delinen deliklerin yerleşimi şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney numunesi ölçüleri ve delinen deliklerin yerleşimi

2.2 Kesici Takımlar

Delinebilirlik deneyleri için iki farklı kesme açısına sahip, kaplamalı ve kaplamasız olmak üzere dört farklı HSS matkap kullanılmıştır. Kullanılan matkaplar ve özellikleri aşağıdaki Tablo 3.'de verilmiştir.

Tablo 3. Kullanılan matkaplar ve özellikleri

Kısaltma	Matkap Çapı	Matkap malzeme Cinsi	Kaplama	Standard	Uç açısı
A100 118°			-	DIN 338	118°
A120 135°			-	DIN 1897	135°
A002 TiN 118°	8 mm	HSS	TiN	DIN 338	118°
A022 TiN 135°			TiN	DIN ANSI	135°

2.3 Takım Tezgâhı

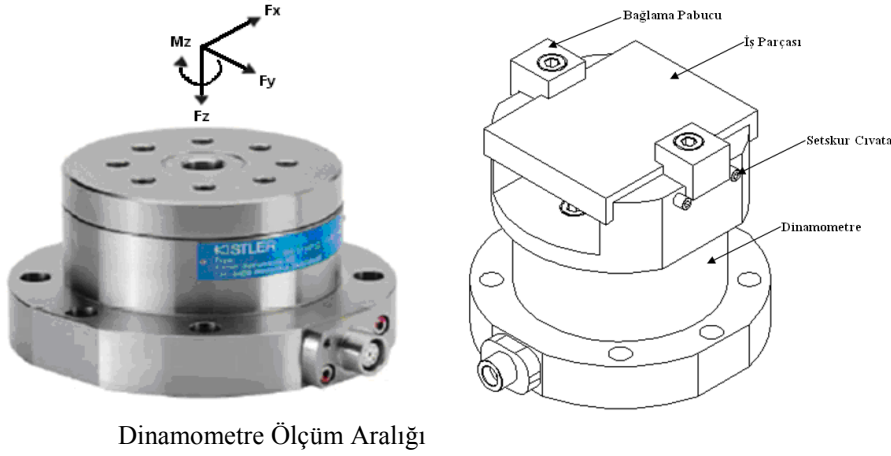
Delik delme deneyleri Gazi Üniversitesi Teknolojisi Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü CNC Laboratuvarında bulunan FANUC kontrol ünitesine sahip Johnford VMC-550 marka sanayi tipi CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır. Tezgah 5 KW güce, 6000 dev/dak en yüksek devir sayısına, X, Y ve Z eksenlerinde sırasıyla 600mm, 500mm ve 600mm eksen hareketine ve 0,001 mm işleme hassasiyetine sahiptir.

2.4 Kesme Parametreleri ve Deney Düzenegi

Deneylerde kesme parametreleri olarak dört farklı kesme hızı (21, 24.2, 27.8, 31.9 m/dak) ve üç farklı ilerleme (0.1, 0.125, 0.15 mm/dev) miktarı seçilmiştir. Parametre seçimleri kesici takım kataloğu ve literatüre göre belirlenmiştir. Delinebilirlik testlerinde, delme işlemi için üç kuvvet bileşeninden radyal ve kesme kuvveti nispeten küçük değerlerde olduğundan üçüncü kuvvet bileşeni olan ilerleme kuvveti (thrust force) ve tork değerleri dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada üç kesme kuvveti bileşeni ve tork kuvveti de ölçülmüş ancak yalnızca eksenel kuvvet bileşeni değerlendirilmeye alınmıştır. Kesme kuvveti ölçümleri Gazi Üniversitesi Teknolojisi Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarındaki dik işleme merkezine bağlanan KISTLER 9272A dinamometre ile yapılmıştır. KISTLER 9272A 4 bileşenli dinamometre, dinamometreden gelen sinyallerin veri okuma kartına (KISTLER PCIM DAS 1602/16) aktarılmasında çok kanallı bir amplifikatör ve

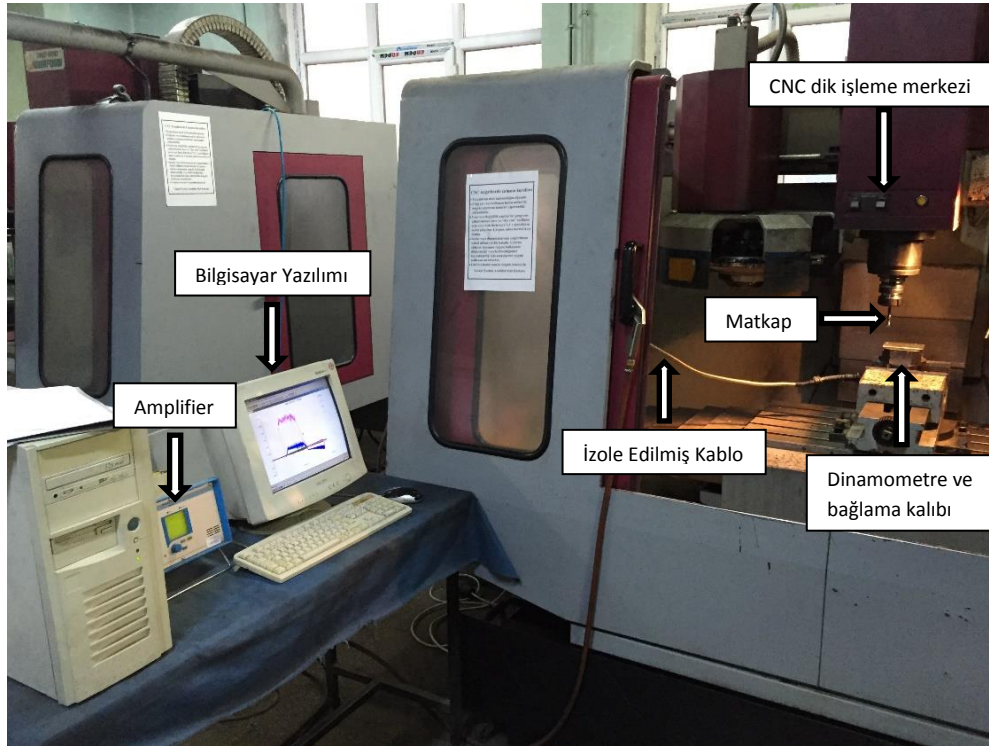
6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

son olarak da verilerin işlenmesi ve grafiklerin elde edilmesi için Windows işletim sistemi ile uyumlu KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı hazır olarak temin edilmiştir. Şekil 2’de kullanılan dinamometre özellikleri ve bağlama kalıbı verilmiştir [15]. İlerleme kuvvetini ve moment kuvvetini ölçebilmek için deney numuneleri dinamometreye bağlama kalıbı kullanılarak bağlanmıştır. Şekil 3.’de deney düzeneği verilmektedir.



Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mz (Nm)
-5...5	-5...5	-5...20	-200...200

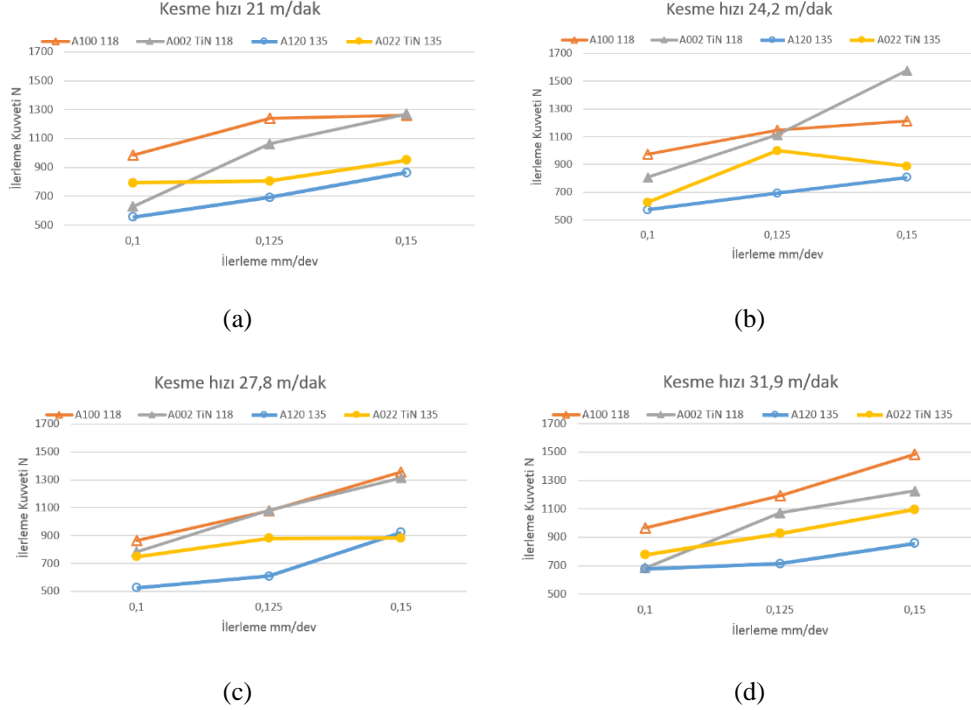
Şekil 2. Dinamometre Özellikleri ve bağlama kalıbı [15]



Şekil 3. Deney Düzeneği

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Her bir deneyde delinen her delik için kesme kuvveti ayrı ayrı ölçülmüştür. Ancak delme esnasında dinamik kesme kuvvetlerinin dinamometre ile ölçümünden elde edilen verilerden, sadece aksel (ilerleme) kuvvetin değerleri dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Kaplamsız ve TiN kaplamalı matkaplarla yapılan delme işlemlerinde elde edilen ilerleme kuvvetleri değerlendirilmiştir.



Şekil 4. İlerleme kuvveti grafikleri

Şekil 4. genel anlamda incelenecek olunursa bütün kesme hızlarında ilerleme oranının artışı ile aksel kuvvetlerde artışlar görülmüştür. Kesme hızının 21 m/dak alınan deneyler incelendiğinde A100 118° matkabının en yüksek ilerleme kuvvetine sahip olduğu ve en düşük ilerleme kuvvetinin ise A120 135° matkabında olduğu gözlenmiştir.

Kesme hızının 24,2 m/dak alındığı deneyler incelendiğinde en düşük ilerleme kuvveti A120 135° matkabında gerçekleşmiştir. En yüksek ilerleme kuvveti ise 0,1 ve 0,125 ilerleme miktarında A100 118° matkabında çıkmıştır. Fakat 0,15 ilerleme miktarında A002 TiN 118° matkabının daha yüksek ilerleme kuvvetine sahip olduğu görülmüştür.

Kesme hızının 27,8 m/dak'lık alınan deneyler incelendiğinde kesme hızlarında ise en düşük ilerleme kuvveti genellikle A120 135° matkabında olduğu görülmüştür. En yüksek ilerleme kuvveti ise A100 118° matkabında olduğu gözlenmiştir.

Kesme hızının 31,9 m/dak alınan deneylerde ise en düşük ve en yüksek ilerleme kuvveti A100 118° ve A120 135° matkaplarında görülmüştür.

Şekil 4. incelendiğinde deneylerde bulunan en düşük ilerleme kuvveti genellikle A120 135° matkap ucunda bulunmuştur. En yüksek ilerleme kuvveti ise genellikle A100 118° matkabında oluşmuştur. Artan ilerleme değeri ile ilerleme kuvvetlerinde artışlar görülmüştür. Bu duruma artan ilerleme miktarı ile artan talaş miktarı sebep olduğu düşünülmektedir. Ancak diğer talaşlı imalat işlemleri ile delme işlemi kıyaslandığında talaş tahliyesine bağlı olarak kuvvet eğilimi farklılık gösterebilir. Tahliye edilemeyen talaşların kesmenin yapıldığı bölgede sıcaklığı arttırdığı bilinmektedir. Bu nedenle ısının kuvvetleri etkilediği düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR

Delik delme deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

1-Matkap uç açısı 135° olan takımlar incelendiğinde, TiN kaplamanın ilerleme kuvvetleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmuştur. Matkap uç açısı 118° olan takımlar incelendiğinde ise, TiN kaplamanın ilerleme kuvvetleri üzerinde olumlu bir etkisi olduğu gözlenmiştir.

2-En düşük kesme kuvvetleri genellikle matkap uç açısının 135° olan takımlarda elde edilmiştir. Özellikle kaplamasız 135° olan takımda 0.1 mm/dak ilerleme miktarı ve 21 m/dak kesme hızında 556 N'luk değer ile en düşük kesme kuvveti elde edilmiştir.

3-En yüksek kesme kuvveti TiN kaplamalı 118° uç açılı matkap ucunda elde edilmiştir. Uç açısı 118° olan kaplamasız matkap ta ikinci yüksek kesme kuvveti ölçülmüştür.

4-Takımlar arası kıyaslama yapıldığında en düşük ilerleme kuvveti kaplamasız 135° takım ile elde edilirken ikinci en iyi sonuç TiN kaplamalı 135°lik takım ile elde edilmiştir. Üçüncü en iyi sonuç ise TiN kaplamalı 118°lik takım ile ölçülmüştür. Bütün kesme hızlarında en yüksek ilerleme kuvveti kaplamasız 118°lik takım ile belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1]. “Modern metal cutting – A practical handbook”, Sandvik Coromant, Sweden, 1-3 (1994)
- [2]. Cooper, K. P., Loper, C. R., “ Some Properties of Compacted Graphite Cast Iron”, American Foundry Society Transactions, 86: 241-248(1978).
- [3]. Melleras, E., Guesser, W.L., Boehs, L., “Study of Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process”, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 26, 22-27, (2004).
- [4]. Murthy, V.S.R., Kishore, Seshan, S., “Characteristics of Compacted Graphite Cast Iron”, Transactions of the American Foundrymen's Society, 92:373-380 (1984).
- [5] Halamoglu, T., “Metal Püskürtme Yöntemiyle Asınmaya Dayanıklı Kaplamalar”, Yüzey işlemleri Dergisi, (1998)
- [6] Tonshoff, H.L., Spintig, W., Konig, W., Neises, A., “Machining of Holes Developments in Drilling Techonolgy”, Annals of the CIRP, 43 : 551-560 (1994).
- [7] Duran, A., Acır, A., (2004) HSS Torna Kalemindeki Talaş Açısının Kesme Kuvvetlerine Etkisi, Politeknik Dergisi, 7(3), 211-215
- [8] Tonshoff, H.L., Spintig, W., Konig, W., Neises, A., “Machining of Holes Developments in Drilling Techonolgy”, Annals of the CIRP, 43 (2): 551-560 (1994).
- [9] Kaynak, Y., “Matkap İle Delik Delme Esnasında Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvveti ve Sıcaklığın Değişimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2006).
- [10] Evans, R. Hoogendoorn, R. Platt, E., lubrication & machining of compacted graphite iron, quaker chemical Corporation, metalworking division laboratory, july 2011,1-7
- [11] Jose M.F. de, Paiva Jr., Fred L. Amorim, P. Soares, Ricardo D. Torres Evaluation of Hard Coating Performance in Drilling Compacted Graphite Iron (CGI) May 30, 2013

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [12] Mavi, A., Korkut, İ., 13-15 Mayıs 2009, “Vermiküler Grafitli Dökme Demirin İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması”, 5. Uluslararası İleri Teknolojileri Sempozyumu, Karabük
- [13] Kahraman Y., Uzun G., Mavi A., Korkut İ., 23-25 Ekim 2014 “ Östemperlenmiş Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özelliklerinin Kesme Kuvvetlerine Etkisi”, 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, Bursa
- [14] Karabulut Ş. Güllü A. 2013 “Farklı Yanaşma Açıları İle Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Frezelenmesinde Kesme Kuvvetlerinin Araştırılması Ve Analitik Modellenmesi” Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi Cilt: 28 No:1 135-143
- [15] Uzun G., Korkut İ., 16-18 May 2011, “ Delme Ve Frezelemedeki Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi İçin Deney Seti Tasarımı Ve İmalatı”, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ

AŞIRI TEMPERLENMİŞ AISI 1050 ÇELİĞİN TORNALANMASINDA ESAS KESME KUVVETLERİNİN ÇOKLU REGRESYON İLE MODELLENMESİ

Şehmus Baday^a, Hüdayim Başak^b, Hüseyin Gürbüz^c

a, Şırnak Üniversitesi Şırnak Meslek Yüksekokulu MakineBölümü, Şırnak/TÜRKİYE, shmsbdy@hotmail.com

b, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Müh. Böl, Ankara/TÜRKİYE, hbasak@gazi.edu.tr

c, Batman Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine ve İmalat Müh. Böl, Batman/TÜRKİYE, huseyin.gurbuz@batman.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, kuru kesme şartlarında tornalanmış ve aşırı temperlenmiş AISI 1050 çeliğinin esas kesme kuvvetlerini tahmin etmek için lineer, ikinci dereceden ve üstel regresyon modelleri oluşturulmuştur. Regresyon modellerinde kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve ısıl işlem süreleri bağımsız değişkenler olarak seçilirken esas kesme kuvvetleri bağımlı değişken olarak seçilmiştir. Bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler tarafından ne kadar etkilendiği belirlemek için ANOVA (varyans analizi) testi yapılmıştır. Ayrıca bağımlı değişkene en çok etki eden bağımsız değişkenin ilerleme hızı olduğu tespit edilmiştir. En küçük kareler yöntemi kullanılarak esas kesme kuvveti için elde edilen lineer, ikinci dereceden ve üstel modeller sırasıyla $R^2 = \%94,7$, $R^2 = \%99,6$ ve $R^2 = \%99,2$ elde edilmiştir. En küçük kareler yöntemine göre en iyi tahmin değeri ikinci dereceden regresyon modelinde elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Aşırı Temperleme, Esas kesme kuvvetleri, çoklu regresyon, ANOVA

MODELLING OF MAIN CUTTING FORCES WITH MULTIPLE REGRESSIONS IN TURNING OF OVER-TEMPERED AISI 1050 STEEL

Abstract

In this study, in order to estimate main cutting forces of AISI 1050 steel turned under dry cutting conditions and over-tempered, linear, second order and exponential regression models were made. While cutting speed, feed rate, and depth of cut and heat treatment time in regression models were selected as independent variables, main cutting forces were selected as dependent variable. So as to determine how much dependent variable was affected by independent variables, ANOVA (variant analysis) was conducted. Also, it was established that the independent variables affecting dependent variable were feed rate. By using least square method, linear, second order, exponential models obtained for main cutting forces were $R^2 = \%94,7$, $R^2 = \%99,6$ ve $R^2 = \%99,2$, respectively. According to least square method, the best estimated value was obtained with second order regression model.

Key Words: Over-Tempering, Main Cutting Forces, Multiple Regression, ANOVA

1. GİRİŞ

Çeliklerin mekanik özellikleri önemli ölçüde çeliğin mikroyapısındaki farklılıklardan dolayı değişir. Mikroyapı farklılıkları, çeliklere çeşitli ısı işlemleri uygulanarak değiştirilebilir [1]. Çeliklere uygulanan bu ısı işlemleri, çeliği işleyen takım ömrünü artırabilir ve işleme maliyetlerini azaltabilir. Mekanik özellikleri düşürücü nitelikte uygulanan bu ısı işlemlerindeki amaç, yapıyı yumuşatıp takım ömrünü artırmak, kesme kuvvetlerini azaltmaktır [2]. Su verilmiş ve temperlenmiş martenzitik çelikler mekanik özelliklerinin geniş aralıkta değişimi, tasarımcılara pek çok orta karbonlu çelik arasında seçim yapabilmeye kolaylığı sağlar [1]. Temperlenmiş çelikler imalat sektöründe, çeşitli otomobil parçaları olan dişliler, akslar ve direksiyon kolları üretimden yaygın olarak kullanılmaktadır [3-5]. Talaş kaldırma esnasında oluşan kesme kuvvetleri, ilerleme oranı, kesme hızı vb. işlenen malzemenin cinsine göre değişiklik gösterir. Kesme kuvvetlerini bilmek ve buna bağlı olarak kesici takımın ömrünün tahmin edilebilmesi takım tezgâh imalatçıları açısından oldukça büyük önem taşır. Kesici takıma ait uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi kesici takımın ömrünün uzamasına, istenilen yüzey kalitesinde iş parçasının üretilmesine olanak vermektedir [6].

Son yıllarda literatürde tahmin teknikleri kullanılarak birçok sayıda çalışmanın yapıldığı gözlemlenmiştir [7-22]. Bu tahmin teknikleri; yüzey yanıt metodu [14], bulanık mantık [16], taguchi yöntemi [17], matematiksel modelleme [18], yapay sinir ağları [19-22] ve çoklu regresyon modelleri [7-15] yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesinde lineer regresyon, çoklu lineer regresyon, ikinci dereceden ve üstel regresyon modelleri kullanıldığı tespit edilmiştir [7-15]. Yüzey pürüzlülüğünün tahmininde çoklu doğrusal regresyon, ikinci dereceden ve üstel regresyon modelleri arasında en iyi tahminleri ikinci dereceden regresyon modelinde elde edildiği görülmüştür [7-9]. Bağımlı değişken olarak kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü seçilerek, bağımsız değişkenler ise kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, takım uç yarıçapı ve kesici uç kaplamalarının kullanıldığı tespit edilmiştir [7-12]. Çoklu regresyon modelinde bağımlı değişkenlere etki eden bağımsız değişkenler arasında en etkili bağımsız değişkenin ilerleme hızı olduğu belirlenmiştir [14].

Bu çalışmanın amacı aşırı temperleme ısı işlemi uygulanmış AISI 1050 çeliğinin kesme parametrelerine bağlı olarak tornalanması sonucunda elde edilen esas kesme kuvvetleri değerlerinin tahmini için çoklu doğrusal regresyon modeli oluşturulmasıdır. Oluşturulan regresyon modellerine ANOVA testi yapılarak, en küçük karalar metoduna göre en iyi model seçilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Esas kesme kuvvetleri ölçümlerinin yapılabilmesi için kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiş olan AISI 1050 çeliği kullanılmıştır. Bu malzemeden esas kesme kuvvetleri deneylerinde kullanılacak Ø 30x200 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 1. AISI 1050 malzemesinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,52	0,28	0,81	0,009	0,022	0,08
Mo	Ni	Al	Cu	Sn	Fe
0,02	0,10	0,020	0,17	0,011	Kalan

Bu numuneler önce 850 °C’de 15 dakika östenitlenmiş ardından martensit fazı üretmek için su verilmiş ve daha sonra sırasıyla ayrı ayrı 700 °C’de 15, 60 ve 180 dakika izotermal tavlama yapılarak ferritik matriste farklı ebat

ve morfolojilere sahip küresel sementitler üretilmiştir. Numunelere uygulanan ısı işlemlerin özeti Tablo 2’de numune kodları ile birlikte verilmiştir.

Tablo 2. Numunelere uygulanan ısı işlemler

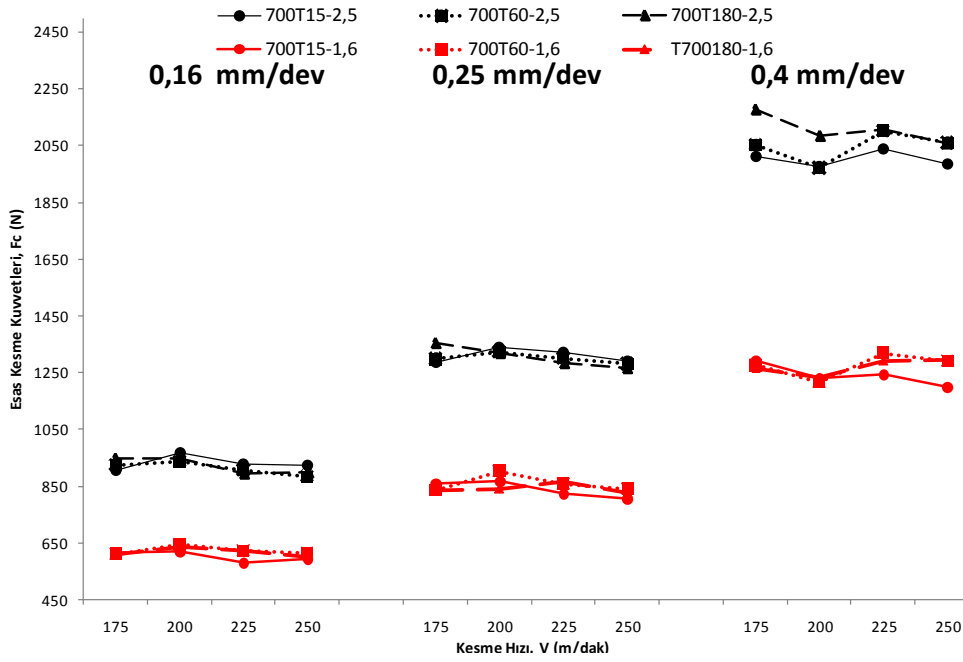
Numune kodları	Isıl işlem parametreleri
700T15	850 °C’de 15 dk östenitleme + su verme + 700 °C’de 15 dk temperleme
700T60	850 °C’de 15 dk östenitleme + su verme + 700 °C’de 60 dk temperleme
700T180	850 °C’de 15 dk östenitleme + su verme + 700 °C’de 180 dk temperleme

Numunelerin işleme deneylerinde ISO 3685’te belirtilen deney şartlarına uygun olarak SNMG formunda sementit karbür kesici takım ile buna uygun 75° yanaşma açısına sahip PSBNR 2525M12 formunda takım tutucu kullanılmıştır. İşleme malzemesine uygun CVD kaplı GC4215 kalitesinde çift taraflı kesici takımı seçilmiştir. Kesici takım için üretici takım firmasının SNMG 120408 PM formulu talaş kırıcı geometrisi belirlenmiştir. Deneyler kuru kesme şartlarında CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvveti ölçümü için üç eksenel yönde ölçüm kapasitesine sahip Kistler 9275B tipi dinamometre kullanılmıştır.

İşleme deneylerinde kullanılan parametreler, takım üretici firması verileri ve ISO 3685’teki öneriler göz önüne alınarak, 175, 200, 225 ve 250 m/dak dört farklı kesme hızı, iki farklı 0,16 ve 0,25 mm/dev ilerleme, 1,6 ve 2,5 mm iki farklı talaş derinliği olarak seçilmiştir. Deneylerin tümünde aynı şartları oluşturmak için, her bir işlem uygulanmasında yeni bir kesici takım kullanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen esas kesme kuvvetleri değerlerini tahmin etmek için oluşturulan çoklu regresyon modelleri SPSS 21.0 paket programı kullanılarak oluşturulmuştur.

3. DENEY SONUÇLARI

Kuru kesme şartlarında tormalanmış ve aşırı temperlenmiş AISI 1050 çeliğinin kesme parametrelerine ve uygulanan ısı işlem sürelerine bağlı olarak elde edilen kesme kuvvetleri değerleri Tablo 3 ve Şekil 1’de verilmiştir. Bağımlı değişken esas kesme kuvveti (F_c , N) iken, bağımsız değişkenler kesme hızı (V , m/dk), ilerleme hızı (f , mm/dk), talaş derinliği (a , mm) ve ısı işlem süresi (t , dk) olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğine bağlı esas kesme kuvvetleri değişimi

Şekil 1'deki esas kesme kuvvetleri grafikleri incelendiğinde; kesme hızının artmasına bağlı olarak esas kesme kuvvetinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum artan kesme hızı ile kesme kuvvetlerindeki düşüş sıcaklık artışı nedeniyle kesici takım talaş yüzeyindeki temas alanının azalması ve kısmen de talaşta akma bölgesinde (ikinci deformasyon bölgesi) kayma gerilmesinin azalması ile açıklanmaktadır [23]. 0,16 ve 0,25 mm/dev ilerleme hızlarında 175 m/dak kesme hızında esas kesme kuvvetleri değerleri diğer kesme hızlarına göre daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi düşük ve orta kesme hızlarında yapışkan talaş oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapışkan talaş oluşumu eğiliminin artması ile etkin talaş açısının artmasına ve aynı zamanda takım talaş temas uzunluğunun azalmasıyla kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olmuştur. Numunelerin ilerleme miktarının 0,16 mm/dev'den 0,25 mm/dev'e ve 0,4 mm/dev'e (Şekil 1) artırılmasıyla kesme kuvvetlerinde ortalama % 45'lik bir artış gerçekleşmiştir. İlerleme ve kesme derinliğine bağlı olarak oluşan "talaş kesit alanı" esas kesme kuvvetini belirleyen en önemli faktördür. Dolayısıyla ilerlemedeki artışla beraber artan talaş kesiti esas kesme kuvvetindeki artışın temel nedenidir.

Isıl işlem süresinin değişimine bağlı olarak elde edilen esas kesme kuvvetleri değerleri Şekil 1'deki grafikte gösterilmiştir. Genel olarak, Şekil 1'deki esas kesme kuvvetlerine bakıldığında ısıl işlem süresi arttıkça 700T15, 700T60 ve 700T180 numunelerinde esas kesme kuvvetlerinde düşüş Şeki 1'de açıkça görülmektedir. Isıl işlem süresinin artmasına bağlı olarak iş parçalarının süneklik değeri artmakta ve bununla birlikte numunelerin mikroyapısında ferit fazları giderek büyümekte ve dislokasyon hareketleride daha kolay gerçekleşmektedir. Bunların sonucu olarak genel olarak 700T180 numunesi 700T60 numunesine göre daha düşük kesme kuvvetleri değerlerine sahipken, 700T60 numunesi ise 700T15 numunesine göre daha düşük kesme kuvvetlerine sahip olmaktadır.

Tablo 3. Esas kesme kuvvetleri değerleri

<i>D. No</i>	<i>V m/dk</i>	<i>f mm/dev</i>	<i>a mm</i>	<i>t dk</i>	<i>Fc N</i>	<i>D. No</i>	<i>V m/dk</i>	<i>f mm/dev</i>	<i>a mm</i>	<i>T dk</i>	<i>Fc N</i>
1	175	0,16	1,6	15	615,04	37	175	0,16	2,5	15	906,87
2	175	0,25	1,6	15	860,02	38	175	0,25	2,5	15	1284,89
3	175	0,4	1,6	15	1290,7	39	175	0,4	2,5	15	2010,93
4	200	0,16	1,6	15	618,54	40	200	0,16	2,5	15	967,05
5	200	0,25	1,6	15	865,12	41	200	0,25	2,5	15	1339,52
6	200	0,4	1,6	15	1230,86	42	200	0,4	2,5	15	1977,69
7	225	0,16	1,6	15	579,74	43	225	0,16	2,5	15	929,04
8	225	0,25	1,6	15	823,12	44	225	0,25	2,5	15	1320,46
9	225	0,4	1,6	15	1242,77	45	225	0,4	2,5	15	2036,27
10	250	0,16	1,6	15	591,7	46	250	0,16	2,5	15	921,04
11	250	0,25	1,6	15	803,32	47	250	0,25	2,5	15	1289
12	250	0,4	1,6	15	1198,06	48	250	0,4	2,5	15	1984,58
13	175	0,16	1,6	60	609,89	49	175	0,16	2,5	60	922,55
14	175	0,25	1,6	60	834,48	50	175	0,25	2,5	60	1296,94
15	175	0,4	1,6	60	1274,63	51	175	0,4	2,5	60	2052,46
16	200	0,16	1,6	60	643,04	52	200	0,16	2,5	60	936,23
17	200	0,25	1,6	60	902,26	53	200	0,25	2,5	60	1321,89
18	200	0,4	1,6	60	1214,35	54	200	0,4	2,5	60	1970,76
19	225	0,16	1,6	60	622,48	55	225	0,16	2,5	60	905,7
20	225	0,25	1,6	60	858,19	56	225	0,25	2,5	60	1300,35
21	225	0,4	1,6	60	1318,67	57	225	0,4	2,5	60	2101,87
22	250	0,16	1,6	60	613,45	58	250	0,16	2,5	60	883,57
23	250	0,25	1,6	60	840,48	59	250	0,25	2,5	60	1280,3
24	250	0,4	1,6	60	1290,44	60	250	0,4	2,5	60	2058,93
25	175	0,16	1,6	180	608,25	61	175	0,16	2,5	180	945,48
26	175	0,25	1,6	180	832,87	62	175	0,25	2,5	180	1352,17
27	175	0,4	1,6	180	1264,3	63	175	0,4	2,5	180	2176,9
28	200	0,16	1,6	180	634,26	64	200	0,16	2,5	180	946,16
29	200	0,25	1,6	180	840,13	65	200	0,25	2,5	180	1318,03
30	200	0,4	1,6	180	1234,26	66	200	0,4	2,5	180	2085,01
31	225	0,16	1,6	180	623,05	67	225	0,16	2,5	180	893,38
32	225	0,25	1,6	180	863,21	68	225	0,25	2,5	180	1282,67
33	225	0,4	1,6	180	1290,88	69	225	0,4	2,5	180	2108,42
34	250	0,16	1,6	180	600,83	70	250	0,16	2,5	180	896,08
35	250	0,25	1,6	180	826,24	71	250	0,25	2,5	180	1265,87
36	250	0,4	1,6	180	1295,87	72	250	0,4	2,5	180	2059,61

4. ESAS KESME KUVVETLERİNİN REGRESYON MODELLERİ

Regresyon modellerinde bağımlı değişken esas kesme kuvvetiyken (F_c), bağımsız değişkenler kesme hızı (V), ilerleme hızı (f), talaş derinliği (a) ve ısıl işlem süresi (t) olarak belirlenmiştir. Bağımlı değişkenleri tahmin etmede üç farklı regresyon modeli kullanılmış ve bu modellerden deney verilerine en yakın olan R^2 değerine göre tespit edilmiştir. Esas kesme kuvvetlerini tahmin etmek için lineer, üstel ve ikinci dereceden regresyon modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerin istatistiksel olarak anlamlılıkları ANOVA (Tablo 4) yani varyans analizine değerlerine bakılarak anlamlı oldukları $Sig.$ değerinin $P < 0,05$ küçük olmasından anlaşılmaktadır. İstatistiksel olarak anlamlılık kazanan her üç regresyon modeli için matematiksel modeller oluşturulabilir. Bu bağlamda esas kesme kuvvetleri tahmini için çoklu lineer regresyon modelinin matematiksel ifadesi Eşitlik 1'deki gibidir.

$$Fc = b_0 + b_1V + b_2f + b_3a + b_4t \quad (1)$$

İkinci dereceden regresyon modelinin matematiksel ifadesi ise Eşitlik 2'deki gibidir.

$$Fc = b_0 + b_1V + b_2f + b_3a + b_4t + b_5V^2 + b_6f^2 + b_7a^2 + b_8t^2 + b_9Vf + b_{10}Va + b_{11}Vt + b_{12}fa + b_{13}ft + b_{14}at \quad (2)$$

Üstel regresyon modeli ise Eşitlik 3'deki gibi matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$Fc = b_0 + \ln V^{b_1} + \ln f^{b_2} + \ln a^{b_3} + \ln t^{b_4} \quad \text{veya} \quad \ln Fc = b_0 + b_1 \ln V + b_2 \ln f + b_3 \ln a + b_4 \ln t \quad (3)$$

Tablo 4. Esas Kesme Kuvvetleri Regrayon Modelleri için ANOVA

ANOVA						
Regresyon Modelleri	Model	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F	Sig.
Lineer	Regresyon	14644435,515	4	3661108,879	302,186	0,000 ^b
	Hata	811732,896	67	12115,416		
	Toplam	15456168,411	71			
İkinci Dereceden	Regresyon	15395875,196	13	1184298,092	1139,254	0,000 ^c
	Hata	60293,215	58	1039,538		
	Toplam	15456168,411	71			
Üstel	Regresyon	10,491	4	2,623	2083,622	0,000 ^d
	Hata	0,084	67	0,001		
	Toplam	10,575	71			

Tablo 4'deki ANOVA tablosu incelendiğinde esas kesme kuvvetleri için tüm regresyon modellerinin anlamlılık değeri (Sig.) 0,05'den daha küçük olmasından dolayı istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varılabilir. SPSS programı vasıtasıyla elde edilen lineer, ikinci dereceden ve üstel regresyon modellerinin katsayıları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Esas Kesme Kuvvetleri regresyon modellerinin bağımsız değişken katsayıları

Regresyon Modelleri	Model	Kat Sayılar		Standart Katsayılar	t	Sig.
		B	Hata			
Lineer	Sabit	-971,761	122,020	Beta	-7,964	0,000
	V	-0,281	464	-0,017	-0,606	0,547
	f	3725,187	131,036	0,796	28,429	0,000
	a	576,332	28,826	0,560	19,993	0,000
	t	0,125	0,186	0,019	0,673	0,503
İkinci Dereceden	Sabit	79,420	321,815		0,247	0,806
	V	3,005	2,691	0,181	1,117	0,269
	f	-	487,132	-0,501	-4,813	0,000
	a	2344,746	69,491	0,015	0,217	0,829
	t	15,071	0,599	-0,002	-0,022	0,982
	V ²	-0,013	0,006	-0,175	-1,121	0,267
	f ²	1914,552	603,259	0,234	3,174	0,002
	t ²	-0,002	0,002	-0,052	-1,078	0,286
	V*f	1,037	1,373	0,050	0,755	0,453
	V*a	-0,279	0,302	-0,068	-0,923	0,360
	V*t	-0,001	0,002	-0,038	-0,593	0,556
	f*a	2254,42	85,296	1,171	26,431	0,000
	f*t	1,626	0,551	0,076	2,950	0,005
	a*t	0,139	0,121	0,045	1,148	0,256
	Üstel	Sabit	7,723	0,170		45,363
lnV		-0,056	0,031	-0,020	-1,792	0,078
lnf		0,831	0,011	0,812	74,398	0,000
lna		0,990	0,019	0,577	52,858	0,000
lnt		0,006	0,004	0,016	1,503	0,138

Esas kesme kuvvetlerini lineer olarak elde etmek için Tablo 5’deki katsayılar bölümü altındaki “B” kısmının altında kalan değerler “b” katsayılar değerlerini matematiksel modelde yerine yazılırsa Eşitlik 4’deki lineer eşitlik elde edilir. İkinci dereceden Eşitlik 5 ve üstel regresyon ise Eşitlik 6’dan türetilir.

$$F_c = -971,761 - 0,281V + 3725,187f + 576,332a + 0,125t \quad (4)$$

Tablo 5’deki ikinci dereceden katsayıları Eşitlik 2’de yerine yazılırsa aşağıda matematiksel Eşitlik 5 yazılabilir.

$$F_c = 79,420 + 3,005V - 2344,746f + 15,071a - 0,013t - 0,007V^2 + 1914,552f^2 - 0,002t^2 + 1,037Vf - 0,279Va - 0,001Vt + 2254,42fa + 1,626ft + 0,139at \quad (5)$$

Üstel olarak elde edilen model;

$$\ln F_c = 7,723 - 0,056 \ln V + 0,831 \ln f + 0,990 \ln a + 0,006 \ln t \quad (6)$$

Eşitlik 6’daki gibidir.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

Tablo 5’de bağımsız değişkenlerin sabit katsayı değerleri verilmiştir. Tablo 5’deki significant (sig.) değeri 0,05’den küçük olanlar regresyon modelinde kullanılması uygun olmakla birlikte, 0,05’den büyük olanlar modelde kullanılmaları daha uygundur. Buna göre Tablo 6’da çoklu doğrusal regresyon modelinde kullanılması uygun ve uygun olmayanlar bağımsız değişkenler verilmiştir. “t” değeri mutlak değerce en büyük olan değer modelde bağımlı değişkenler üzerinde en çok etkiye sahip olan bağımsız değerleri vermektedir.

Tablo 6. Anlamlılık katsayısı uygun ve uygun olmayan bağımsız değişkenler

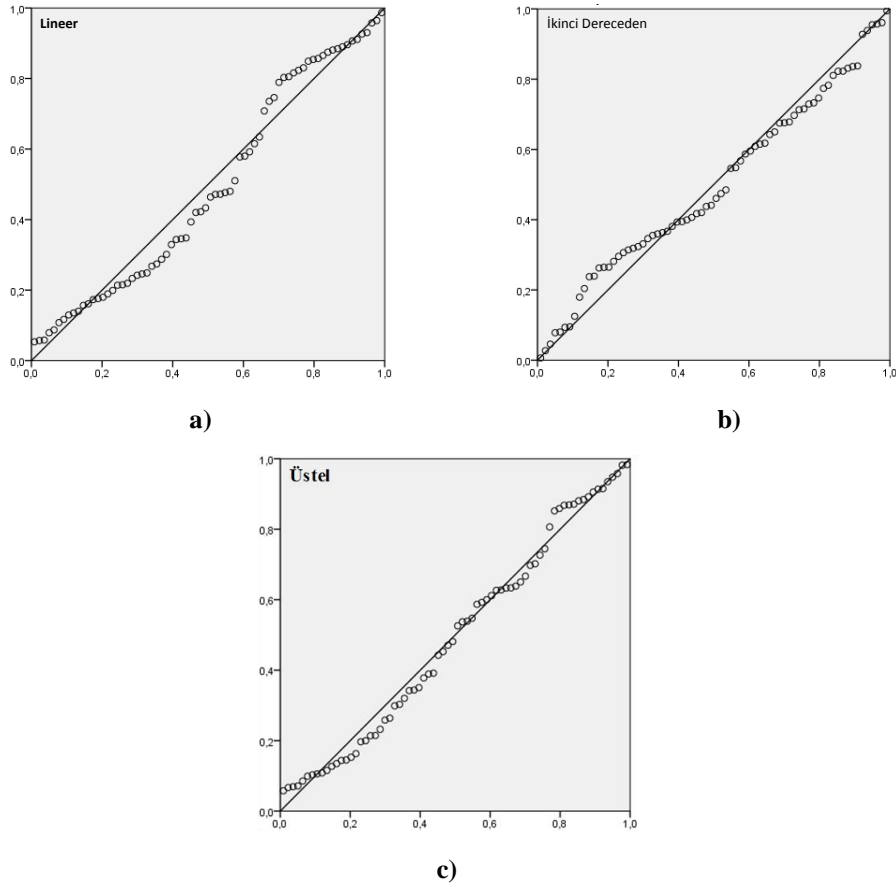
Regresyon Modeli	Anlamlılık Katsayısı < 0,05 (Modelde kullanımları uygun)	Anlamlılık Katsayısı > 0,05 (Modelde kullanımları uygun değil)
	Lineer	Sabit, f, a
İkinci Dereceden	f, f ² , f*a, f*t	Sabit, V, a, t, V ² , t ² , V*f, V*a, V*t, a*f
Üstel	Sabit, ln f, ln a	ln V, ln t

Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler tarafından ne kadar açıklanabildiğini gösteren belirtme katsayı R² değerleri her üç model için Tablo 7’de verilmiştir. Tablo 7 incelendiğinde esas kesme kuvvetleri için belirtme katsayısı 1’e en yakın değer ikinci dereceden regresyon modelinde R² değeri 99,6 ve düzeltilmiş R²_d değeri ise 99,5 olduğu görülmektedir. Belirtme katsayılarına göre en iyi tahmin sonuçları ikinci dereceden regresyon modeli ve bunun sırasıyla üstel, lineer regresyon modelleri şeklinde sıralanmaktadır. Bu durum yapılan çalışmamalar ile paralellik göstermektedir [7-9].

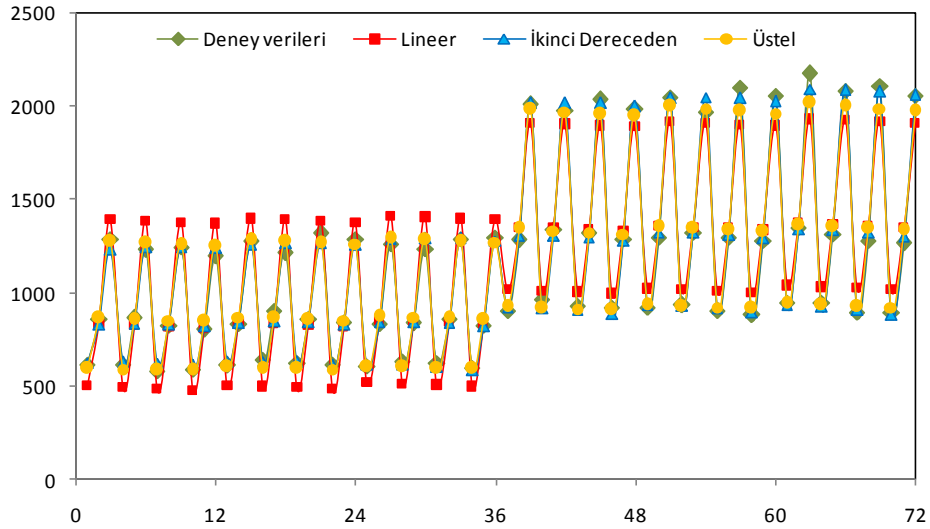
Tablo 7. Bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri açıklama oranı

REGRESYON MODELİ	Esas Kesme Kuvveti	
	R ² (%)	Düzeltilmiş R ² _d (%)
Lineer	94,7	94,4
İkinci Dereceden	99,6	99,5
Üstel	99,2	99,2

Regresyon modelinde ölçülen değerler ile elde edilen değerler arasındaki farklılıklar, hata ya da artık olarak ifade edilmektedir. Lineer, ikinci dereceden ve üstel regresyon hatalarının normal olasılık eğrileri Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 2’deki esas kesme kuvvetleri için olasılık eğrileri görülmektedir. Esas kesme kuvvetleri değerleri için ikinci dereceden ve üstel regresyon modellerindeki artıklar lineer modele göre Şekil 2’deki grafikteki lineer çizgiye daha yakın bir dağılım sergilemektedir. Bu durum ikinci derecede ve üstel regresyon modellerinin daha yakın tahmin değerleri elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 2. Artıkların normal olasılık eğrileri a) Lineer, b) İkinci dereceden, c) Üstel



Şekil 3. Deney verileri ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3'deki lineer, ikinci dereceden ve üstel regreyon modeli tahmin sonuçları deney verileri ile karşılaştırma sonuçlarını vermektedir. Esas kesme kuvvetleri tahmini için deney verilerine en yakın tahmin değerlerini ikinci dereceden regresyon modeli daha sonra üstel ve lineer modeller şeklinde sıralandığı görülmektedir (Şekil 3).

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, deneyler sonucunda elde edilen esas kesme kuvvetleri kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği ve ısıl işlem süresi parametrelerine bağlı olarak çoklu lineer, ikinci dereceden ve üstel regreyon modellemeleri yapılmıştır. Modelleme sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Yapılan ANOVA testine göre her üç regresyon modeli anlamlı bulunmuştur.
- En küçük kareler yöntemi kullanılarak esas kesme kuvveti için elde edilen lineer, ikinci dereceden ve üstel modeller için sırasıyla $R^2 = \%94,7$, $R^2 = \%99,6$ ve $R^2 = \%99,2$ elde edilmiştir.
- Bağımlı değişken üzerinde en büyük etkiye ilerleme hızının olduğu tespit edilmiştir.
- Çoklu regresyon modelleri arasında en iyi tahmin sonuçları değerlerinin ikinci dereceden regresyon modelinde elde edilmiştir.
- Genel olarak kesme hızının artmasına bağlı olarak esas kesme kuvvetlerinde bir düşüş olduğu buna karşın ise ilerleme ve kesme derinliğinin artmasına bağlı olarakta esas kesme kuvvetlerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Genel olarak ısıl işlem süresinin artmasına bağlı olarak esas kesme kuvvetleri azalmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Can, A. Ç., 2006. Tasarımcı mühendisler için malzeme bilgisi, ISBN : 975-511-454-8 , Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [2] Özçatalbaş, Y., 2000. “Isıl işlemlerin Cr-Mo esaslı bir çeliğin işlenebilirliğine etkisi”, 10. Metalürji ve Malzeme Kongresi, İstanbul.
- [3] Tao, J., Wang, X., Tan, J., 1997. “Reliability of gear tooth bending fatigue strength for through hardened and tempered steel 40Cr”, Journal of University of Science and Technology Beijing, Vol. 19, no. 5, pp. 482-484.
- [4] Gao, W., Dong, L., Hu, F., Tan, B., 2008. “Analysis of quenching cranking and improvement of heat treatment process for steel 40Cr axle vehicle”, Journal of Hunan Institute of Technology, vol. 18, no. 4, pp. 33-36.
- [5] Zheng, Y., Wu, Y., Liu, Y., Huang, X., Zhang, X., Xu, G., Wang, W., Wu, S., 2004. “Study on technology of forging-remnant-heat hardening of 40Cr automobile turning junction”, Hot Working Technology, vol. 33, no. 3, pp. 47-48.
- [6] Sürücüler, S., 2010. “Tornalamada kesme parametrelerindeki değişime göre kesme kuvvetlerinin tahmini için matematiksel bir model geliştirme” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.
- [7] Sarıkaya M., Dilipak H., Meral G., 2011. “AISI 1050 malzemenin delinmesinde ilerleme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünün regresyon analiziyle modellenmesi”, Türk Bilim Araştırma Vakfı Bilim Dergisi,, cilt 4, sayı 1, s. 31-41.
- [8] Asiltürk İ., Demirci M. T., 2010. “Karbür kesici kullanarak sertleştirilmiş AISI 1040 çeliklerin frezelenmesindeki yüzey pürüzlülüğünün regresyonla modellenmesi” 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir.
- [9] Asiltürk İ., Akkuş H., 2012. “ AISI 4140 çeliğinin sert tornalama işleminde kesici takım aşınmasının regresyon yöntemi ile istatistiksel olarak modellenmesi” 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir.
- [10] Asiltürk İ., Akkuş H., ve Demirci M. T., 2012. “Regresyonla titreşim, akustik emisyon ve kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi” TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 632, s. 55-62.

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [11] Meral G., Dilipak H. Ve Sarıkaya M., 2011. "AISI 1050 Malzemenin delinmesinde delme parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkisinin çoklu regresyon metoduyla modellenmesi" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, cilt 8, sayı 1: s. 37-46.
- [12] Mavi A., Korkut İ., 2010. "Vermiküler grafitli dökme demirlerin işlenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin regresyon analizi ile modellenmesi" Politeknik Dergisi, cilt 13, sayı 4, s. 281-286.
- [13] Özkul, İ., Buldun, B. B., Akkurt, A., 2013. "Dievar sıcak iş takım çeliğinin delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesine etkisinin regresyon analiziyle modellenmesi", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt 19, sayı 1, s. 1-9.
- [14] Mike, S., L., Joseph, C., Caleb M., 1998. "Surface Roughness Prediction Technique For Cnc End-Milling", Journal of Industry Technology, vol. 15, no. 1, pp. 1-6.
- [15] Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, C. Y., Özdemir, M., 2014. "Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi" Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt 30, sayı 4, s. 220-226.
- [16] Yalçın, B., Uçun, İ., Kuru, M., 2007. "Mermer kesme testerelerinde oluşan kesme kuvvetinin bulunak mantık (bm) yöntemiyle modellenmesi" cilt 22, sayı 2, s. 329-336.
- [17] Tekaut, İ., Günay, M., Şeker, U., 2011. "Tornalama İşlemlerinde Talaş Kırıcı Formunun ve Kesme Parametrelerinin Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu," 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Elazığ.
- [18] Özlü, B., Demir, H., Nas, E., 2014. "CNC tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etki eden parametrelerin matematiksel olarak modellenmesi," İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, cilt 3, sayı 2, s. 75-86.
- [19] Zain, A. M., Haron, H., Sharif, S., 2010. "Prediction of surface roughness in the end milling machining using Artificial Neural Network," Expert Syst. Appl., vol. 37, pp. 1755-1768.
- [20] Özkan, İ. A., Sarıtaş, İ., Yıldız, S., 2009. "Tornalama işleminde kesme kuvvetlerinin ve takım ucu sıcaklığının yapay sinir ağı ile tahmin edilmesi," 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.
- [21] F. Kara, K. Aslantas, and a. Çiçek, 2014. "ANN and multiple regression method-based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel," Neural Comput. Appl., vol. 26, no. 1, pp. 237-250.
- [22] Taşdemir, Ş., 2011. "Yüzey pürüzlülüğünün yapay sinir ağı ve regresyon modelleri ile belirlenmesi ve karşılaştırılması", Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, cilt 10, sayı 3, s. 215-226.
- [23] Zhao, J., Ai, X., Li, Z., 2006. "Finite element analysis of cutting forces in high speed machining", Materials Science Forum, vol. 532-533, pp. 753-756.

TUNGSTEN KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN GERİ DÖNÜŞÜM SÜREÇLERİ

Nergizhan Kavak^a, Ayşegül Çakır^b

a, Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Zonguldak/TÜRKİYE, nergizhan.kavak@beun.edu.tr

b, TUSAŞ/TAI Türk Havacılık ve Uzay Sanayi, Ankara/TÜRKİYE, aycakir@tai.com.tr

Özet

Talaşlı imalat endüstrisinde, iş parçası malzemesinin kesici takımlarla işlenmesi sonucu elde edilen ürünlerin yanında atık olarak ortaya çıkan malzemelerin değerlendirilmesi ve tekrar üretime entegre edilmesi ekonomik ve çevre açısından önemlidir. Dünya genelinde uzun zamandır, tungsten karbür gibi üretiminin zor ve pahalı olduğu malzemelerin geri dönüşümü için fiziksel ve kimyasal metodlar kullanılmaktadır. Ülkemizde ise bir çok endüstri malzemesinin (kağıt, plastik vs) geri dönüşümü yapılmasına karşın kesici takım malzemelerinin yeniden kullanılması konusu göz ardı edilmiştir. Bu amaçla çalışmada, kesici takım ve uçların geri dönüşüm yöntemleri incelenmiş ve konuya dikkat çekilmek istenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kesici uç, Sert metal, Geri dönüşüm

RECYCLING PROCESSES OF TUNGSTEN CARBIDE CUTTING TOOLS

Abstract

In machining industry, recycling of waste materials extracted from in machining of workpiece by cutting tools is economical and is important for the environment. For longtime in worldwide, physical and chemical methods were used for recycling of materials which are expensive and difficult to produce such as tungsten carbide. In our country, recycling of cutting tool waste materials is ignored despite of recycling the most industrial materials such as paper, plastics etc. For this purpose in this paper, methods for recycling of cutting tools and inserts are researched and it is intended to draw attention to this subject.

Keywords: Cutting insert, Hard metal, Recycling

1. GİRİŞ

Günümüzde, enerji ile hammadde sürdürülebilirliğinin sağlanması ve doğa dostu üretimin gerçekleştirilmesi dünyadaki endüstriyel yarışın bir parçası olabilmek adına önemlidir. Doğal kaynaklar sınırlıdır ve teknolojiye bağlı olarak hammadde talebinin sürekli olarak artması, üretim maliyetlerini negatif etkilemektedir. Sınırlı olan kaynakların tüketilmesi yerine, hali hazırda var olan ürün atıklarının değerlendirilmesi maliyete olumlu katkı bulunur. Endüstride kullanılan ve özelliklerinden dolayı alternatifi olmayan bazı malzemelerin üretimi zaman alıcı ve pahalıdır. Bu nedenle, atık malzemelerin yeniden kullanılabilirliğini sağlayacak yöntemlere ilgi her geçen gün artmaktadır.

Sementit karbür olarak bilinen Tungsten karbür (WC), toz metalürjisiyle üretilen bu değerli malzemelerden biridir [1]. Genellikle toplam ağırlığın %70-97 oranında eklenen tungsten karbür tozu, kobalt veya nikel gibi bir bağlayıcı metal ile karıştırılır. Kalıpta sıkıştırıldıktan sonra fırında sinterlenir [2]. Madencilik, inşaat, otomobil sektörlerinde ve çoğunlukla talaşlı imalat alanında kullanılmaktadır. Tungsten karbür takım ve uçlar, üretim aşamaları yüzünden pahalı teknoloji ürünleridir. Talaşlı kaldırma işlemlerinde çok önemli bir unsur olan kesici takım ve kesici uçlar, ömürlerini tamamladıklarında asıl işlevlerini-kesme performanslarını yerine getirememektedirler. 1950'nin ortalarına doğru değiştirilebilen uçların ortaya çıkmasından beri sinterlenmiş karbür uçların popülerliği artmıştır. Kesici uçların bilerek yeniden kullanılması yerine kullan-at dönemi başlamıştır [3]. Talaşlı imalat sürecinde, iş parçası malzemesinin kesici takımlarla işlenmesi sonucu elde edilen ürünlerin yanında atık olarak ortaya çıkan malzemelerin değerlendirilmesi ve tekrar üretime entegre edilmesi ekonomik ve çevresel faydalar açısından önemsenen bir konudur.

Metal talaşlar, kullanılmış kesici uçlar ve kirlenmiş soğutma sıvıları gibi imalat sonrasında kayıp olarak görülen atıkların tekrar kullanılması üretimdeki verimliliğin artırılmasını sağlayacaktır. Bu sayede, üreticinin çevreye vereceği zarar önlemekte ve ekstra maddi kazanımların ortaya çıkmasına yardımcı olmaktadır. Sürecin diğer avantajı da, enerji tasarrufunun sağlanması ve atık miktarının azaltılmasıdır.

Bu çalışmanın amacı, talaşlı imalat sektöründeki kullanım ömrünü tamamlamış takım ile uçların değerlendirilmesi ve yeniden kullanılabilirliğinin ekonomiye sağlayacağı katkılara dikkat çekmektir. Dünya genelinde kesici uçların toplanması ve geri dönüşümünde ciddi araştırmalar yapılmakta ve sonuçlar hızla endüstriye uygulanmaktadır. Ülkemizde ise konu hakkında yeterli bilgi birikimi yoktur. Bu kapsamda, takımların/kesici uçların geri dönüşümünde izlenecek sürecin yöntemleri incelenmiş ve konunun önemine dikkat çekilmek istenmiştir.

2. TAKIM VE KESİCİ UÇ ATIKLARININ YÖNETİMİ

Atık yönetimi, atığın toplanması, taşınması, geri kazanılması, bertaraf edilmesi, bertaraf sahalarının kapatılma sonrası bakımı ve bu tür faaliyetlerin gözetim, denetim ve izlenmesi işlemlerini kapsayan faaliyetlerin bütünü olarak tanımlanabilmektedir [4-6]. Üretim tesislerinden çıkan tehlikeli atık sınıfındaki malzemelerin taşınması, atıkların özellikleri dikkate alınarak uygun koşullarda ambalajlanması gerçekleştirilerek yasalarca belirlenen kurum ve kuruluşlarca yapılabilmektedir. Talaşlı imalat atıkları, malzeme gruplarına göre ayrı ayrı toplanmalı ve işlem görmelidir. Diğer atıkların yanı sıra kesici takım malzemesi olan tungstenin değerli bir maden olması, toplanmasının ve yeniden kullanılabilirliğinin sağlanmasını önemli kılmaktadır. Geri dönüştürülen karbür, talaşlı imalat endüstrisine geri dönmekte ve hammadde malzemelerinin çıkartılmasına gerek kalmamaktadır.

2.1 Takım ve Kesici Uç Atıklarının Toplanması

Karbürün ana elementi ve sınırlı bir kaynak olan tungsten için özellikle geri dönüşüm çok önemlidir. İmalat sonrası ortaya çıkan atık karbür uçlar, çalışma alanındaki toplama kutularında biriktirilir ve yeterince dolduğunda taşıma kutularıyla birlikte işletmeden çıkartılır. Bazı kesici takım firmaları kendi bünyelerinde oluşturdukları geri dönüşüm programlarıyla marka farkı gözetmeksizin üreticilerin atık takımlarını satın alarak ekonomik katkıda bulunmaktadır. Bunun dışında, kullanılmış karbür uçlar çoğunlukla hurda sektöründe çalışan ilgili kurum ve kuruluşlar tarafından satın alınarak geri dönüşüm için yurtdışına gönderilmektedir.

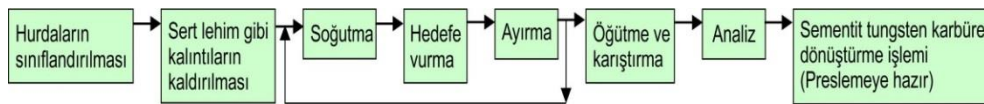
2.2 Takım ve Kesici Uç Atıklarının Geri Dönüşüm Yöntemleri

Kullanılan yöntemler doğrudan (fiziksel) ve dolaylı (kimyasal) olmak üzere iki çeşittir. Doğrudan geri dönüşüm yönteminde katı atıkların temiz olması gerekiyken, dolaylı geri dönüşümde kirli veya içeriği (bileşimi belli olmayan) tahmin edilemeyen atıklar kullanılabilir. Sementit karbürlerin geri dönüşümündeki fiziksel metotlar, çinko işlemi (zinc process) ve soğuk akış (cold stream process) işlemleri olarak bilinmektedir. Yöntemler, Şekil 1. ve Şekil 2.'de şematik olarak gösterilmiştir. Çinko işleminde, yüksek saflıktaki çinko külçeleri ile karbür hurdası birlikte karıştırılır ve ısıtılır. Elde edilen erimiş çinko, argon gaz atmosferinde kobalt ile reaksiyona girer. Daha sonra vakum yoluyla çinkonun ayrıştırılması sağlanır ve süngerleşmiş tungsten karbür açığa çıkar. Süngerleşmiş tungsten karbür yeniden kullanım için harmanlanır, karıştırılır ve parçalanır. Bu işlem döngüsünün süresi 24 saattir. İşlem sonucunda elde edilen tungsten karbür tozunun tane boyutu değişmez ve aynı zamanda bağlayıcı metali de içinde bulundurur [7]. Bu yöntemle sadece tungsten karbür değil kobalt, tantal karbür ve diğer karbür çeşitleri de geri dönüştürülür [8].



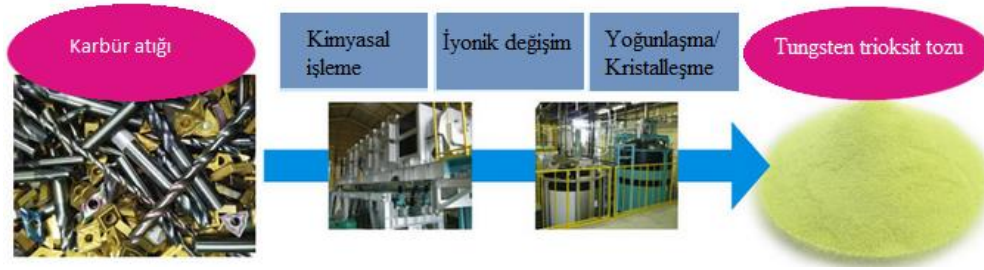
Şekil 1. Çinko prosesi [9]

Soğuk akış yöntemi, atık sementit karbür malzemelerin sementit tungsten karbürden yapılmış bir plakaya yüksek hızlı hava akışı sayesinde hızlanarak vurması ve parçalanması prensibine dayanır. Sementit karbür hurdalar ara tungsten malzemeye yani tungsten trioksit'e (WO_3) dönüştürülür. Elde edilen kaliteli rafine cevhere eşdeğer tozlar sınıflandırılır ve büyük parçalar istenilen boyutlara getirilene kadar parçalama işlemine devam edilir [10]. Yöntem; düşük çalışma sıcaklığı, boyut kontrolü, oksitlenmeyi önleme ve yüksek saflığı sürdürme yeteneği gibi avantajlara sahiptir [11].



Şekil 2. Soğuk akış yönteminin aşamaları [10]

Dolaylı geri dönüşüm, ıslak-kimyasal işlem (wet-chemical treatment method) adı verilen Şekil 3.'te aşamaları gösterilen yöntemle gerçekleştirilmektedir. Atık sementit karbürler sodyum nitrat kimyasal bileşiğine daldırılır ve kimyasal reaksiyonla erimesi için fırına yerleştirilir. Erimiş karbürün iyon alışverişi ile tungsten trioksit olarak ta adlandırılan tungsten oksit tozu oluşumunu sağlayan bir geri dönüşüm süreci ortaya çıkar [12]. Bu yöntemle, yüksek saflığa sahip ürünler elde etmek mümkün olsa da, kullanılan kimyasal ve enerji miktarı oldukça fazladır [13].



Şekil 3. Islak-kimyasal işlem aşamaları [9]

3. SONUÇ

Geri dönüşüm, her zaman daha çevre dostu ve atık bertarafının çok daha ekonomik olduğu bir yöntemdir. Tungsten karbür gibi üretimi maliyetli malzemelerin geri dönüşümü de, hem üreticiye hem de tüketiciye ekonomik fayda sağlandığı için teşvik edilmelidir. Geri dönüştürülen yekpare karbürlerden yeni takımlar üretmek için gereken enerji, tamamen hammadde kullanılarak üretilenlere kıyasla yüzde 70 daha düşük olmaktadır. Ayrıca, üretimin geri dönüştürülen malzemelerden gerçekleştirilmesi, karbondioksit emisyonlarının yüzde 40 azalmasını sağlar [14]. Bu sürecin doğru uygulanabilmesinde devletlere olduğu kadar kesici takım üreticilerine de önemli görevler düşmektedir. Kesici takım üreticilerinin yürüttüğü karbür geri dönüşüm programları ile tüketicinin bilinçlendirilmesi ve kazanımlarının duyurulması geniş ölçüde sağlanmalıdır. Ülkemizde bazı firmalar atık tungsten kesici takımların toplanması ve satın alınması işlemlerini gerçekleştirilmekte fakat geri dönüşüm işlemleri yurtdışında yapılmaktadır. Milli değer olabilecek kazancın dış ülkelerin kazanımına dönüşmesi yerine, üniversitelerle-sanayicilerin ortak çalışmalar yaparak karbür geri dönüşüm süreçlerinin ülkemizde uygulanmasına katkıda bulunulması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Northrop I T., 1987. "The Joining of Tungsten Carbide Hardmetal to Steel", J. S. At., Inst. Min. Metall., Vol. 87(5), Pages 125-135.
- [2] General Carbide, 2008. "The Designer's Guide to Tungsten Carbide", http://www.generalcarbide.com/docs/designbook/The_Designers_Guide_to_Tungsten_Carbide_%28GeneralCarbide_Jan09%29.PDF , 26.05.2015
- [3] Çakır C., 2006. Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara
- [4] Öztürk, İ., Kor, M N., Tüylüoğlu, B S., Özabalı, A., ve Tezer, B H., 2007. "Türkiye'nin AB ile Uyumlu Bölgesel Katı Atık Yönetimi Ana Planı", AB Sürecinde Türkiye'de Katı Atık Yönetimi ve Çevre Sorunları Sempozyumu-TÜRKAY 2007, İstanbul.
- [5] Ege Üniversitesi, 2013. <http://euatik.ege.edu.tr/files/tehlikeliatıklarinyonetimi.pdf> "Entegre Atık Yönetimi" 08.07.2014
- [6] Doğru, B. 2012. "Türkiye'de Tehlikeli Atıkların Yönetimi ve Yasal Düzenlemeler", Tehlikeli Atıkların Yönetimi Eğitimi, İstanbul.
- [7] Tikomet Oy, "Recycling of Hardmetal", <http://www.tikomet.fi/en/recycling-hardmetal/> , 03.05.2015
- [8] International Tungsten Industry Association (ITIA), "Tungsten Processing" <http://www.itia.info/tungsten-processing.html> , 10.05.2015
- [9] Sumitomo Electric Industries Ltd., "Let's recycle!" <http://www.sumitool.com/en/csr/recycling-of-carbide-tools/recycling.html> , 27.05.2015

6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım 2015 Sabancı Üniversitesi, İstanbul

- [10] Smith, GR., 1942. “Materials Flow of Tungsten in the United States”, <http://pubs.usgs.gov/usbmic/ic-9388/9388.pdf>, 26.05.2015
- [11] Neikov O D., Naboychenko S S., Murashova I V., Gopienko V G., Frishberg I V, Lotsko D V., Handbook of Non-Ferrous Metal Powders: Technologies and Applications, ISBN: 978-1-85617-422-0, Elsevier Science,
- [12] Sumitomo Electric Industries Ltd., “Cemented Carbide Recycling System”, <http://global-sei.com/sn/2011/403/3a.html> , 20.05.2015
- [13] Ishida T., Itakura T., Moriguchi H., Ikegaya A. 2012. “Development of Technologies for Recycling Cemented Carbide Scrap and Reducing Tungsten Use in Cemented Carbide Tools”, “Sei Technical Review”, Vol. 75, Pages 38-45.
- [14] Sandvik Coromant , “Geri dönüşümün avantajları”, [http://www.sandvik.coromant.com /tr-tr/services/sustainability/stories/pages/making-money-on-used-carbide.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/services/sustainability/stories/pages/making-money-on-used-carbide.aspx) , 26.05.2015