



Szent István Egyetem

**GLOBALIS SUGÁRZÁS ÉS AZ IDŐJÁRÁS HATÁSA A TÖBBRÉTEGŰ
MEZŐGAZDASÁGI CSOMAGOLÓ FÓLIÁK MECHANIKAI
JELLEMZŐIRE**

Doktori (Ph.D.) értekezés

Csatár Attila

Gödöllő
2008.

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki Tudomány

vezetője: Dr. Szendrő Péter
egyetemi tanár, az MTA doktora
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Mechanikai és Géptani Intézet
Gödöllő

témavezető: Dr. Gelencsér Endre
egyetemi docens, Ph.D. műszaki tudomány
Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar
Mechanikai és Géptani Intézet
Gödöllő

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK	3
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS	5
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	9
2.1 A sugárzás hatása a környezetre	9
2.2 Mechanikai modellek a fóliák kezeléséhez	12
2.2.1 Egy-elemes modellek	12
2.2.2 Két-elemes modellek	13
2.2.3 Három-elemes modellek	13
2.2.4 Négy-elemes modellek	16
2.2.5 Tetszőleges számú elemet tartalmazó modellek	17
2.3 A Laplace-transzformáció alkalmazási lehetőségei	17
2.3.1 A reológiai modellek átviteli függvénye	19
2.3.2 A reológiai modellek osztályozása	20
2.3.3 Az átmeneti függvény	21
2.3.4 A Duhamel tétel	21
2.3.5 A súlyfüggvény	22
2.4 A Poynting-Thomson modell vizsgálata	22
2.4.1 Három-tengelyű állapot	22
2.4.2 Egy-tengelyű állapot	24
2.4.3 Az I. modellosztály elemzése	25
2.5 A hőmérséklet és az idő hatásának hasonlósági elve	32
2.6 A szakirodalom összefoglalása	36
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	39
3.1 A többrétegű fóliák szerkezeti felépítése	39
3.2 A többrétegű fóliák vizsgálati módszerei	41
3.3 UV-transzmissziós vizsgálatok módszere	43
3.4 Szilárdsági jellemzők mérése	45
3.5 A környezeti hatások vizsgálata	48
3.6 A reológiai mérések kiértékelésének módszere	49
3.6.1 A kúszásmérés kiértékelése	49
3.6.2 A relaxáció (ernyedés)-mérés kiértékelése	50
3.7 Az anyagjellemző paraméterek felhasználásának módszere	50
3.8 A hőmérséklet-idő hasonlósági elv általános görbéinek felépítése	53
4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS	55
4.1 A fóliák transzmissziós jellemzői	55
4.1.1 A transzmissziós spektrum változása az idő függvényében	57
4.1.2 A transzmissziós spektrum változása az anyag összetételének függvényében	62
4.1.3 A transzmisszió-spektrum változása a hullámhossz függvényében	66

4.1.4 A transzmissziós kutatások eredményei	70
4.2 A fóliák mechanikai jellemzőinek meghatározása.....	73
4.3 A fóliák reológiai jellemzőinek meghatározása.....	76
4.4 A fóliafeszültségek változásának meghatározása a hőmérséklet függvényében.....	90
4.5 A hőmérséklet-idő eltolási tényező állandóinak meghatározása	100
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	107
5.1 A kutatási tevékenység összefoglalása	107
5.2 Új tudományos eredmények.....	109
5.2.1 A fóliák transzmissziós tulajdonságainak elemzésénél	109
5.2.2 A fóliák reológiai tulajdonságait illetően.....	109
5.2.3 A fóliák feszültség változásának alakulása a hőmérséklet függvényében.....	110
5.2.4 A hőmérséklet-idő eltolási tényező meghatározása.....	110
5.3 A tudományos eredmények gyakorlati alkalmazhatósága	111
6. SUMMARY	113
6.1 Summary of research activities.....	113
6.2 New Scientific Results.....	115
6.2.1 In the analysis of transmission properties of foils.....	115
6.2.2 In the rheologic features of the foils	115
6.2.3 Change in foils' strength in function of the temperature	116
6.2.4 Determination of the temperature-time shifting coefficient	116
6.3 Practical applicability of the scientific results	117
7. MELLÉKLETEK.....	119
M1. Irodalomjegyzék	119
M2. Fóliák transzmissziós jellemzői.....	124
M3. Alakváltozási mező és feszültségeloszlás a fóliában.....	142
M4. A relaxációs mérések görbéi és statisztikai elemzésük	145
M5. SES fájl a COSMOS futtatásához	158
8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	161

ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK

Jel	Megnevezés
a_0	differenciálegyenlet állandója, [N/m ²]
a_1	differenciálegyenlet állandója, [Ns/m ²]
a_T	a hőmérséklet-idő eltolási tényező, [-]
\hat{a}, \hat{b}	becsült regressziós görbe együtthatói, [-]
b_1	differenciálegyenlet állandója, [s]
c_1, c_2	empirikus állandó, [-]
$\mathbf{D}(t)$	deformáció tenzor, [m/m]
$\dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}, \dots$	\mathbf{D} idő szerinti deriváltjai, [1/s, 1/s ² , ...]
E	rugalmassági modulus, [N/m ²]
E_0, E_1, E_2, \dots	reológiai modell rugalmas eleme, [N/m ²]
$\mathbf{E}(t)$	deformációs deviátor tenzor, [m/m]
$\dot{\mathbf{E}}$	deformációs deviátor tenzor idő szerinti első deriváltja, [1/s]
\mathbf{E}_0	deformációs gömbtenzor, [m/m]
$\dot{\mathbf{E}}_0$	deformációs gömbtenzor idő szerinti első deriváltja, [1/s]
$F(p)$	$f(t)$ függvény Laplace transzformáltja, [-]
$\mathbf{F}(t)$	feszültségtenzor, [N/m ²]
$\dot{\mathbf{F}}, \ddot{\mathbf{F}}, \dots$	\mathbf{F} idő szerinti deriváltjai, [N/m ² s, N/m ² s ² , ...]
G	csúszató rugalmassági modulus, [N/m ²]
$g(t)$	súlyfüggvény, [-]
H_0	nullhipotézis, [-]
h_0	kezdeti szélesség, [mm]
$h(\tau)$	hatás függvény, [-]
$h(t)$	átmeneti függvény, [-]
$I(t)$	érzékenység, [mm ² /N]
K	kompresszibilitási modulus, [N/m ²]
\mathcal{L}	Laplace-transzformáció jelölése, [-]
l_0	kezdeti hosszúság, [mm]
M	hiba, [-]
P	várható érték 95% vagy 99%-os valószínűséggel, [-]
$q(t, \tau)$	intenzitásfüggvény, [-]
r	korreláció, [-]
\hat{r}	korrelációs együttható becslése, [-]
S_e	szórásnégyzet, [-]
\hat{S}_a, \hat{S}_b	\hat{a} és \hat{b} szórásnégyzete, [-]
t_K	késleltetési idő, [s]

t_p^{n-2}	Student-féle t-eloszlás kritikus értéke, [-]
T	hőmérséklet, [°C]
$\mathbf{T}(t)$	feszültségdeviátor tenzor, [N/m ²]
$\dot{\mathbf{T}}$	feszültségdeviátor tenzor idő szerinti első deriváltja, [N/m ² s]
\mathbf{T}_0	feszültségi gömbtenzor, [N/m ²]
$\dot{\mathbf{T}}_0$	feszültségi gömbtenzor idő szerinti első deriváltja, [N/m ² s]
$Z(p)$	átviteli függvény, [N/m ²]
\hat{y}	becsült regressziós görbe, [-]
Δh	a keresztirányú méretváltozás, [mm]
Δl	hosszirányú méretváltozás, [mm]

Görög betűk

Jel	Megnevezés
δ	Dirac-delta, [1/s]
ε	hosszirányú fajlagos nyúlás, [m/m]
$\dot{\varepsilon}, \ddot{\varepsilon}$	hosszirányú fajlagos nyúlás idő szerinti deriváltja, [1/s, 1/s ²]
ε_ν	keresztirányú fajlagos nyúlás, $\varepsilon_\nu = -\nu\varepsilon$, [m/m]
η	kúszási tényező, [Ns/m ²]
$\eta_0, \eta_1, \eta_2, \dots$	reológiai modell viszkózus eleme, [N s/m ²]
\mathcal{G}	relaxációs tényező, [s]
μ	viszkózitási együttható, [Ns/m ²]
ν	Poisson tényező, [-]
ρ	anyagsűrűség, [kg/m ³]
σ	normálfeszültség, [N/m ²]
$\dot{\sigma}$	normálfeszültség idő szerinti deriváltja, [N/m ² s]
τ	relaxációs idő, [s]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Az állattartás és takarmányozás által megfogalmazott, a korszerűséget és a minőséget előtérbe helyező szakmai követelmények ma komoly megmérettetés elé állítják fejlesztési, illetve gyártási feladatokat ellátó vállalkozásokat. Takarmánynövényeink minőségi végtermékként történő felhasználásának problémaköre ugyan egyszerűnek tűnik, megoldása mégis igen sok nehézséget vet fel, mivel a takarmányozástani alapok, valamint a műszaki-technológiai eszközpark biztosításán túl, szemléletbeli váltásra is szükség van.

A gondolat aktualitását az a megállapítás alapozza meg, miszerint a tartósított szálas- és tömegtakarmányaink döntő hányada ma is legfeljebb közepes, de inkább gyenge minősítést kap akkor, amikor ezek egyben a kérődző állatállományunk legtermészetesebb élelemforrásai. Jelentőségüket mi sem támasztja alá jobban mint az, hogy az említett állatfajok energiaszükségletének kétharmadát és fehérjeszükségletének pedig háromnegyedét, ezekből a takarmánynövényekből kell előállítanunk. Felhasználásuknak az ad még kiemelt jelentőséget, hogy a nagy szárazságokban és az esős időszakok változatosságán túl, a téli hónapokban is garantált minőségű, és nagy mennyiségű takarmánybázis alapját kell, hogy képezzék. Kérődző állatállományunk a jó minőségű erjesztett takarmányokból naponta testtömegük mintegy 3%-át fogyasztja el. Ezt a mennyiséget egy nem olcsó szántóföldi termesztési és betakarítási technológia mellett ma is még, nagy veszteséghányadú silózási eljárásokkal állítjuk elő.

Célként ezért olyan tartósítási és tárolási technológiák kialakítását kellett megfogalmazni, melyek a lehető legtökéletesebb erjedési folyamatokat a lehető legkisebb veszteségek mellett, a műszaki, minőségi, állatjóléti és környezetvédelmi előírások kielégítésének figyelembevételével úgy valósítják meg, hogy azok egyben a mezőgazdaságban működő vállalatközi konstrukciók bármelyikéhez illeszthetők legyenek. Ma a mezőgazdasági vállalkozások alapvető érdeke, hogy olyan technológiákat alkalmazzanak, melyek lehetőséget teremtenek a gyorsan változó és gyakorta kiszámíthatatlan közgazdasági környezethez való jobb alkalmazkodásra. Nevezetesen a konzervatív és nagy átfutású eljárásainkat fel kell váltani korszerű és gyorsan megváltoztatható, kis veszteséggel jellemezhető, a környezetet minimális mértékben terhelő és takarékos szemléletű technológiákra.

Magas minőséget, minimális veszteségszintet, valamint rugalmasságot csak olyan takarmánytartósítási és tárolási technológia tud biztosítani, amely mérhető és ellenőrizhető, valamint az emberi szubjektivitástól mentes paramétereinek betartásán keresztül, garantálni tudja a piacképes végtermékek előállítását. Megoldást az európai, illetve tengeren túli viszonylatban is legkorszerűbbnek mondható azon tartósítási és tárolási technológia bevezetése hozta meg, mely függetlenül a silózott takarmánynövények fajtájától azzal, hogy azokat műanyag tömlőbe préselve erjeszti és tárolja, megoldotta a silózás legnagyobb problémáját, az anaerob viszonyok hosszú idejű biztosítását. A hagyományos silózási módszereket felváltó és műanyagtömlőre alapozott innovatív silófólia-töltési

eljárás megteremtette a legnagyobb állatlétszámú szarvasmarha- és sertéstartó üzemek számára az iparszerű és az EU-előírásoknak is tökéletesen megfelelő minőségű takarmányok biztonságos előállításának feltételeit.

Az új és univerzális technológia megvalósításához azonban a fent említetteken túl egyedi gépek, valamint kiegészítők, mint pl. a speciális összetételű és szerkezetű fóliatömlők is szükségesek. Velük egyedülállóan megoldható minden szálas- és tömegtakarmány, szemes termény, teljes növényi zúzalék, valamint egyéb mezőgazdasági melléktermék (pl. cukorrépaszelet, sörtörköly, csemegekukoricamaradványok, rostaaljak stb.) nedves, vagy szárított, szemes, aprított, roppantott, szecskázott, vagy bálázott formában történő tartósítása és tárolása. Az új módszer érdemi elterjedésének alátámasztására a következő adatok magukért beszélnek: a fóliatömlős tartósítási és tárolási technológiák igazi térhódítása a '90-es évek közepén kezdődött el és ma már elmondhatjuk, hogy több mint 120 gazdaságban találkozhatunk velük. A 2007-es évben legnagyobb mennyiségben, mintegy 85-90.000 t gyári cukorrépa-szelet, megközelítőleg 60-65.000 t lucernaszilázs és szenázs, valamint kb. 30-35.000 t nedves szemeskukorica-dara, silókukorica, csöveskukorica-zúzalék és teljes növényi zúzalékok, valamint mezőgazdasági melléktermékek betöltésére került sor. Figyelembe véve, hogy az általánosan használt Ø3 m x 60 m méretű tömlőbe 200-240 tonna takarmány tölthető be, a fenti adatok szerint a tavalyi évben megközelítőleg 850-900 db fóliatömlő került felhasználásra (lásd 1.1. ábra.).



1.1. ábra. Fóliatömlő alkalmazása a gyakorlatban.

A hazánkban már több mint 10 éves múltra visszatekintő fóliatömlős tartósítási és tárolási technológia csigás, valamint fésűs tömörítő rendszerrel szerelt vezérgépei műszaki, energetikai és munkaminőségi szempontból már tesztelésre kerültek. Az eddigi fejlesztő vizsgálatok viszont nem tértek ki a fólia, mint önálló anyag szilárdsági és reológiai tulajdonságainak feltérképezésére pedig, mint a tárolás

egyik legfontosabb eleme, alapvetően határozza meg a végtermék minőségét és az eljárás hatékonyságát.

Kutatásaim célját ezért a fóliatömlő, környezeti hatások függvényében kialakuló alapvető szilárdsági és reológiai jellemzőinek meghatározásaként jelöltem meg.

Célkitűzések:

- a) a fóliák mechanikai tulajdonságainak meghatározása (szakítószilárdság, folyáshatár, rugalmassági modulus, Poisson tényező, kúszási és relaxációs jellemzők),
- b) a fóliák öregedési folyamatát leíró tulajdonságok megállapítása,
- c) a fóliatömlőkben keletkező feszültségek változásának jellemzése a hőmérséklet függvényében,
- d) a környezetből érkező ultraviola sugárzás hatása a fóliatömlők öregedési folyamatára,
- e) a környezetből érkező ultraviola sugárzás hatása az UV transzmisszió (áteresztőképesség) alakulására, valamint
- f) a hőmérséklet és idő hasonlósági elvének alkalmazhatósága a fóliatömlőkre.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 A sugárzás hatása a környezetre

Johann Wilhelm Ritter német fizikus 1801-ben figyelte meg, hogy az ibolyán túli láthatatlan sugarak befeketítették az ezüst-kloriddal átitatott papírt. Megkülönböztetve a hősugaraktól "deoxidáló sugaraknak" nevezte el őket, kihangsúlyozva kémiai reakcióképességüket. Emiatt vált először "kémiai sugár" néven ismertté. Megnevezése ultraibolya, ritkábban ultraviola, néha ibolyántúli sugárzás, rövidített jelölése UV, a látható fénynél rövidebb, de a röntgensugárzásnál hosszabb hullámhosszú elektromágneses sugárzást takar. Hullámhossz-tartománya 200–400 nm, amely a látható- és a röntgensugárzás közé esik.

Szokásos felosztása:

- Közeli UV (400–200 nm, NUV),
 - UV-A (400–320 nm) hosszúhullámú, vagy "blacklight",
 - UV-B (320–280 nm) középhullámú,
 - UV-C (200–280 nm) rövidhullámú, vagy "germicid",
- távoli UV (200–10 nm FUV, vagy VUV),
- extrém UV (1–31 nm EUV, vagy XUV).

Hasonlóan, mint az emberre, a vizsgált műanyagokra is legnagyobb veszélyt az optikai sugárzás ultraibolya látható és közeli színek tartománya jelenti. Dolgozatomban ezért ennek a sugárzásnak a csomagolófóliák mechanikai tulajdonságaira vonatkozó hatását vizsgáltam.

Az elektromágneses színek 1 nm-től 1 mm-ig terjedő hullámhossztartományát optikai sugárzásnak nevezzük. Ezen belül a 195 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú sugárzást a levegő nagy intenzitással elnyeli, ezért ennek közvetlen élettani és mechanikai hatásával nem kell foglalkoznunk. A 195–295 nm-es hullámhossz-tartományban keletkező és már számottevő erősségű sugárzást pedig, azért nem vesszük figyelembe, mert ezt a Földünket takaró felső légrétegek ózonpajzsa közömbösíti. A hosszabb hullámhosszak felé haladva a levegő elnyelése több sávban ismét erősen megnő, illetve a Nap sugárzásának erőssége is érezhetően csökken, ezért ebből a tartományból érkező természetes sugárzásnak sincs káros élettani hatása.

A látható sugárzást fényként érzékeljük, melynek hullámhossz-tartománya 380–780 nm. Az ultraibolya színek tartományt három részre szokás bonthatjuk fel. A látható fényhez legközelebb a 320–400 nm-es UV-A tartomány esik. Bár a hagyományos felosztás [CIE 1987] nem tükrözi a különböző élettani hatások ma ismert határait, általános elterjedtsége miatt nemzetközileg ma is e felosztást használjuk. Ha ennél finomabb felosztásra van szükség, akkor az UV-A tartományt két részre, UV-A1 és UV-A2 résztartományra választhatjuk szét, melynek határvonalaként a 340 nm-es hullámhosszt állapították meg [CIE 1999].

A legfontosabb az UV-B sugárzás hatásával tisztában lenni, mivel ez okozza az élő és élettelen szervezetek káros átalakulását. A 280-320 nm-es UV-B hullámokat normális körülmények között elnyeli a Föld 18-25 km magasságban lévő ózonrétege, de ismeretes az is, hogy a légkör ózon tartalmának egy százalékos csökkenése az UV-B sugárzás két százalékos növekedéséhez vezethet. Az ózonpajzs éppen az ultraibolya sugárzás hatására, évmilliók alatt alakult ki a magas-légköri gázokból. Amikor a Nap élénkebb működése miatt megemelkedett az ultraibolya sugárzás erőssége, ezzel párhuzamosan megnőtt a sugárzást elnyelő ózonréteg vastagsága is, így a földi élőlények nem voltak kitéve az ártalmas sugárzás hatásainak. Ez a kényes egyensúly azonban az ember hathatós működésének köszönhetően mára már felborult.

A Naptól érkező 200-280 nm-es UV-C fényt teljesen elnyeli a föld légköre, ezért ezt csak az űrhajósok és űrhajózási eszközök védelmének tervezésekor kell figyelembe venni.

Az optikai sugárzás élettani hatásait vizsgálva a sugárzás aktinikus (az anyag kémiai és villamos tulajdonságait megváltoztató ibolyántúli sugárzás) hatásairól beszélünk, ezért a hullámhossz-határok rögzítésén kívül a második legfontosabb fogalom az aktinikus hatásspektrum. Ez a színekép ad felvilágosítást arról, hogy adott molekulatípusokra miként hat az optikai sugárzás. A hatást általában a hullámhossz, vagy a fotonenergia függvényében szokták ábrázolni úgy, hogy az ordinátán a hatás kiváltásához szükséges energiát, teljesítményt, vagy ezek reciprokát tüntetik fel. A relatív, vagy a logaritmikus ordináta-léptékben történő ábrázolást az magyarázza, hogy a számos aktinikus hatás hullámhossz-függése több nagyságrenden át változik, és ha a leginkább ártalmas sugarakat ki is szűrjük, a káros sugárzások maradékának hatása is jócskán veszélyes lehet. Az aktinikus hatásspektrumokat két csoportra, a biológiai és a biztonsági szempontok szerint megállapított hatásspektrumokra oszthatjuk fel. A különböző biztonsági előírásokban e színeképek szerepelnek [Schanda 2002].

Az elektromágneses színekép optikai tartományán belül a 195-400 nm-es tartományban a fotonok energiája elég nagy ahhoz, hogy a szerves molekulákban kémiai változást idézzon elő. Hosszabb hullámhosszak esetén a szervezetekben elsősorban a sugárzás hőhatása okozhat változást, mivel a szövetek az optikai sugárzással vagy hőhatás révén, vagy fotokémiai reakció formájában kerülnek kölcsönhatásba. A hőhatás szempontjából csak a szövetben elnyelt teljesítmény és a besugárzási idő veendő számításba, az elnyelt foton energiája közömbös. Lényeges viszont a szervezet hőelvezető-képessége, ezért az élő szervezeteknél a besugárzott terület nagysága és az adott sejtek spektrális abszorpciós tulajdonsága alapvetően meghatározó [Schanda 2002].

Fotokémiai reakcióról akkor beszélünk, ha az optikai sugárzás fotonjainak elég nagy az energiája ahhoz, hogy egyes molekulákban kémiai változást hozzon létre. A kémiai rendszerekben a hatást általában nem a sugárzás pillanatnyi erőssége szabja meg, hanem az elnyelt dózis nagysága, azaz a besugárzás ideje alatt elnyelt összenergia mennyisége. Az élő szervezetben a besugárzás erősségét csökkentve

eljutunk egy olyan értékhez, amely alatt a szervezet önhelyreállító képessége a létrehozott roncsoláshoz képest számottevő. Mindezek a hatások összetett szinképi eloszlást mutatnak. A hatás függ a besugárzott felület nagyságától, a besugárzás irányától és időtartamától. Ezért a biztonságtechnikai hatásfüggvények az egyes esetekre számított legnagyobb veszélyt figyelembe vevő burkológörbék, és nem követik a tényleges fotokémiai reakciókat előidéző molekuláris jelenségek elnyelési szinképiét.

A Nap ultraibolya sugárzásának káros hatásairól az ICNIRP [Bernhardt 1998] által a nemzetközi meteorológiai (World Meteorological Organisation, WMO) és egészségügyi (World Health Organisation, WHO) szervezetekkel közösen készített, UV-index ajánlása ad felvilágosítást. E skála alapján egyértelműen lehet előre jelezni, hogy az ultraibolya sugárzás egy bizonyos helyen és egy adott időpontban, milyen veszélyességi fokozatú lesz [CIE 2000].

2.2 Mechanikai modellek a fóliák kezeléséhez

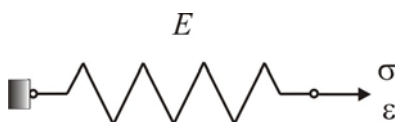
A reológia a deformációk és a deformáció-sebességek, valamint az őket előidéző erők, vagy terhelések, különböző külső körülmények (nyomás, hőmérséklet) közötti törvényszerűségekkel foglalkozik.

A reológiai modellek mechanikai viselkedésének szemléltetésére és a differenciálegyenlet felírását megkönnyítendő, a rugókból és csillapításokból összeállított mechanikai rendszerek alkalmazása terjedt el.

2.2.1 Egy-elemes modellek

Hooke-test

Lineárisan és tökéletesen rugalmas test. Modellje a lineáris rugó (2.1. ábra.):

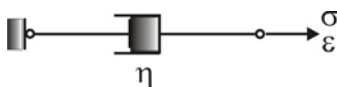


2.1. ábra. A Hooke-test mechanikai modellje.

$$\sigma = E\varepsilon, \text{ illetve } \sigma = a_0\varepsilon$$

Newton-test

Lineárisan viszkózus anyagmodell. Modellje a sebességgel arányos csillapítású dugattyú (2.2. ábra.):

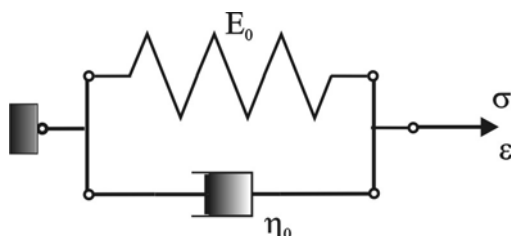


2.2. ábra. A Newton-test mechanikai modellje.

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}, \text{ illetve } \sigma = a_1 \dot{\varepsilon}$$

2.2.2 Két-elemes modellek

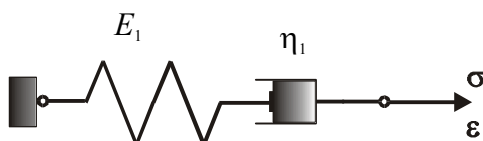
Kelvin-test (2.3. ábra.)



2.3. ábra. A Kelvin-test mechanikai modellje.

$$\sigma = E_0 \cdot \varepsilon + \eta_0 \cdot \dot{\varepsilon}, \text{ illetve } \sigma = a_0 \varepsilon + a_1 \dot{\varepsilon}$$

Maxwell-test (2.4. ábra.)



2.4. ábra. A Maxwell-test mechanikai modellje.

$$\varepsilon = \frac{1}{E_1} \cdot \sigma + \frac{1}{\eta_1} \cdot \int_0^t \sigma(\tau) d\tau$$

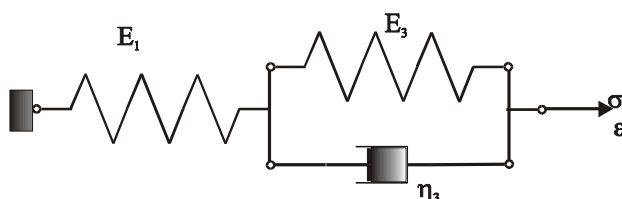
az egyenletet deriválva és rendezve:

$$\sigma = \eta_1 \cdot \dot{\varepsilon} - \frac{\eta_1}{E_1} \dot{\sigma}, \text{ illetve } \sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_1 \dot{\varepsilon}$$

2.2.3 Három-elemes modellek

A Poynting-Thomson test modelljei

„Kúszási” modell (2.5. ábra.)



2.5. ábra. A Poynting-Thomson test kúszási modellje.

$$\sigma + \frac{\eta_3}{E_1 + E_3} \dot{\sigma} = \frac{E_1 \cdot E_3}{E_1 + E_3} \varepsilon + \frac{E_1 \cdot \eta_3}{E_1 + E_3} \dot{\varepsilon},$$

illetve:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_0 \varepsilon + a_1 \dot{\varepsilon}$$

ugyanis

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_3, \quad \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_3$$

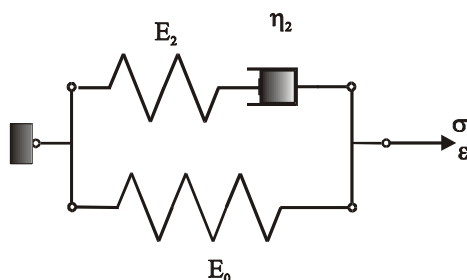
és

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1, \quad \sigma_3 = E_3 \cdot \varepsilon_3 + \eta_3 \cdot \dot{\varepsilon}_3$$

A differenciálegyenlet állandói és a modellállandók között a kapcsolat:

$$b_1 = g = \frac{\eta_3}{E_1 + E_3} \quad a_0 = E = \frac{E_1 \cdot E_3}{E_1 + E_3} \quad a_1 = \eta = \frac{E_1 \cdot \eta_3}{E_1 + E_3}$$

„Relaxációs” modell (2.6. ábra.)



2.6. ábra. A Poynting-Thomson test relaxációs modellje.

$$\sigma + \frac{\eta_2}{E_2} \cdot \dot{\sigma} = E_0 \cdot \varepsilon + \eta_2 \left(1 + \frac{E_0}{E_2}\right) \dot{\varepsilon},$$

illetve:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_0 \varepsilon + a_1 \dot{\varepsilon}$$

ugyanis:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_2 \quad \varepsilon = \varepsilon_0 = \varepsilon_2 \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_{2E} + \varepsilon_{2\eta}$$

és

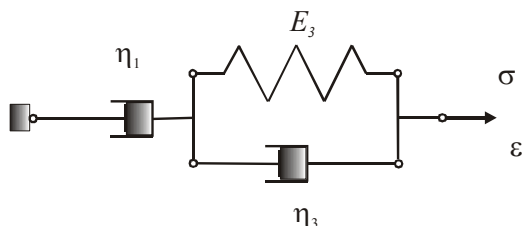
$$\sigma_0 = E_0 \cdot \varepsilon_0 \quad \sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_{2E} \quad \sigma_2 = \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon}_{2\eta}$$

A differenciálegyenlet állandói és a modellállandók között a kapcsolat:

$$b_1 = g = \frac{\eta_2}{E_2}, \quad a_0 = E = E_0, \quad a_1 = \eta = \eta_2 \left(1 + \frac{E_0}{E_2}\right)$$

Jeffrey-test modellek

„Kúszási” modell (2.7. ábra.)



2.7. ábra. A Jeffrey-test kúszási modellje.

$$\sigma + \frac{\eta_1 + \eta_3}{E_3} \dot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_3}{E_3} \ddot{\varepsilon},$$

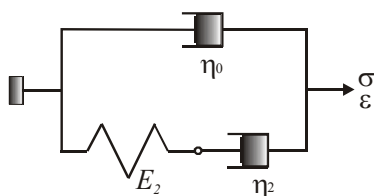
illetve:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_1 \dot{\varepsilon} + a_2 \ddot{\varepsilon}$$

A differenciálegyenlet állandói és a modellállandók között a kapcsolat:

$$b_1 = \frac{\eta_1 + \eta_3}{E_3}, \quad a_1 = \eta_1, \quad a_2 = \frac{\eta_1 \eta_3}{E_3}.$$

„Relaxációs” modell (2.8. ábra.)



2.8. ábra. A Jeffrey-test relaxációs modellje.

$$\sigma + \frac{\eta_2}{E_2} \dot{\sigma} = (\eta_0 + \eta_2) \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_0 \eta_2}{E_2} \ddot{\varepsilon},$$

illetve:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_1 \dot{\varepsilon} + a_2 \ddot{\varepsilon}$$

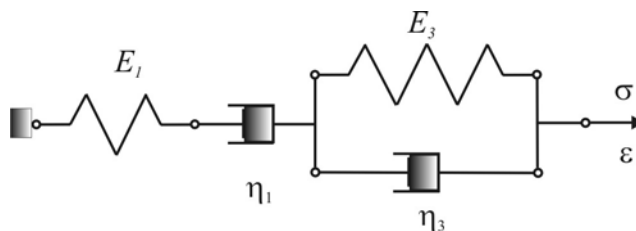
A differenciálegyenlet állandói és a modellállandók között a kapcsolat:

$$b_1 = \frac{\eta_2}{E_2} \quad a_1 = \eta_0 + \eta_2 \quad a_2 = \frac{\eta_0 \eta_2}{E_2}$$

2.2.4 Négy-elemes modellek

Burger-test

„Kúszási” modell (2.9. ábra.)



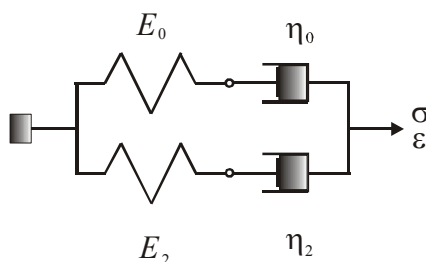
2.9. ábra. A Burger-test kúszási modellje.

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1 + \eta_3}{E_3} + \frac{\eta_1}{E_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_3}{E_1 E_3} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_1 \eta_3}{E_3} \ddot{\varepsilon}$$

illetve:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} + b_2 \ddot{\sigma} = a_1 \dot{\varepsilon} + a_2 \ddot{\varepsilon}$$

„Relaxációs” modell (2.10. ábra.)



2.10. ábra. A Burger-test relaxációs modellje.

$$\sigma + \left(\frac{\eta_2}{E_2} + \frac{\eta_0}{E_0} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_0 \eta_2}{E_0 E_2} \ddot{\sigma} = (\eta_0 + \eta_2) \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_0 \eta_2}{E_0 E_2} (E_0 + E_2) \ddot{\varepsilon},$$

illetve:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} + b_2 \ddot{\sigma} = a_1 \dot{\varepsilon} + a_2 \ddot{\varepsilon}$$

2.2.5 Tetszőleges számú elemet tartalmazó modellek

Tetszőleges számú elemet tartalmazó lineáris viszkoelasztikus reológiai modell általánosított anyagegyenlete:

$$\sigma + \sum_{k=1}^n b_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = a_0 \varepsilon + \sum_{k=1}^m a_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k}. \quad (2.1)$$

ahol: $a_0, a_k, b_k = \begin{cases} \text{pozitív véges valós} \\ 0 \end{cases}$ és $m = \begin{cases} n \\ n+1 \end{cases}$

A (2.1) típusú differenciálegyenletek megoldásának praktikus eszköze a Laplace-transzformáció.

2.3 A Laplace-transzformáció alkalmazási lehetőségei

Valamely $f(t)$ valós változójú függvényhez a Laplace-transzformáció az

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt \quad (2.2)$$

utasítással egy $F(p)$ függvényt rendel, ahol p komplex szám:

$$p = a + j b, \quad (2.3)$$

amely $b=0$ esetén valós. A (2.2) eljárást röviden a:

$$F(p) = \mathcal{L}f(t) \quad (2.4)$$

kifejezéssel szokták jelölni. A transzformáció feltétele, hogy az integrál konvergencia legyen. A konvergencia-kritériumokat a témával foglalkozó irodalmak ismertetik. Gyakorlatban az adott $f(t)$ függvényt a (2.2) összefüggés szerint igen ritkán szokták transzformálni, ugyanis a fontosabb függvények transzformáltja táblázatokban megtalálható [Fodor 1966].

A fontosabb tulajdonságokat és néhány gyakrabban előforduló transzformációs párt a 2.1. táblázat tartalmazza.

2.1. táblázat. Néhány függvény Laplace-transzformáltja [Gräff 2006].

Sor-szám	(t) függvény	(p) függvény	Megjegyzés
1.	$\mathcal{L}[\sum_{i=1}^n c_i f_i(t)]$	$\sum_{i=1}^n c_i F_i(p)$	Összeg és aránytartó
2.	$\mathcal{L}[\int_0^t f(\tau) d\tau]$	$\frac{1}{p} F(p)$	Az időszerinti integrál transzformáltja
3.	$\mathcal{L}[f'(t)]$	$p F(p) - f(0)$	A derivált transzformáltja
4.	$\mathcal{L}[H(1)]$	$\frac{1}{p}$	Az egységugrás függvény transzformáltja*
5.	$\mathcal{L}[\delta(t)]$	1	Dirac delta transzformáltja**
6.	Ha $\mathcal{L}f_1(t) = F_1(p)$; $\mathcal{L}f_2(t) = F_2(p)$ $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F_1(p) \cdot F_2(p)] = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau$		konvolúciótétel ***
7.	$\mathcal{L}[t]$	$\frac{1}{p^2}$	$f(t) = t$
8.	$\mathcal{L}[t^n]$	$\frac{(n+1)!}{p^{n+1}}$	
9.	$\mathcal{L}[e^{-\alpha t}]$	$\frac{1}{p+\alpha}$	
10.	$\mathcal{L}[e^{j\omega t}]$	$\frac{1}{p-j\omega}$	
11.	$\mathcal{L}[\sin \omega t]$	$\frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$	
12.	$\mathcal{L}[\cos \omega t]$	$\frac{p}{p^2 + \omega^2}$	

* $H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$ a függvény értéke 0, ha argumentuma negatív, és egységnyi, ha argumentuma pozitív.

** $\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases}$ a függvény egy igen rövid, és igen nagy amplitúdójú, egységnyi erősségű impulzus.

Továbbá:

$$\int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} = H(t),$$

illetve:

$$\delta(t) = H'(t).$$

*** két függvény Laplace-transzformáltjának szorzata egyenlő a táblázatbeli kifejezéssel. Továbbá felírható, hogy:

$$\mathcal{L} \left[\frac{d}{dt} \int_0^t f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau \right] = p F_1(p) F_2(p).$$

Az $F(p)$ függvényből az $f(t)$ függvény az $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(p)]$ jelölésű összefüggés az inverz Laplace-transzformációval állítható elő. Az általános megoldás helyett most is a táblázatokban található függvénypárokat szokás használni.

2.3.1 A reológiai modellek átviteli függvénye

Alkalmazzuk a Laplace-transzformációt a (2.1) egyenletre a 2.1. táblázat 1. és 3. sorának felhasználásával:

$$\sigma(p) + \sum_{k=1}^n b_k p^k \sigma(p) = a_0 \varepsilon(p) + \sum_{k=1}^m a_k p^k \varepsilon(p).$$

Az egyenletet rendezve:

$$\sigma(p) = \frac{a_0 + \sum_{k=1}^m a_k p^k}{1 + \sum_{k=1}^n b_k p^k} \varepsilon(p) = Z(p) \varepsilon(p), \quad (2.5)$$

illetve:

$$\varepsilon(p) = \frac{1}{Z(p)} \sigma(p) \quad (2.6)$$

összefüggést kapjuk.

A (2.1) m -ed fokú differenciálegyenletnek a (2.5) algebrai egyenlet felel meg. A $Z(p)$ függvényt a szakirodalom átviteli függvénynek nevezi. Az együtthatók a modell jellemzői, így az átviteli függvény rendszerjellemező.

Az átviteli függvény számlálója és nevezője gyöktényezős alakban:

$$Z(p) = \frac{a_m(p-c_1)(p-c_2)\dots(p-c_m)}{b_n(p-d_1)(p-d_2)\dots(p-d_n)}. \quad (2.7)$$

A d_i a nevező gyökhelyeit, illetve a $Z(p)$ függvény pólushelyeit jelöli. A $p = d_i$ helyen $Z(p) \rightarrow \infty$. A c_i a számláló gyökhelyeit jelenti. A $p = c_i$ helyen $Z(p) = 0$.

2.3.2 A reológiai modellek osztályozása

A lineáris viszkoelasztikus modelleket az átviteli függvény $p = 0$ és ∞ helyen felvett értékei alapján négy osztályba sorolhatjuk [Müller 1988]:

2.2. táblázat. Lineáris viszkoelasztikus modellek osztályozása.

Osztály	$Z(p)$		a_0 m	Modell
	$p = 0$	$p = \infty$		
I	véges	véges	$a_0 \neq 0$ $m = n$	Hooke, Poynting-Thomson
II	véges	∞	$a_0 \neq 0$ $m = n + 1$	Kelvin
III	0	∞	$a_0 = 0$ $m = n + 1$	Newton, Jeffrey
IV	0	véges	$a_0 = 0$ $m = n$	Maxwell, Burger

A $Z(p)$, vagy a $Z(p)^{-1}$ függvények rész törtre bontásával (kifejtési tétel) minden modellosztályban a Hooke és Newton testek összekapcsolásával kétféle, párhuzamos (relaxációs) és soros (kúszási) modellrendszert írhatunk fel.

A lineáris viszkoelasztikus modellekkel végzett szilárdsági számításoknál szükséges tudni az ismert $\sigma(t)$ feszültségfüggvényre („gerjesztésre”) adott $\varepsilon(t)$ válaszfüggvényt, illetve az ismert $\varepsilon(t)$ nyúlásfüggvényre („gerjesztésre”) adott $\sigma(t)$ válaszfüggvényt. Ezeket a függvényeket a:

$$\varepsilon(t) = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{Z(p)}\sigma(p)\right], \quad (2.8)$$

vagy a:

$$\sigma(t) = \mathcal{L}^{-1}[Z(p)\varepsilon(p)] \quad (2.9)$$

összefüggésből kapjuk.

2.3.3 Az átmeneti függvény

Tételezzük fel, hogy ismerjük a válaszfüggvényeket, ha a gerjesztéseket egységugrás függvények írják le.

Ha a gerjesztés: $\sigma(t) = H(t)$, a válasz: $\varepsilon(t) = h_k(t)$ és

ha a gerjesztés: $\varepsilon(t) = H(t)$, a válasz: $\sigma(t) = h_r(t)$

A $h(t)$ függvényt az adott rendszer átmeneti függvényének nevezzük. Az indexben szereplő betűk a kúszásra vagy a relaxációra utaló jelzések.

Ha $\sigma(t) = H(t)$, akkor $\sigma(p) = \frac{1}{p}$ (lásd 2.1. táblázat 4. sor). Ekkor $\varepsilon(p) = h_k(p)$.

Ezeket a (2.6)-ba helyettesítve:

$$h_k(p) = \frac{1}{Z(p)} \frac{1}{p} \text{ vagy } h_k(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{Z(p)} \frac{1}{p} \right] \quad (2.10)$$

Hasonló módon (2.5)-be helyettesítés után:

$$h_r(p) = Z(p) \frac{1}{p} \text{ vagy } h_r(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{Z(p)}{p} \right] \quad (2.11)$$

2.3.4 A Duhamel tétel

Tetszőleges $\sigma(t)$ gerjesztés esetén, a $\sigma(p) = \mathcal{L}[\sigma(t)]$ -t (2.8) összefüggésbe behelyettesítve és (2.11)-et felhasználva írhatjuk, hogy:

$$\varepsilon(t) = \mathcal{L}^{-1} [p h_k(p) \sigma(p)]. \quad (2.12)$$

A konvolúció-tétel felhasználásával (2.1. táblázat ***) viszont:

$$\varepsilon(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t \sigma(\tau) h_k(t - \tau) d\tau$$

A t szerinti differenciálásnál figyelembe kell venni, hogy a t egyrészt az integrál felső határa, másrészt az integrálon belüli paraméter. Ezért a differenciálhányados két részből áll, a felső határ szerinti és a paraméter szerinti tagokból:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) h_k(0) + \int_0^t \sigma(\tau) \frac{d}{dt} h_k(t - \tau) d\tau$$

$$A \quad \frac{d}{dt} h_k(t - \tau) = g_k(t - \tau)$$

jelölést bevezetve kapjuk, hogy:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) h_k(0) + \int_0^t \sigma(\tau) g_k(t - \tau) d\tau \quad (2.13)$$

Hasonló módon nyerjük az $\varepsilon(t)$ gerjesztésre adott $\sigma(t)$ válaszfüggvényt:

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) h_r(0) + \int_0^t \varepsilon(\tau) g_r(t - \tau) d\tau \quad (2.14)$$

A (2.13) és (2.14) összefüggéseket a szakirodalom Duhamel-egyenleteknek nevezi.

2.3.5 A súlyfüggvény

A $g_k(t)$ és $g_r(t)$ függvények a rendszerre ható egységimpulzusra (*Dirac-delta*) adott válaszok. A szakirodalom súlyfüggvénynek nevezi őket.

Az átmeneti függvényeket a (2.11) egyenletekből határozhatjuk meg, ezek deriváltjai a súlyfüggvények (a 2.1. táblázat ** -ből eredően), tehát:

$$g_k = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{z(p)} \right] \text{ és } g_r = \mathcal{L}^{-1} [Z(p)] \quad (2.15)$$

A (2.13) és (2.14) egyenleteknek elsősorban az értelmezésben van fontos szerepe. A válaszfüggvényeket általában sokkal egyszerűbb a kifejtési tétel alkalmazásával és a transzformációs táblázat (2.1. táblázat) segítségével felírni.

2.4 A Poynting-Thomson modell vizsgálata

2.4.1 Három-tengelyű állapot

A műanyagok alakváltozása és feszültségváltozása terhelés hatására az idő függvényében késleltetve következik be. Ezen tulajdonságok leírására a viszko-elasztikus anyagmodellek alkalmasak. Az anyagmodellek a mechanikai feszültség és a fajlagos nyúlás közötti kapcsolatot írják le [Prager 1955].

$$f(\mathbf{F}, \dot{\mathbf{F}}, \ddot{\mathbf{F}}, \dots, \mathbf{D}, \dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}, \dots) = \mathbf{0},$$

ahol: $\mathbf{F}(t)$ a feszültségtenzor, $[\text{N}/\text{m}^2]$

$\dot{\mathbf{F}}, \ddot{\mathbf{F}}$ az \mathbf{F} idő szerinti deriváltjai, $[\text{N}/\text{m}^2\text{s}, \text{N}/\text{m}^2\text{s}^2, \dots]$

$\mathbf{D}(t)$ a deformáció tenzor, [m/m]

$\dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}$ a \mathbf{D} idő szerinti deriváltjai. [1/s, 1/s², ...]

Poynting-Thomson modell

A mechanikai vizsgálatoknál leggyakrabban lineáris anyagmodelleket alkalmazunk. A kúszási (creep) és ernyedési (relaxation) folyamatokat követni képes legegyszerűbb lineáris anyagmodell (Poynting-Thomson 1934) differenciál-egyenlete, az:

$$\mathbf{F} = \mathbf{T} + \mathbf{T}_0 \quad \text{és} \quad \mathbf{D} = \mathbf{E} + \mathbf{E}_0$$

felbontásokat felhasználva, a:

$$\mathbf{T} = 2G\mathbf{E} + 2\mu\dot{\mathbf{E}} - \tau\dot{\mathbf{T}} \quad \text{alakú,} \quad (2.16)$$

ahol: $\mathbf{T}(t)$ feszültségdeviátor tenzor, [N/m²]

$\mathbf{E}(t)$ deformációs deviátor tenzor, [m/m]

$\dot{\mathbf{T}}$ és $\dot{\mathbf{E}}$ a fentiek idő szerinti első deriváltjai, [N/m²s] illetve [1/s]

G csúsztató rugalmassági modulus, [N/m²]

μ viszkozitási együttható, [Ns/m²]

τ relaxációs idő, [s]

továbbá:

$$\mathbf{T}_0 = 3K\mathbf{E}_0 \quad \text{és} \quad \dot{\mathbf{T}}_0 = 3K\dot{\mathbf{E}}_0. \quad (2.17)$$

Itt: \mathbf{T}_0 feszültségi gömbtenzor, [N/m²]

\mathbf{E}_0 deformációs gömbtenzor, [m/m]

$\dot{\mathbf{T}}_0$ és $\dot{\mathbf{E}}_0$ a fentiek idő szerinti deriváltjai, [N/m²s], illetve [1/s]

K kompresszibilitási modulus. [N/m²]

Az (2.16) és (2.17) tartalmazza a lineárisan rugalmas *Hooke* test anyagegyenletét:

$$\mathbf{F} = 2G\mathbf{E} + 3K\mathbf{E}_0$$

és a lineárisan viszkózus Newton test anyagegyenletét:

$$\mathbf{T} = 2\mu\dot{\mathbf{E}}.$$

2.4.2 Egy-tengelyű állapot

Poynting-Thomson modell

A szakítógéppel megvalósítható egytengelyű állapotban a feszültség- és deformációs tenzorok:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\nu & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\nu \end{bmatrix}.$$

A deviátoros összetevők:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sigma - \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma_0 \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon - \varepsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_\nu - \varepsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_\nu - \varepsilon_0 \end{bmatrix}.$$

A gömbi összetevők:

$$\mathbf{T}_0 = \begin{bmatrix} \sigma_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_0 \end{bmatrix},$$

illetve:
$$\sigma_0 = \frac{1}{3}\sigma, \quad \text{és} \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\varepsilon + 2\varepsilon_\nu), \quad (2.18)$$

valamint:
$$\dot{\sigma}_0 = \frac{1}{3}\dot{\sigma} \quad \text{és} \quad \dot{\varepsilon}_0 = \frac{1}{3}(\dot{\varepsilon} + 2\dot{\varepsilon}_\nu),$$

ahol: σ normálfeszültség, [N/m²]
 ε hosszirányú fajlagos nyúlás, [m/m]
 ε_ν keresztirányú fajlagos nyúlás, $\varepsilon_\nu = -\nu\varepsilon$, [m/m]
 ν Poisson tényező. [-]

Egytengelyű állapotban a (2.16) és (2.17) egyenletek az alábbi alakot veszik fel:

$$\sigma - \sigma_0 = 2G(\varepsilon - \varepsilon_0) + 2\mu(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_0) - \tau(\dot{\sigma} - \dot{\sigma}_0), \quad (2.19.a)$$

$$\sigma_0 = 3K\varepsilon_0 \quad \text{és} \quad \dot{\sigma}_0 = 3K\dot{\varepsilon}_0, \quad (2.19.b)$$

A (2.19.a és 2.19.b) egyenletek egyesítése, valamint (2.18) felhasználása után:

$$\sigma = \frac{9GK}{3K+G} \varepsilon + \frac{9\mu K}{3K+G} \dot{\varepsilon} - \frac{3K\tau + \mu}{3K+G} \dot{\sigma}$$

összefüggést kapjuk. Az alábbi jelölések bevezetésével [Richter 1974]:

$$E = \frac{9GK}{3K+G}, \quad \eta = \frac{9\mu K}{3K+G}, \quad \vartheta = \frac{3K\tau + \mu}{3K+G}, \quad (2.20)$$

az anyagegyenlet egytengelyű állapotban [Huszár 1975]:

$$\sigma + \vartheta \dot{\sigma} = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}. \quad (2.21)$$

Az (2.21) egyenletben szereplő E, η, ϑ (rugalmassági, viszkozitási és relaxációs) mennyiségek, az anyag mechanikai viselkedését jellemző paraméterek (állandók). Az általánosíthatóság miatt célszerű az alábbi jelöléseket bevezetni:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_0 \varepsilon + a_1 \dot{\varepsilon} \quad (2.22)$$

2.4.3 Az I. modellosztály elemzése

A 2.5. és 2.6. ábra segítségével a modell mechanikai viselkedése minőségileg megbecsülhető:

- a) Nagyon lassú terhelésvétel során a dugattyúval modellezett tagban nem keletkezik feszültség, így :

$$\sigma = \frac{E_1 E_3}{E_1 + E_3} \varepsilon \quad (\text{lásd 2.11. ábra}),$$

illetve: $\sigma = E_0 \varepsilon$ (lásd 2.12. ábra)

A függvényeket a 2.11. ábrán az OP_1 egyenes szemlélteti.

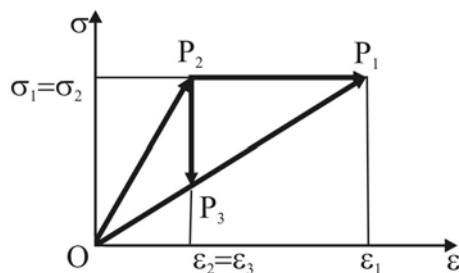
- b) Nagyon gyors terhelésvétel során a dugattyú merev testként viselkedik, tehát:

$$\sigma = E_1 \varepsilon \quad (\text{lásd 2.11. ábra}),$$

illetve: $\sigma = (E_0 + E_2) \varepsilon$ (lásd 2.12. ábra)

Most az anyag viselkedését jellemző görbe a 2.11. ábrán az OP_2 egyenes.

- c) Ha a gyors terhelésvitel után a feszültséget állandó értéken tartjuk, akkor a 2.5. ábrán az E_3 jelű rugó a dugattyút elmozdítja, a rugó hossza nő, vagyis $\varepsilon = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3}\right)\sigma$ lesz. A 2.6. ábrán pedig azt figyelhetjük meg, hogy az E_2 jelű rugó elmozdítja a dugattyút, ezáltal a feszültség ebben az ágba csökken, az egyensúly fenntartása miatt így az E_0 rugónak az $\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0}$ érték eléréséig növekszik a nyúlása. A leírt jelenséget kúszásnak nevezzük (2.11. ábra P_2P_1 egyenes).
- d) Ha gyors terhelésvitel után a további mozgást akadályozzuk meg, akkor a dugattyú elmozdulása a feszültség csökkenését eredményezi. Ilyenkor beszélünk ernyedésről, vagy relaxációról (2.11. ábra P_2P_3 egyenes)



2.11. ábra. A Poynting-Thomson modell viselkedése különböző terhelések felvitelekor.

A kúszás és az ernyedés hosszú idő alatt lejátszódó folyamatok. A megfelelő időfüggvényeket a 2.5. és 2.6. ábráknál felírt differenciálegyenletekből határozzuk meg.

Kúszási görbe

A kúszási görbe egyenletének meghatározásához induljunk ki a 2.5. ábra alatti alábbi differenciálegyenletből:

$$\sigma + \frac{\eta_3}{E_1 + E_3} \dot{\sigma} = \frac{E_1 \cdot E_3}{E_1 + E_3} \varepsilon + \frac{E_1 \cdot \eta_3}{E_1 + E_3} \dot{\varepsilon},$$

amelyre alkalmazva a Laplace-transzformációt:

$$\sigma(p) + \frac{\eta_3}{E_1 + E_3} p \sigma(p) = \frac{E_1 E_3}{E_1 + E_3} \varepsilon(p) + \frac{E_1 \eta_3}{E_1 + E_3} p \varepsilon(p).$$

Rendezve az összefüggést:

$$\frac{\varepsilon(p)}{\sigma(p)} = \frac{1}{Z(p)} = \frac{E_1 + E_3 + \eta_3 p}{E_1 E_3 + E_1 \eta_3 p}.$$

Algebrai átalakítások után a P-T kúszási modell $\frac{1}{Z(p)}$ függvénye:

$$\frac{1}{Z(p)} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3 + \eta_3 p}. \quad (2.23)$$

Érdemes megfigyelni, hogy a rugókból és csillapításokból összeállított rendszereknél a párhuzamosan kapcsolt elemek közös $Z(p)$ függvénye egyenlő az alkotóelemek $Z(p)$ függvényeinek összegével, sorba kapcsolásnál pedig, a közös $\frac{1}{Z(p)}$ függvény egyenlő az alkotók $\frac{1}{Z(p)}$ függvényeinek összegével. Az alábbiakban példákon keresztül mutatom be a $Z(p)$ függvények közvetlen előállítását.

A Hooke-testnél: $Z(p)_H = E$ (2.24)

A Newton-testnél: $Z(p)_N = \eta p$ (2.25)

A Kelvin-testnél: $Z(p)_K = Z(p)_H + Z(p)_N = E_0 + \eta_0 p$ (2.26)

A Maxwell-testnél: $\frac{1}{Z(p)_M} = \frac{1}{Z(p)_H} + \frac{1}{Z(p)_N} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1 p}$ (2.27)

A P-T test kúszási modelljénél:

$$\frac{1}{Z(p)_{(P-T)k}} = \frac{1}{Z(p)_H} + \frac{1}{Z(p)_K} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3 + \eta_3 p} \quad (2.28)$$

A P-T test relaxációs modelljénél:

$$Z(p)_{(P-T)r} = Z(p)_H + Z(p)_M = E_0 + \frac{E_2 \eta_2 p}{E_2 + \eta_2 p} \quad (2.29)$$

Mint látható (2.28) megegyezik (2.23)-al. Az eljárás természetesen bármelyik, további lineáris anyagmodellnél alkalmazható. Visszatérve a kúszás jelenségéhez a feladatot úgy fogalmazhatjuk meg, hogy keressük a:

$$\sigma(t) = \sigma_a H(t), \mathcal{L}[\sigma(t)] = \sigma(p) = \sigma_a \frac{1}{p} \quad (2.30)$$

gerjesztésre adott válaszfüggvényt. Vagyis (2.15) és (2.28) felhasználásával:

$$\frac{1}{E_1 p} + \frac{1}{(E_3 + \eta_3 p)p} = \frac{1}{E_1} \frac{1}{p} + \frac{C_1}{E_3 + \eta_3 p} + \frac{C_2}{p} \quad (2.31)$$

Az első tagok elhagyása után szorozzuk meg az egyenletet rendre a nevezőkkel és helyettesítsük be p gyökértékeit:

$$\frac{1}{(E_3 + \eta_3 p)} = + \frac{C_1 p}{E_3 + \eta_3 p} + C_2 \text{ és } p = 0, \quad (2.31)$$

akkor:

$$C_2 = \frac{1}{E_3}.$$

Továbbá:

$$\frac{1}{p} = C_1 + \frac{C_2(E_3 + \eta_3 p)}{p} \text{ és } p = -\frac{E_3}{\eta_3},$$

akkor

$$C_1 = -\frac{\eta_3}{E_3}.$$

Vagyis (2.31) az alábbi formában írható fel:

$$\varepsilon(t) = \sigma_a \mathcal{L}^{-1} \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) \frac{1}{p} - \frac{1}{E_3} \frac{1}{\frac{E_3}{\eta_3} + p} \right] \quad (2.32)$$

A visszatranszformáláshoz felhasználva a 2.1. táblázat 4. és 9. sorát:

$$\varepsilon(t) = \sigma_a \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) H(t) - \frac{1}{E_3} e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t} \right]$$

Mivel $t > 0$, $H(t) = 1$.

Ezzel a válaszfüggvény, vagyis a kúszási görbe egyenlete:

$$\varepsilon(t) = \sigma_a \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) - \frac{1}{E_3} e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t} \right] \quad (2.33)$$

Ábrázoljuk a $\sigma = \sigma(t)$ és az $\varepsilon = \varepsilon(t)$ függvényeket. Az $\varepsilon(t)$ felrajzolásához támpontot jelent a $t = 0$, és a $t \rightarrow \infty$ helyettesítési értékekhez tartozó függvényértékek meghatározása:

$$\varepsilon(t=0) = \varepsilon_a = \frac{1}{E_1} \sigma_a \quad \text{és} \quad \varepsilon(t \rightarrow \infty) = \varepsilon_\infty = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) \sigma_a$$

Az első értékpár megfelel a 2.11. ábra P_2 , a második pedig a P_1 pontjának. A $t > 0$ intervallumban a változást exponenciális görbe írja le. A kúszási görbét a 2.12. ábra szemlélteti.

Bevezetve az:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E_3} \sigma_a$$

jelölést:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_a + \varepsilon_3 - \varepsilon_3 e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t} \quad \text{és}$$

a kúszási görbe egyenlete:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_a + \varepsilon_3 (1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t})$$

alakban is felírható.

Határozzuk meg a görbe $t = 0$ pontjához tartozó érintőjének és az asszimptótájának K metszéspontját. Az érintő iránytangense:

$$\left. \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\sigma_a}{\eta_3}.$$

Az érintő egyenlete:

$$\varepsilon(t) - \varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{\eta_3} t$$

Ha $\varepsilon(t) = \varepsilon_\infty$, $t = t_K$, akkor:

$$\varepsilon_\infty - \varepsilon_a = \varepsilon_3 = \frac{\sigma_a}{\eta_3} t_K,$$

vagyis:

$$t_K = \frac{\varepsilon_3 \eta_3}{\sigma_a} = \frac{\eta_3}{E_3}$$

Ahol a t_K időt késleltetési időnek is szokás nevezni.

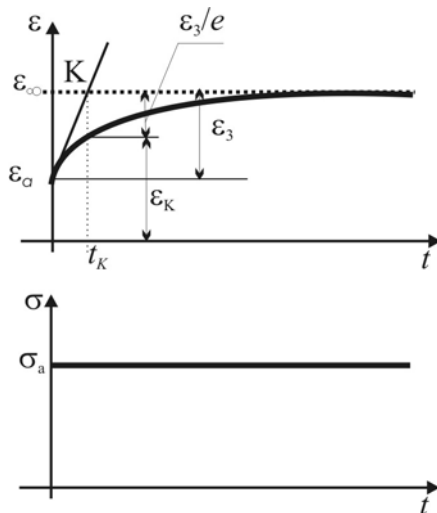
A kúszásgörbe értéke ebben az időpillanatban:

$$\varepsilon_K = \varepsilon_\infty - \varepsilon_3 e^{-1},$$

illetve:

$$\varepsilon_K = \varepsilon_a + \varepsilon_3 - \frac{\varepsilon_3}{e} \cong \varepsilon_a + (1 - 0,368)\varepsilon_3 = \varepsilon_a + 0,632\varepsilon_3,$$

azaz a késleltetési idő alatt a visszatartott deformáció kb. 63%-a jön létre.



2.12. ábra. A kúszási görbe.

Relaxációs görbe

A gerjesztő függvény az $\varepsilon(t) = \varepsilon_a H(t)$, illetve $\varepsilon(p) = \frac{1}{p} \varepsilon_a$, a válaszfüggvény (a relaxációs görbe egyenlete) pedig:

$$\sigma(t) = \mathcal{L}^{-1}[Z(p) \varepsilon(p)] = \varepsilon_a \mathcal{L}^{-1}\left[Z(p) \frac{1}{p}\right]$$

A $Z(p)$ függvényt (2.29)-ből behelyettesítve és a kijelölt szorzást elvégezve, majd átalakítás után:

$$\sigma(t) = \varepsilon_a \mathcal{L}^{-1}\left[E_0 \frac{1}{p} + \frac{E_2}{\frac{E_2}{\eta_2} + p}\right]$$

Az inverz transzformációt elvégezve kapjuk a relaxációs görbe egyenletét:

$$\sigma(t) = \varepsilon_a (E_0 + E_2 e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}) \tag{2.34}$$

A görbe megrajzolásához felhasználjuk a

$$\sigma(t=0) = \sigma_a = \varepsilon_a (E_0 + E_2) \text{ és } \sigma(t \rightarrow \infty) = \sigma_\infty = \varepsilon_a E_0$$

értékeket. A relaxációs görbét a (2.13. ábra) mutatja. Felhasználva a $\sigma_2 = \varepsilon_a E_2$ jelölést, a relaxációs görbe egyenlete:

$$\sigma(t) = \sigma_\infty + \sigma_2 e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t},$$

továbbá:

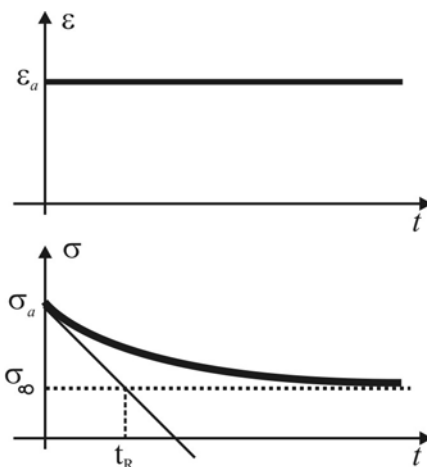
$$\sigma(t=0) = \sigma_a = \sigma_\infty + \sigma_2,$$

vagyis:

$$\sigma(t) = \sigma_a - \sigma_2 (1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t})$$

alak is felírható. A $\sigma_2 = \sigma_a - \sigma_\infty$ a feszültségesés. A $t = 0$ időpontban a görbéhez húzott érintő a σ_∞ asszimptótát a $t_R = \frac{\eta_2}{E_2}$ pontban metszi.

A t_R időt relaxációs időnek nevezzük. Ezen idő alatt a σ_a kezdeti feszültség kb. a 63%-kal leépül.



2.13. ábra. A relaxációs görbe.

2.5 A hőmérséklet és az idő hatásának hasonlósági elve

Néhány molekulamodell vizsgálatából következik [Penn 1966, Zimm 1965], hogy ha a polimerekre a viszkoelasztikus függvény általánosságban:

$$g(t, T) = \int_0^{\infty} h[\tau(T)] q \left[\frac{t}{\tau(T)} \right] d\tau, \quad (2.35)$$

akkor a t' és T_0 változók értékére:

$$g(t', T_0) = \rho_0 T_0 \int_0^{\infty} h[\tau(T_0)] q \left[\frac{t'}{\tau(T_0)} \right] d\tau, \quad (2.36)$$

vagy:

$$g(t', T_0) = \rho_0 T_0 \int_0^{\infty} h[\tau(T_0)] q \left[\frac{t' a_T}{\tau(T_0)} \right] d\tau, \quad (2.37)$$

ahol:

- $h(\tau)$ a hatásfüggvény,
- $q(t, \tau)$ az intenzitásfüggvény,
- ρ az anyag sűrűsége,
- T a hőmérséklet.

Ez azt jelenti, hogy:

$$g(t', T_0) = \frac{\rho_0 T_0}{\rho T} g(t, T), \quad (2.38)$$

ha $t = a_T t'$

ahol: a_T a hőmérséklet-idő eltolási tényező

A (2.38) összefüggés a hőmérséklet-idő hasonlósági elven alapul. Ezen elv gyakorlati jelentősége az, hogy tetszőleges hőmérsékleten az időskála kis része is elegendő a viszkoelasztikus tulajdonságok mérésére. Ha az anyagnak $T = T_0$ hőmérsékleten valamilyen $L_{T_0}(\tau)$ folytonos relaxációs spektruma van, akkor a τ_0 és $\tau_0 + d\tau_0$ időközben lejátszódó relaxációs folyamatot $T = T_1$ hőmérsékleten olyan

relaxációs folyamattal lehet helyettesíteni, amelynek időtartama $\frac{\tau_0}{a_T}$ és $\frac{\tau_0 + d\tau_0}{a_T}$

között van. A tartós idejű rugalmassági tényező nem változik [Urzsumcev et al. 1982].

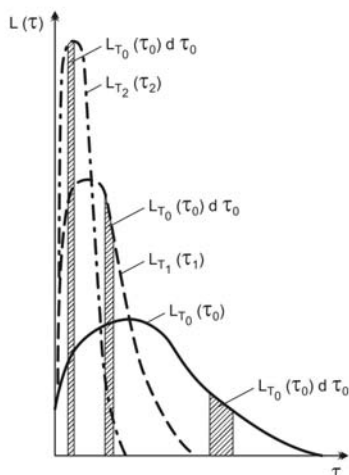
$$L_{T_1}(\tau) d\tau = a_T L_{T_0}[a_T \tau] d\tau \quad (2.39)$$

és $\tau = \frac{\tau_0}{a_T}$ -vel az egyenlőség jobb oldala $L_{T_0}(\tau) d\tau$,

ahol:

$$\int_0^{\infty} L_{T_0}(\tau) d\tau = I_{\infty}$$

Ezen összefüggés azt mutatja, hogy a hőmérséklet változásával az elemi területek és a spektrum sűrűségfüggvénye, valamint az időskála által határolt terület állandó marad. Ebben az esetben csak a spektrum sűrűségfüggvénye és a relaxációs idő skálája alakul át. Az $L_{T_0}(\tau)$ függvény formálisan diszkrét spektrumokkal és a Dirac δ -függvényével fejezhető ki.



2.14. ábra. A folytonos relaxációs spektrum hőmérséklettől való függősége.

Az 2.14. ábrán folytonos vonallal ábrázolt $L_{T_0}(\tau_0)$ spektrum a következő alakban írható fel:

$$L_{T_0}(\tau) = \sum_{i=1}^n I_{\infty i} \delta(\tau_0 - \tau_i), \quad (2.40)$$

ahol:

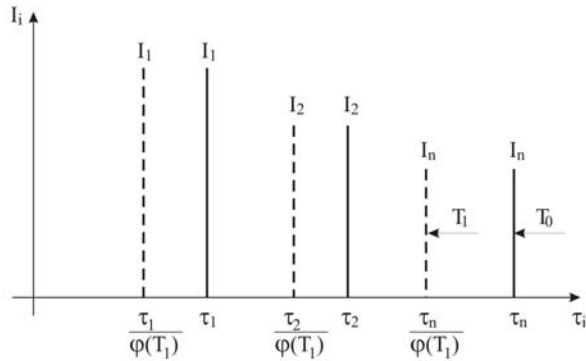
$$\sum_{i=1}^n I_{\infty i} = I_{\infty}.$$

Ha az anyagnak $T = T_0$ -nál $(I_{\infty i}, \tau_i)$ diszkrét relaxációs spektruma van, akkor $T = T_1$ -nél:

$$L_{T_1}(\tau) = a_{T_1} L_{T_0}[a_{T_1} \tau] \approx a_{T_1} \sum_{i=1}^n I_{\infty i} \delta[a_{T_1} \tau - \tau_i] = a_{T_1} \sum_{i=1}^n I_{\infty i} \delta \left[a_{T_1} \tau - \frac{\tau_i}{a_{T_1}} \right] \quad (2.41)$$

$$a_{T_1} I_{\infty i} \int_0^{\infty} I_{\infty i} \delta[a_{T_1} \tau - \tau_i] d\tau = I_{\infty i} a_{T_1} \sum_{i=1}^n I_{\infty i} \int_0^{\infty} \delta[\tau - \tau_i] d\tau = I_{\infty i} \quad (2.42)$$

A fenti egyenlőségek azt mutatják, hogy ha T a T_0 -tól T_1 -ig változik, akkor a relaxációs idők $\frac{\tau_i}{a_T}$ értékig tolódnak el, a rugalmasság jellemzői viszont a T változására invariánsak (2.15. ábra).



2.15. ábra. A diszkrét relaxációs spektrum alakulása a hőmérséklet változásakor.

Az összefüggésben az a_{T_1} a hőmérséklet-idő eltolási tényező. Az a_T közelítésére a szakirodalom több összefüggést ajánl. A leggyakrabban használt a Williams, Landell és Ferry által javasolt alak [Thamm 1988]

$$\ln a_T = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)},$$

ahol:

c_1 és c_2 mérésekből meghatározható tényezők,
 T_0 a vonatkoztatási hőmérséklet.

2.6 A szakirodalom összefoglalása

Szakirodalmi áttekintésem célja nem az irodalom hiányosságainak vagy ellentmondásainak bemutatása, hanem a későbbiekben ismertetésre kerülő mérési eredmények tudományos megalapozottságának ismertetése volt. A mezőgazdaságban alkalmazott csomagoló (bálacsomagolás), valamint tároló (silófólia-töltés) fóliákra vonatkozó és azok mechanikai, illetve reológiai tulajdonságaival foglalkozó szakirodalom szűkszavúságát, egyrészt a mezőgazdasági szemes-, szálas- és tömegtakarmányok tartósítási és tárolási eljárásának fiatal kora, másrészt pedig, az ezekben az eljárásokban alkalmazott fóliákra vonatkozó szakirányú kutatások szinte teljes hiánya magyarázza. Feladatomból ezért a tématerület szakirodalmi hiányosságainak pótlását jelöltem meg, melynek szerves részét a megfelelő mechanikai modell kiválasztása, majd az UV sugárzás, a hőmérséklet és a fólia mechanikai jellemzői közötti kapcsolat megfogalmazása jelentette.

Dolgozatom címe így kezdődik: a „Globális sugárzás és az időjárás hatása a....” Mi is az a globális sugárzás és, hogy kapcsolódik a dolgozat témájához? Erre a kérdésre az áttekintésben nem tértem ki részletesen, csak olyan mélységben foglalkoztam vele, amit a környezeti hatások és főleg az UV-B sugárzás, fóliákra kifejtett hatása megkívánt. A globális sugárzás definiálását követően közöltem annak közeli, távoli és extrém hullámhosszak szerinti felosztását. Az UV-tartományok közül kiválasztható az a hullámhossz-intervallum, mely mind az élő, mind pedig az élettelen szervezetekre káros hatást fejt ki.

Megemlítettem a Földünket takaró alsó és felső légrétegek, valamint az ózonpajzs azon hatását, mellyel a káros sugárzás bizonyos tartományaiából induló sugárzásokat semlegesítik. Kitértem az aktinikus hatásspektrum fontosságára és jelentőségére, mely a sugárzás hatását elemzi az anyagi szerkezetek egyes molekulatípusaira. Meghatározásához a hullámhossz függvényében vizsgálják az annak előállításához szükséges energiát, vagy teljesítményt.

Ezek a hatásspektrumok a kiindulási alapjai a biológiai és biztonságtechnikai felosztásnak is, hisz a különböző előírásokban is ezek a színek szerepelnek. Ezt követően röviden utaltam a sugárzás hő- és fotokémiai hatásának az anyagi szerkezeteket „öregítő” és kémiai átalakító hatására. A témával több szakirodalom is foglalkozik, magasabb szintű tudományos alapjait Csurgai-Simonyi: „Az információs technika fizikai alapjai”, valamint Budó-Mátrai: „Kísérleti fizika III.” című művek ide vonatkozó fejezeteiből ismerhetjük meg.

A reológia, mint a klasszikus mechanika új tématerületének taglalásakor a XVII. sz. nagy tudósai közül Pascalt („a folyadékokban izotróp feszültségállapot uralkodik”), Hooket („a tiszta rugalmas deformációk alaptörvénye”), és Newtont („viszkózus folyás alaptörvénye”), a XVIII. és XIX. sz. úttörői közül pedig, Hagent, Stokest, Poiseuillet, St. Venantot („a plaszticitás fogalmának matematikai definiálása”) és Kelvint („az elaszticitás elmélete”) kell kiemelni.

A mezőgazdasági anyagok reológia alapjait nemzetközi viszonylatban [Mohsenin 1963, 1971, 1980], hazai viszonylatban pedig többek között [Mózes-Vámos 1968, Sítkei 1972, 1981, 1986] fektette le. A mezőgazdasági anyagok reológiájával kapcsolatos kutatások a SZIE Mechanika Tanszékén több évtizeddel ezelőtt kezdődtek meg (Huszár 1971, Csorba 1973, Asszonyi 1976, Müller 1976, Gelencsér 1979) és napjainkban is folyamatosan zajlanak (Fenyvesi, 2001). Ezen hagyományokat követve dolgozatomban részletesen elemeztem a viszkózus és elasztikus, valamint viszkoelasztikus rendszerek egyensúlyi állapotát, valamint a viszkoelaszticitásra vonatkozó késleltetett elaszticitást (kúszást) és feszültség relaxáció jelenségét. Megállapítottam, hogy a lineáris viszkoelasztikus tulajdonságokkal jellemezhető rendszerek reológiai viselkedése a helyesen kiválasztott modellekkel, jó közelítéssel szemlélhető és megfelelő pontossággal leírható. Megállapítottam továbbá, hogy ezekre a modellekre érvényes mechanikai törvények analógia alapján, fenomenológiailag képezik le az adott reológiai rendszereket. A reális anyagi rendszerek reológiai viselkedésének pontosabb leírása érdekében a tisztán elasztikus és viszkózus Hooke, valamint Newton-elemekből felépíthető Maxwell és Kelvin-rendszereken túl szükségessé vált ezek általánosítása. Ahhoz, hogy valamely valós viszkoelasztikus rendszert tetszés szerinti pontossággal írassunk le, a nagyszámú K-, vagy M-rendszer elemeinek a relaxációs, valamint a késleltetési idők csökkenő, vagy növekvő sorrendje szerint rendezésével és az elemszámok növelésével, képeznünk kell az ún. csúszási és relaxációs függvényeket. Az általánosított rendszer matematikai megoldásának finomítása a Burger-rendszertől a Lethersich és a Jeffrey-rendszerek megszületéséhez vezetett.

Kutatások eredményezték azt a felismerést, miszerint bizonyos anyagi rendszerek deformációja részlegesen reverzibilis, ezért részlegesen rugalmas is. Adott külső erőteret esetében a terhelés megszűnését követő visszaalakulás a terhelési idő növekedésével csökken és a létrehozott deformációt megtartva, az anyagi rendszer belső feszültségei leépülnek. Megállapítható, hogy ha a külső erőteret hatását csökkentjük, akkor a deformációsebesség is csökkeni fog, melynek következtében eljutunk egy olyan feszültségállapotig, melytől kezdődően már nem alakul ki deformáció, azaz folyáshatár lép fel. Magyarul a folyáshatárhoz tartozó deformációnál kisebb deformációk esetében a külső erőteret megszűnése és visszaalakulása között, elasztikus utóélet jelentkezik. A problémát St. Venant-elemmel lehet kezelni. Ezeknél a rendszereknél a reológiai alapegyenletet a deformációsebességre vonatkozó egyenletéből származtathatjuk le úgy, hogy a nyírófeszültséget a folyáshatárral csökkentjük. Abban az esetben, ha a rendszerre az egymás utáni időpillanatokban a nyírófeszültség kis növekményei hatnak, akkor lineáris viszkoelasztikus rendszernél az adott időpillanatban kialakult deformáció, a feszültségnövekményeknek megfelelő deformációk algebrai összegzésével határozható meg. Az irodalomban Boltzmann-féle szuperpozíciós elvként ismert módszer igen értékes a gyakorlat számára, mivel figyelembe veszi az anyagi rendszer előéletét is. Dolgozatomban az anyagegyenlet és a mechanikai viselkedés

közötti kapcsolatot a mezőgazdasági termények vizsgálatánál is előszeretettel alkalmazott Poynting-Thompson (P-T) modellen keresztül mutatom be. Az anyagegyenletek megoldásának nélkülözhetetlen eszközét jelentő néhány matematikai eljárást (esetemben a Laplace-transzformációt), alapszinten taglaltam. A modellek bemutatásával az volt a célom, hogy megismertessem az olvasót a klasszikus reológiai rendszerek felépítésével és anyagegyenleteik egyes megoldási lehetőségeivel.

A klasszikus mechanikai modellek esetleges hibáival, illetve termodinamikai alapon történő megközelítésével számos hazai irodalom [Verhás 1985, Szendrő et al. 2000, Asszonyi 2006, Asszonyi et al. 2007,] foglalkozik. Annak ellenére, hogy a dolgozat terjedelmének határai miatt ezzel a problémakörrel nem foglalkoztam, megemlítését azonban mindenképp fontosnak tartottam. Az elmélet abból indul ki, hogy egy elszigetelt anyagi rendszer egyensúlyában az entrópia maximummal rendelkezik. A termodinamika az alapul vett II. főtétele a matematikai megfogalmazhatóság érdekében három részre bontja. Létezik entrópia, amely az állapotváltozók elég sokszor (legalább egyszer szakaszosan folytonosan) differenciálható függvénye, másodszer az entrópia konkáv függvénye változóinak, és harmadszor a fejlődési egyenletek által meghatározott folyamatok esetén és elszigetelt (zárt) rendszerben, az összentrópia nem csökkenhet. Ennek megfelelően az anyagtörvény meghatározása a II. főtétel, vagy pontosabban a II. főtétele is kifejező entrópiamérleg alapján történik [Asszonyi 2006]. Az általam későbbiekben használt Poynting-Thompson (P-T) modell termodinamikailag kitüntetett az összes lehetséges reológia modell között, mivel egy dinamikai változós termodinamikai elmélet természetes következménye [Ván-Asszonyi 2006].

A szakirodalmi áttekintés utolsó részében foglalkoztam a reológiai alkalmazás egy ritka gyakorlati példájával is, melynek célja az volt, hogy a rövid idejű vizsgálatok eredményeiből, hogyan lehet meghatározni a műanyagok hosszú idő múlva bekövetkező alakváltozásának mértékét. Ezen eredményt adó gyorsított módszerek különböző hasonlósági elveket (hőmérséklet-, feszültség-, a rezgés-, és a nedvesség-idő hasonlósági elvét) használnak fel.

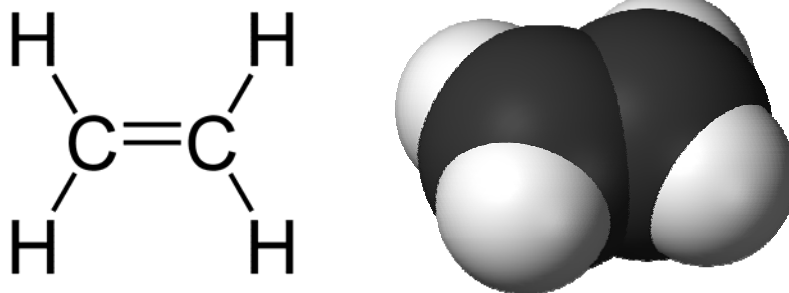
3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 A többrétegű fóliák szerkezeti felépítése

A szál- és tömegtakarmányok tárolására használt fóliák három rétegűek, és a rétegek különböző feladatokat látnak el. A belső általában fekete, ami a fényzárást biztosítja, a középső a megkívánt mechanikai tulajdonságokat hivatott garantálni, míg a külső réteg elsősorban az UV védelmet és a fényvisszaverődést biztosítja. A legmagasabb színvonalat a polietilén anyagú fóliák adják amelyeknél alapanyagként metallocént alkalmaznak. Ez az alapanyag drága, de alkalmazása több előnnyel jár, nevezetesen:

- magasabb mechanikai szilárdság, kisebb vastagság mellett,
- a kisebb vastagság kevesebb hulladék anyagot eredményez, ami a környezetvédelem szempontjából előnyös,
- extrém magas rugalmasság,
- magas továbbhasadási illetve szakítási szilárdsági értékek.

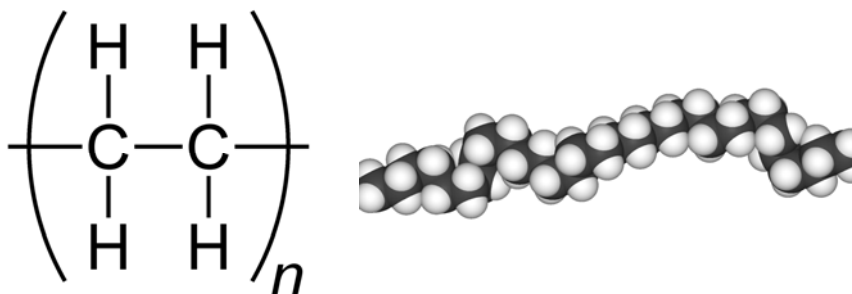
A polietilén (PE) molekula etilén egységek hosszú láncolata. Az etilénben (helyesebben eténben) két szén és négy hidrogénatom kapcsolódik egymással. Összegképlete C_2H_4 , egyszerűsített szerkezeti képlete $CH_2=CH_2$, melyből látszik, hogy tulajdonképpen két metilén kapcsolódik egymáshoz kettős kovalens kötéssel [Kahovec et al. 2002].



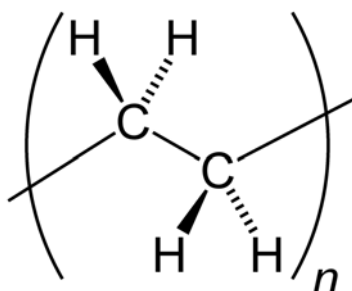
3.1. ábra. Az etén szerkezete és térkitöltő modellje.

A polietilént az etén polimerizációja útján állítják elő. Az eljárás során felnyílik a kettős kötés az egyes molekulákban, és így lehetővé válik a monomerek egymáshoz kapcsolódása. A PE molekula ismétlődő egysége szerkezetileg az etilén, ezt mutatja egyszerűsített összegképlete: $(C_2H_4)_n$

ahol: n a polimerizáció foka.



3.2. *ábra.* A PE lánc egyszerűsített szerkezetét reprezentáló képlet és a polietilén hosszú láncának térkitöltő modellje.



3.3. *ábra.* A PE lánc ismétlődő egységének térbeli elrendeződése (a C–C kötés a lap síkjába esik, a vastagítottak elé, a szaggatottak pedig mögé)

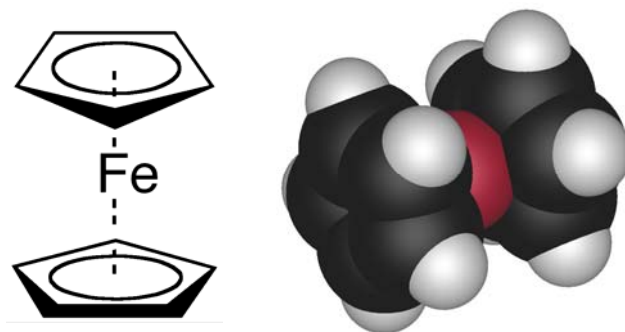
A polimerizáció módszere (radikális, anionos, kationos, ionkoordinációs) meghatározza a kapott polimer szerkezetét és típusát.

Az egyes polietilén fajtákat legtöbbször sűrűség és a molekulán belüli elágazások száma szerint kategorizálják. A PE mechanikai tulajdonságait különösen az elágazások száma és típusa, a kristályszerkezet és a molekulatömeg szabja meg. A leggyakoribb polietilén típusok a következők:

- ultra-nagy molekulatömegű polietilén (UHMWPE),
- ultra-kis molekulatömegű polietilén (ULMWPE – PE-WAX),
- nagy molekulatömegű polietilén (HMWPE),
- nagy-sűrűségű polietilén (HDPE),
- nagy-sűrűségű térhálósított polietilén (HDXLPE),
- térhálósított polietilén (PEX),
- közepes sűrűségű polietilén (MDPE),
- kis-sűrűségű polietilén (LDPE),
- lineáris kis-sűrűségű polietilén (LLDPE),
- nagyon kis sűrűségű polietilén (VLDPE).

A HDPE (high density polyethylene) sűrűsége legalább $0,941 \text{ g/cm}^3$. Kisszámú elágazást tartalmaz, melynek köszönhetően az intermolekuláris kötőerők nagyobbak, a szakítószilárdsága jobb. Előállításánál a megfelelő katalizátor és reakciókörülmények kiválasztásával biztosítják az elágazások alacsony számát, illetve hiányát. Gyakran alkalmazott katalizátorok például a króm/szilícium, a Ziegler-Natta és a metallocén katalizátor.

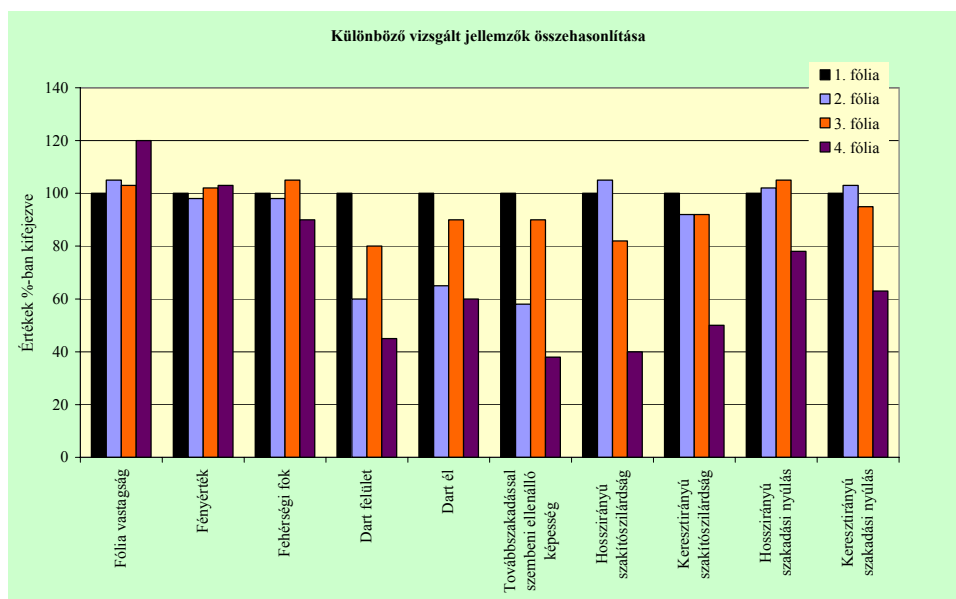
A metallocén (diciklopentadienil-fém, $M(C_5H_5)_2$) olyan fémorganikus (szervetlen fémiont és szerves molekulát tartalmazó) vegyületek gyűjtőneve, amelyekben két ciklopentadienát-anion szandwichszerűen kötődik, valamely átmeneti fémhez (pl. $M = \text{Fe, Co, Ni, Ru, Os, Mn, Zn, Zr}$). A két gyűrű ellentétes oldalról közrefogja a központi fémiont, így kialakítva a jellegzetes térbeli szerkezetet. A metallocének színes, szilárd anyagok. Fém-halogenidok és a ciklopentadién nátriumsójának reakciójából állíthatók elő. Katalizátorként (olefin polimerizáció), stabilizálószerként, gyökfogóként használatosak. A metallocének valójában egy nagyobb csoport, a fémorganikus szandwich vegyületek egy alosztályát jelentik [Crabtree 2005]. Legismertebb és legkorábban felfedezett képviselőjük a ferrocén, melynek központi fémionja a vas [Urnezis et al. 2002].



3.4. ábra. A ferrocén molekula térbeli szerkezete és térkitöltő modellje.

3.2 A többrétegű fóliák vizsgálati módszerei

A többrétegű fóliák minősítésére nincsen egységes minősítési rendszer kidolgozva [Weber-Meise 2005]. Sokan azt gondolják, hogy minél vastagabb a fólia annál biztonságosabban tárolható benne a takarmány. A következő oszlop diagramon, négy különböző gyártótól származó fólia vizsgált jellemzőinek értékeit mutatom be százalékos értékben [Meise et al. 2006]. A diagramon feltüntetett vizsgálatok szabványban rögzített vizsgálatok.



3.5. ábra. Négy fóliatömlő vizsgált jellemzőinek százalékos összehasonlítása (1. tömlő: az RKW AG 2005-ös minimális szabványa, itt 100%-nak véve).

Bevezetésként szeretném felhívni a figyelmet az első oszlopcsoport mintegy 20%-kal vastagabb tagjára, melynek további műszaki, minőségi tulajdonságai jelentősen eltérnek majd a szabványos értékektől. Látható, hogy a fólia vastagságának növelése a további és fontosabb tulajdonságokra negatív hatást fejtett ki. A következőkben azokat a szabványos vizsgálatokat ismertetem, melyeket a gyakorlat ritkábban használ és a köztudatban sem annyira ismertek. A kiértékelésben bemutatott méréseket nem alkalmaztam, az általam elvégzett szabványos vizsgálatokat a 3.4 fejezetben ismertetem részletesen.

Az oszlopdiaagramban közölt és kevésbé ismert vizsgálati módszerek közül a:

- Dart-próba: perforációval szembeni ellenálló képesség, adott tömeget ejtünk adott magasságból a kifeszített fóliára. Ez egy igen fontos jellemzője a fóliáknak, mert csökkenti a pontszerű károsodás veszélyét [ASTM D1709-62].
- Továbbszakítási módszer: továbbszakadással szembeni ellenálló képesség. Azt mutatja meg, hogy sérülés esetén (vágás, szakadás) milyen gyorsan és mekkora erő hatására szakad tovább a fólia [ASTM D1922].
- Színérték: a világosság mértéke, a reflexió és a felmelegedés százalékos kifejezője. Amennyiben ez az érték kicsi a takarmány külső rétegei erősebben melegszenek fel [DIN 53 375].

- Fehérségi fok: Berger szerint: a fehér szín behatásának mértéke, amit színérzékelővel mérnek. Minél magasabb ez az érték, annál jobb a reflexió [DIN 6174].
- Gázáteresztő-képesség: megmutatja, hogy adott hőmérsékleten hány cm^3 térfogatú és adott nyomású vízgőz távozik el, 1 m^2 felületű fólián és 24 óra alatt [DIN 53380].

A következő fejezetekben az általam elvégzett mérések módszerét ismertetem.

3.3 UV-transzmissziós vizsgálatok módszere

A fóliák sugárzásáteresztő-képességének változására irányuló vizsgálataimhoz definiálni kellett az áteresztőképesség fogalmát. Abból a megfontolásból indultam ki, hogy egy közeg transzmisszióján, annak azon áramsűrűség-változását értjük, melyet a közeg felületére beérkező és abból kilépő sugárzási áramok sűrűségének, egymáshoz viszonyított értéke (melyet praktikusán százalékban fejezünk ki) jellemez. Nagyságát méréssel úgy a legegyszerűbb meghatározni, hogy megmérjük a fóliára beérkező, valamint az abból kilépő sugárzási áramsűrűségeket, majd ezt követően előállítjuk a két áramsűrűség hányadosát.



3.6. ábra. A környezeti légállapot- és sugárzásmérő rendszer.

A vizsgálatok során egy Kipp-Zonen piranométerrel kiegészített napsugárzás-mérő rendszer (3.6. ábra) segítségével minden transzmissziós mérési sorozat előtt mértem a környezeti légállapot legfontosabb jellemzőit (hőmérséklet, relatív páratartalom, globális sugárzás). Ezután közvetlenül állapítottam meg az érzékelőkhöz helyezett standard lámpa által kibocsátott spektrális intenzitásokat, azaz meghatároztam a lámpaspektrumot. A lámpaspektrum értékei azok a sugárzásintenzitás-értékek, amelyek közvetlenül a lámpa elé helyezett fóliába léptek be. Ezután a vizsgált fóliát a standard lámpa és a spektrofotométer apertúrája közé helyeztem és így vettem fel azt

a spektrumot, mellyel a fóliából kilépő spektrális sugárzásáram-sűrűségeket határoztam meg. Ezt a méréssorozatot értelemszerűen minden egyes fóliára elvégeztem.

Ennek megfelelően kísérletsorozataimban először meghatároztam az exponátlan fóliák spektrális UV-transzmisszióját, majd ezt követően vizsgáltam ezek megváltozását. Minden transzmisszió-spektrumhoz meghatároztam a mérési tartományra vonatkozó átlagos transzmisszió értékét is.

Mivel az első próbamérésekből egyértelművé vált, hogy a fóliák transzmisszió-spektruma viszonylag „egyszerű” függvény, és a fölösleges adathalmazást elkerülendő, elegendőnek ítéltam a spektrális transzmissziók meghatározását 2,5 nm-es egységenként elvégezni.

A 2002-es és a 2003-as évek június, illetve október hónapjai között végrehajtott UV transzmissziós méréseket egy Brewer MK III. (SCI-TEC Inc., Kanada, 97-152) típusú dupla monokromátoros spektrofotométerrel végeztem (3.7. ábra). A berendezés az UV-sugárzás intenzitását 0,5 nm-es felbontással a 286,5-363,5 nm értékű hullámhossz-tartományban határozza meg. A kültéri mérőberendezés alapvetően a Napból érkező elektromágneses sugárzás mérésére, azaz a természetes UV sugárzás mérésére szolgál. A mérésekhez a spektro-fotometer fotoelektron-sokszorozójának tesztelésére alkalmas, standard lámpák egyikét (sorszám: 631) használtam.



3.7. ábra. BREWER MK III spektrofotométer.

3.4 Szilárdsági jellemzők mérése

A mechanikai méréseket az FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet anyagvizsgáló laboratóriumában egy Instron 5581-es univerzális anyagvizsgáló berendezéssel hajtottam végre (3.8. ábra), melynek terhelhetősége egytengelyű húzásra és nyomásra 50 kN, a hozzá tartozó keresztfej-elmozdulás nagysága pedig, 2 méter volt. A keresztfej sebességét 0,001 mm/perctől 1000 mm/perces tartományban (a sebesség pontossága 1%, a helyzet-pontossága pedig, +/- 0,02 mm) lehetett változtatni. A berendezéshez három hitelesített erőmérő cella tartozott, melyek terhelhetősége 0,025-5 N (pontossága 0,5% a mért értékre vonatkoztatva), 5-500 N (pontossága 0,5% a mért értékre vonatkoztatva) és 500-50.000 N (pontossága 0,5% a mért értékre vonatkoztatva) határok között mozgott. A berendezést számítógép vezérelte, az elektronikai mintavételi frekvencia 500 Hz, az A/D átalakító 32 bites, illetve a mintavételezés sűrűsége az idő, az erőváltozás, a megnyúlás mértéke és egyéb paraméterek változásának függvényében, változtatható volt. Ez a reológiai méréseknél igen nagy előnyt jelentett, mivel a kúszás mérésekor a kezdeti nagyobb alakváltozás esetén sűrűbben lehetett mintát venni. Az idő előrehaladtával a nyúlások mértéke jelentősen csökken, ezért ekkor sokkal kisebb mintavételezési gyakoriság is elegendő volt, így elkerülhetővé vált a mérési adatok indokolatlan felhalmozása.



3.8. ábra. Az Instron 5581-es anyagvizsgáló gép.

A reológia mérésekhez szükséges különböző hőmérsékleten végrehajtott vizsgálatokhoz a fent említett berendezést kiegészítettem egy Instron 3319-es típusjelű folyékony széndioxidos klímaberendezéssel (3.9. ábra), mely -70°C és +350°C-os tartományban, +/- 2 °C pontossággal tartotta a beállított hőmérsékletet.



3.9. ábra. Az INSTRON 3119 folyékony széndioxidos klímaberendezés.

Első lépésként minden esetben a fóliák alapvető szilárdsági jellemzőit határoztam meg, melyhez az MSz EN ISO 527-1, 527-3 szabványok előírásait vettem figyelembe. A vizsgálatoknál alkalmazott 25, 250 és 500 mm/min terhelési sebesség mellett meghatároztam a klasszikus szilárdsági és alakváltozási (szakítószilárdság, folyáshatárhoz tartozó feszültség, fajlagos nyúlások stb.) jellemzőket is. A vizsgált minták szélessége minden esetben 25 mm, a befogópofák közötti távolság pedig, 100 mm volt.

Poisson tényező meghatározását az alábbiak szerint végeztem el. A hossz- és keresztirányú (az erő irányára merőleges) fajlagos alakváltozás hányadosának abszolút értéke a Poisson-szám. Ennek reciproka a Poisson-tényező (jele: μ), melynek értéke műanyagok esetében általában 0,3 és 0,5 között mozog. Az általam mért Poisson-tényező érvényessége az anyag rugalmassági határán belül található. A méréshez általában egy hossz- és keresztirányú extenzométert kell elhelyezni a próbatesten. Mivel a vizsgálandó fóliák igen vékonyak, ezért a fent említett extenzométerek elhelyezésére nem volt lehetőség.

A mérés menete a következőképpen alakult:

1. A vizsgálandó fóliákra 10 mm x 10 mm négyzetrács-hálót rajzoltam.
2. A fóliákat, azok befogására alkalmas megfogó keretbe helyeztem be.
3. Egy nagy-felbontású digitális fényképezőgépet úgy rögzítettem annak állványára, hogy az a mérendő fóliához optimális távolságban legyen.
4. A mérés megkezdése előtt minden mérendő fóliát 2 N előfeszítési erővel terheltem.
5. Az előterhelt állapotokat fényképfelvételeken rögzítettem.

6. Ezt követően a nagyon lassú, 1mm/min-es előtolással terhelt fóliákról is felvételeket készítettem. A fényképezést fóliák folyáshatárának eléréseig folytattam.



3.10. ábra. A mérés elrendezése.

A mérés kiértékelése céljából egy kontroll mérőhasábot ugyanazokkal a beállításokkal is lefényképeztem.

A mérések befejezését követően az elkészült felvételeket egy képfeldolgozó programba töltöttem be. Ehhez az Adobe Photoshop programját használtam, de erre a célra bármilyen más program is megfelel. Első lépésben a képfeldolgozó program segítségével a mérőhasábot mértem meg és értékét összehasonlítottam a mérőhasáb eredeti méretével. Amennyiben eltérés mutatkozott a két érték között egy korrekciós tényezőt határoztam meg, amellyel az összes mért értéket korrigáltam.

Mértem a fólián berajzolt négyzetek hosszirányú növekedését, illetve keresztirányú csökkenését. A Poisson-tényező meghatározásánál ezt is figyelembe vettem, így a képlet a következőképpen alakult:

$$\mu = \frac{l_0}{h_0} \cdot \frac{|\Delta h|}{|\Delta l|},$$

ahol: μ Poisson-tényező, [-]
 l_0 a kezdeti hosszúság, [mm]
 h_0 a kezdeti szélesség, [mm]
 Δl a hosszirányú méretváltozás, [mm]
 Δh a keresztirányú méretváltozás. [mm]

3.5 A környezeti hatások vizsgálata

A globálsugárzás és a fólia mechanikai jellemzői közötti összefüggés megállapításához az ultraviola-sugárzással szembeni ellenálló-képességet javító adalékanyagok felhasználásával készült, különböző összetételű fóliákat vizsgáltam. Az első átlátszó és semmilyen adalékanyagot nem tartalmazó, úgynevezett kontrol termék mellett még két fajta, fehér és lila színű fóliát is vizsgáltam, melyek 5 és 20% UV-stabilizációs adalékanyagot tartalmaztak. A méréseket 2002-ben és 2003-ban kétszeres ismétléssel végeztem, az UV-sugárzás értékeit az Országos Meteorológiai Szolgálat Levegőkörnyezeti Megfigyelési Főosztályától szereztem be. A közvetlen környezeti behatások megállapítása céljából a fóliákat június elején helyeztem ki a szabadban kialakított vizsgálati helyszínre (3.11. ábra). Ezt követően két-hetes időtartamban mintákat vettem mind az öt fóliából, majd a vizsgáló laboratóriumban elvégeztem a szükséges méréseket.



3.11. ábra. A fóliák kihelyezése közvetlenül a sugárzásmérő közelében (2002. június 06.), majd állapotuk 2002. augusztus 15-én.

A mérések alkalmával a környezeti hatások függvényében állapítottam meg a mechanikai viselkedést leíró jellemzőket. Minden mérésnél a korrekt összehasonlíthatóság érdekében meghatározott nagyságú előterhelést alkalmaztam, így az előfeszítési erő nagyságát 2 N-ban, az előtolási sebességet pedig, 25 mm/min-ben állapítottam meg. Az idő függvényében folyamatosan változó deformációval és állandó feszültségállapottal jellemezhető kúszás-vizsgálatok esetében a terhelés felvitelének sebességét 250 mm/min- re, nagyságát pedig, $\sigma = 8$ MPa-ra állítottam be. A kihelyezett ötféle fóliából, ötször vett mintákra vonatkozó méréseket háromszoros ismétléssel végeztem, a terhelésfelvitelt követő kúszási vizsgálatok időtartama 18 óra volt.

A hőmérséklet és a fólia mechanikai jellemzőinek vizsgálata során a 3.4. ábrán látható klímaberendezés segítségével relaxációs méréseket végeztem, a méréseket +45 °C és -20 °C közötti hőmérséklettartományban hajtottam végre. A fóliákat gyors,

500 mm/min-es sebességgel 5 mm-re ($\varepsilon_a = 0,05$) nyújtottam meg, majd a rendszert 120 percre magára hagytam.

A hőmérséklet és idő hasonlósági elvének vizsgálatokor a kúszás méréséhez 24 órán keresztül a fóliákat 25 mm/min-es keresztfej elmozdulással jellemezhető 2 N-os előterheléssel terheltem, majd gyors, 250 mm/min-es terhelés felvitel mellett $\sigma = 8$ MPa feszültség szintet hoztam létre.

Az eltérő mérési beállításokra a fóliák szín- és szerkezeti különbözősége miatt volt szükség. Ezért minden mérési sorozat előtt próbaméréseket végeztem, amiből láthatóvá vált, hogy mennyi ideig, illetve mekkora terheléssel, vagy nyúlásértékkel kell dolgozni.

3.6 A reológiai mérések kiértékelésének módszere

Az egy-tengelyű reológiai mérések célja a mechanikai viselkedést leíró E_i, η_i paraméterek becslése, amelyekből a modell differenciálegyenletének állandói (anyagjellemzők) határozhatók meg.

3.6.1 A kúszásmérés kiértékelése

Az anyagvizsgáló gép (3.8. ábra) befogószerkezetébe helyezett szabványos próbatestet gyors terhelés felvitel után $\sigma = \sigma_a$ (2.12. ábra) feltételnek megfelelően kell terhelni. A mérési adatokat tároló és feldolgozó elektronika táblázatot készít a nyúlás-idő értékpárokról. A keresett paraméterek közelítő értékei a legkisebb négyzetek elvének felhasználásával nyerhetők. A három-elemes Poynting-Thomson modell alkalmazásakor a (2.33) felhasználásával:

$$\Delta(E_1, E_3, \eta_3) = \sum_{i=1}^n \left\{ \varepsilon_i - \sigma_a \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_3 t_i}{\eta_3}} \right) \right] \right\}^2 \quad (3.1)$$

eltérés-négyzetösszeg minimumát adó E_1, E_3 és η_3 értékeket kell megkeresni. Az egyenletben az ε_i a t_i időponthoz tartozó mért fajlagos nyúlást, a szögletes zárójelben lévő mennyiség pedig, a t_i időpontban számított fajlagos nyúlást jelenti. A (3.1) minimumának keresésére az EXCEL Solver eljárása is alkalmas, vagy képezni kell a:

$$\frac{\partial \Delta}{\partial E_1} = 0, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial E_3} = 0, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial \eta_3} = 0$$

egyenletrendszer.

A minimalizálás első lépésekor a keresett paraméterek becslött értékével célszerű számolni. Erre a célra alkalmasak a szakítógép által felrajzolt $\varepsilon = \varepsilon(t)$ görbéről leolvasható értékek (2.12. ábra):

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_1}, \quad \varepsilon_\infty = \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3}\right)\sigma_a, \quad t_K = \frac{\eta_3}{E_3}.$$

A modellállandókból a differenciálegyenlet 2.5. ábra után feltüntetett állandót lehet meghatározni.

3.6.2 A relaxáció (ernyedés)-mérés kiértékelése

Gyors deformálás után $\varepsilon = \varepsilon_a =$ állandó feltételt kell biztosítani, és rögzíteni kell a feszültség-idő értékpárokat. A keresett paraméterek a (2.34) felhasználásával a:

$$\Delta(E_0, E_2, \eta_2) = \sum_{i=1}^n \left\{ \sigma_i - \left[E_0 \varepsilon_a + E_2 \varepsilon_a \cdot e^{-\frac{E_2 t_i}{\eta_2}} \right] \right\}^2 \quad (3.2)$$

egyenlet minimalizálásából adódnak. A modellállandókból a differenciálegyenlet 2.6. ábráján látható állandóit számíthatjuk.

3.7 Az anyagjellemző paraméterek felhasználásának módszere

Az egytengelyű vizsgálatokkal nyert E_i, η_i paraméterek, illetve a differenciálegyenlet állandói alapján, összehasonlításon alapuló minősítés végezhető el. A fóliafelhasználási tapasztalatok, valamint a mért jellemzők közötti korreláció alapján megbecsülhető az új anyag várható viselkedése. Fontos ismeretet jelent az öregedés és a paraméterek változásának kapcsolata is.

Az időtartományban elvégzett feszültségszámításoknál a korszerű numerikus módszerek (pl. végeelem módszer) lehetővé teszik a lineáris, valamint izotróp, viszkoelasztikus anyagmodell felhasználását [COSMOS/M 2003].

Több-tengelyű feszültségi állapotban a program által felhasznált alapvető összefüggés (Duhamel- tétel egyik alakja) az:

$$\mathbf{F}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \tau} \partial \tau + \mathbf{I} \int_0^t K(t-\tau) \frac{\partial \mathbf{E}_0}{\partial \tau} \partial \tau, \quad (3.3)$$

ahol:

- $G(t-\tau)$ a nyírási relaxációs modulus,
- $K(t-\tau)$ a térfogati relaxációs modulus,
- \mathbf{I} egységtenzor,
- τ és t idő.

Ahhoz, hogy az egy-tengelyű vizsgálatok eredményeit a COSMOS/M végeelem program több-tengelyű állapotban fel tudja használni, átalakításokra van szükség. A (2.34) egyenlet az alábbiak szerint írható át:

$$\sigma(t) = E_0 \varepsilon_a + E_2 \varepsilon_a \cdot e^{-\frac{t}{t_R}}$$

Osszuk el az egyenletet ε_a -val, és legyen $\frac{\sigma(t)}{\varepsilon_a} = E(t)$

akkor:
$$E(t) = E_0 + E_2 \cdot e^{-\frac{t}{t_R}}$$

Továbbá:

$$E(t = \infty) = E_\infty = E_0$$

$$E(t = 0) = E_a = E_0 + E_2 = E_\infty + E_{(1)}$$

$E_{(1)} = E_2$ jelöléssel.

Legyen $t_R = \tau_{(1)}^E$. Ezek felhasználásával írható, hogy:

$$E(t) = E_a \left[1 - \frac{E_{(1)}}{E_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{(1)}^E}} \right) \right].$$

Bevezetve az $\frac{E_{(1)}}{E_a} = e_{(1)}$ jelölést:

$$E(t) = E_a \left[1 - e_{(1)} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{(1)}^E}} \right) \right]. \quad (3.4)$$

A több-tengelyű állapotra felírható összefüggés:

$$G(t) = G_a \left[1 - g_{(1)} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{(1)}^G}} \right) \right], \quad (3.5)$$

ahol felhasználtuk, hogy: $G_\infty = G_a - G_{(1)}$

és a:
$$g_{(1)} = \frac{G_{(1)}}{G_a}$$

jelölést.

(2.20) első egyenletéből:
$$G = \frac{3KE}{9K - E},$$

Vagyis:
$$G_a = \frac{3K_a E_a}{(9K_a - E_a)} \quad G_\infty = \frac{3K_\infty E_\infty}{(9K_\infty - E_\infty)}, \quad (3.6)$$

és:

$$G_{(1)} = G_a - G_\infty$$

A (3.6) egyenletekben szereplő K kompresszibilitási modulust vagy mérni kell, vagy (2.19) második sora és (2.18) első sora felhasználásával számolni szükséges:

$$K = \frac{1}{3} \frac{\sigma}{(1 + 2\nu)\varepsilon} \quad (3.7)$$

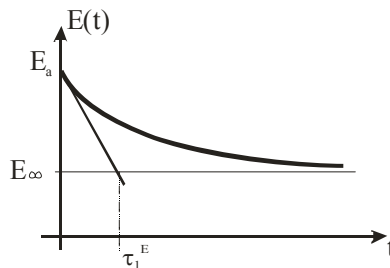
A τ_1^G relaxációs időt a:

$$\left. \frac{dG}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{dG}{dE} \frac{dE}{dt} \right|_{t=0}$$

összefüggésből származtathatjuk:

$$\tau_{(1)}^G = \frac{9K_a - E_a}{9K_a} \cdot \frac{G_{(1)}}{E_{(1)}} \cdot \frac{E_a}{G_a} \tau_{(1)}^E \quad (3.8)$$

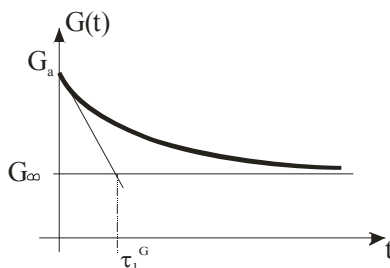
(3.8) felírásakor felhasználtuk a relaxációs görbéről (3.12. ábra) leolvasható kapcsolatot:



$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{t=0} = \frac{E_1}{\tau_{(1)}^E}$$

3.12. ábra. A változó rugalmassági modulus-idő függvény.

Analógia alapján írható (3.13. ábra):



$$\left. \frac{dG}{dt} \right|_{t=0} = \frac{G_{(1)}}{\tau_{(1)}^G}$$

3.13. ábra. A változó csúsztató rugalmassági modulus-ideő függvény.

Valamint:

$$\frac{dG}{dE} = \frac{3K(9K - E) + 3KE}{(9K - E)^2} = \frac{G}{E} \frac{9K}{(9K - E)}$$

$$\left. \frac{dG}{dE} \right|_{t=0} = \frac{G_a}{E_a} \frac{9K_a}{(9K_a - E_a)}$$

A végeelem-program futtatásához szükséges bemenő anyagjellemző adatok:

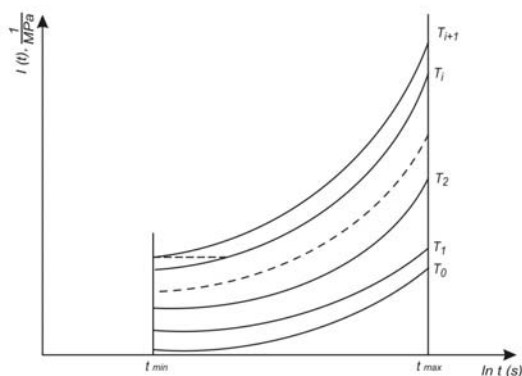
- 1) $E_a = E_\infty + E_{(1)}$
- 2) ν_a , Poisson tényező kezdeti értéke, vagy $\nu_a = (3K_a - E_a) / 6K_a$
- 3) $g_{(1)} = G_{(1)} / G_a$
- 4) $\tau_{(1)}^G$

3.8 A hőmérséklet-ideő hasonlósági elv általános görbéinek felépítése

A viszkoelasztikus érzékenységet az:

$$I(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \tag{3.9}$$

összefüggéssel számoljuk, ahol $\varepsilon(t)$ tartósfolyási alakváltozás középértékeiből készített görbe, σ a statikus feszültség. A kapott eredményeket az $I-\ln a_t$ féllogaritmikus koordináta rendszerben ábrázoljuk (3.14. ábra).



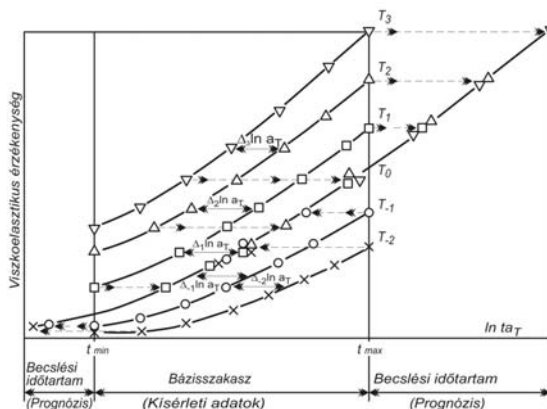
3.14. ábra. Az $I - \ln t$ koordinárendszerben ábrázolt mérési eredmények.

A T_0 vonatkoztatási hőmérséklettől kiindulva a következőképpen elemezzük az érzékenységi görbéket. A T_0 -hoz tartozó bázis érzékenységi görbétől kezdve néhány pontban megmérjük a görbepárok közötti vízszintes távolságot és meghatározzuk a $\Delta_j \ln a_T$ középértéket. A $\Delta_j \ln a_T$ értékeket a $T = T_0$ -hoz tartozó értéktől összegezzük (3.15. ábra). A kapott értékeket az $\ln a_T - (T - T_0)$ koordinárendszerben ábrázoljuk. Az így kapott $\ln a_T = f(T - T_0)$ függvényt lineáris törtfüggvény alakban keressük:

$$\ln a_T = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)}. \tag{3.10}$$

Az általános görbék felépítéséhez az $\ln a_T$ analitikus értékeit használjuk fel. Ekkor a bázis időtartományban elhelyezkedő $I(\ln t, T)$ kísérleti görbéket a megfelelő $\ln a_T$ értékkel eltoljuk a logaritmikus időtengely mentén. Ezen görbék új ideje:

$$\ln(ta_t) = \ln t + \ln a_T. \tag{3.11}$$



3.15. ábra. A hőmérséklet-idő eltolási tényezőjének meghatározása.

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

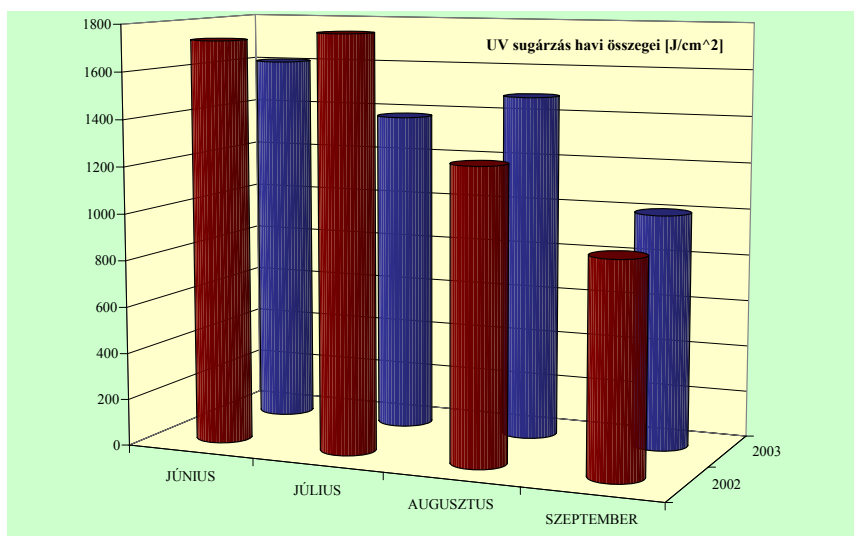
4.1 A fóliák transzmissziós jellemzői

A következő, 4.1 táblázatban a 2002, valamint a 2003 év nyári hónapjaiban mért UV-sugárzások havi összegeit foglaltam össze, a sugárzás értékeit általában Jcm^{-2} értékben adják meg.

4.1. táblázat. Az UV sugárzás havi összegének alakulása.

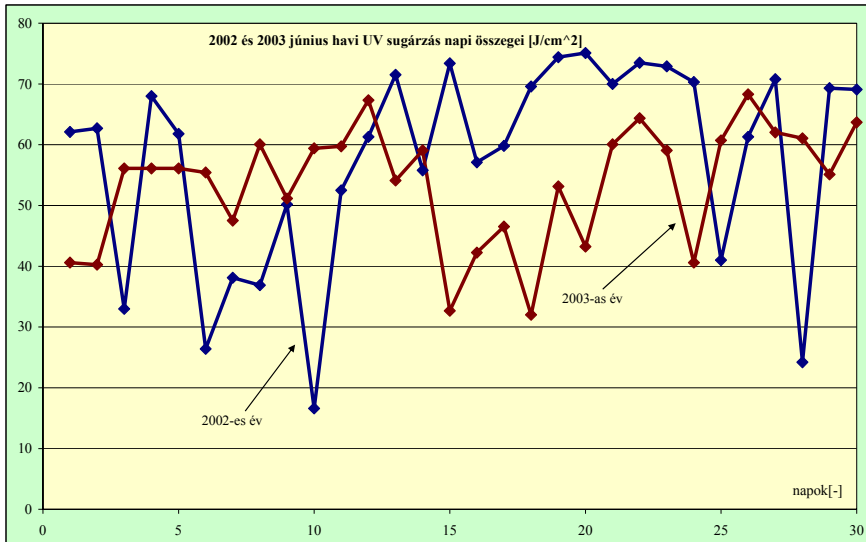
Dátum	UV-sugárzás (Jcm^{-2})			
	június	július	augusztus	szeptember
2002	1728	1768	1249	906
2003	1607	1378	1483	1007

A táblázat adatai alapján megszerkesztettem ezen mérési eredményekre alapozott havi UV-sugárzás oszlopdiagramját (4.1. ábra). Az ábrán a 2002-es és 2003-as év június hónapjának UV-sugárzás értékei, napi bontásban láthatók. Megjegyzem, hogy azokon a napokon, amikor felhős volt az égbolt, vagy esett az eső, az UV-sugárzás mértéke 40 Jcm^{-2} alá süllyedt.



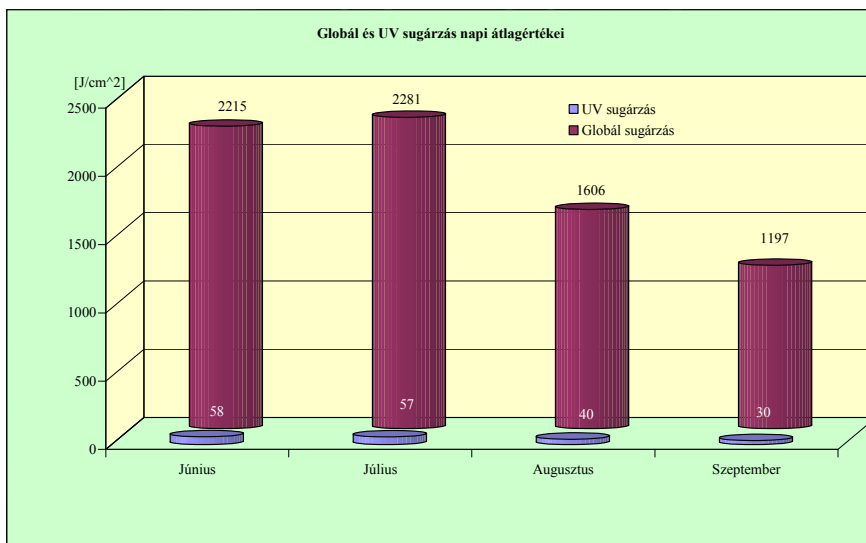
4.1. ábra. Az UV-sugárzás havi összegei.

A táblázatból és az ábrából jól látható, hogy az adott évek június és július hónapjaiban az UV-sugárzás értéke kiugróan magas volt. Ennek köszönhetően a fóliák jelentős mértékben károsodtak. A következő, 4.2 ábrán az UV-sugárzás június hónapjában mért napi összegeit mutatom be.



4.2. ábra. Az UV-sugárzás 2002 és 2003 június hónapjaiban mért napi összegei.

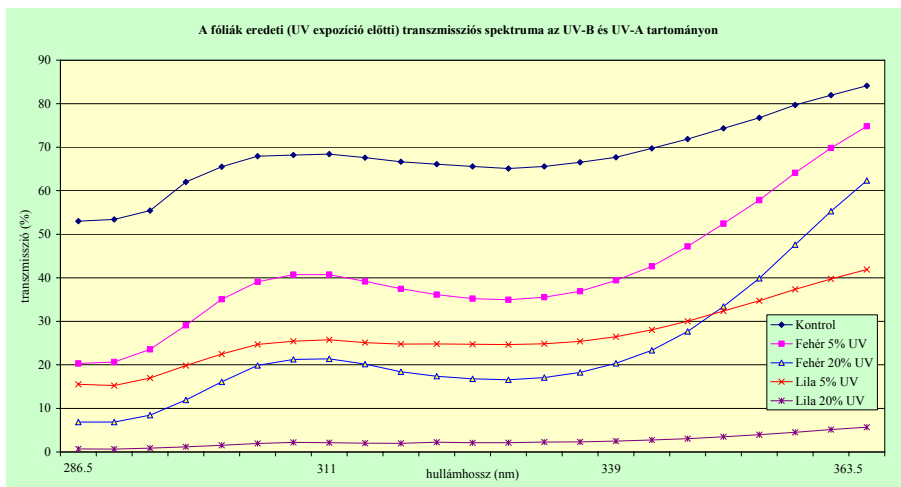
Megfigyelhetjük, hogy az UV sugárzás igen kis része a globálsugárzásnak, mégis a fóliákra ez a tartomány fejt ki a károsító behatások több, mint 90%-át. Ezért a továbbiakban csak ezen sugárzások káros hatásával foglalkoztam (4.3. ábra).



4.3. ábra. A 2002-es év globál- és az UV-sugárzásának napi átlagértékei.

4.1.1 A transzmissziós spektrum változása az idő függvényében

A fóliák transzmissziós spektrumainak vizsgálata alapján jól megfigyelhető, hogy egyrészt a transzmisszió spektrumok exponátlan esetben az UV szűrőanyag-tartalom függvényében elkülönülnek, másrészt fontos különbség mutatkozik attól függően, hogy a fóliáknak milyen volt a színe (fehér, vagy lila). A különböző összetételű minták expozíció előtti transzmissziós spektrumának alakulását a 4.4 ábrán mutatom be, a mérési eredményeket pedig, a 4.2 táblázatban foglaltam össze.



4.4. ábra. Az exponátlan fóliák transzmisszió-spektruma az UV-tartományban.

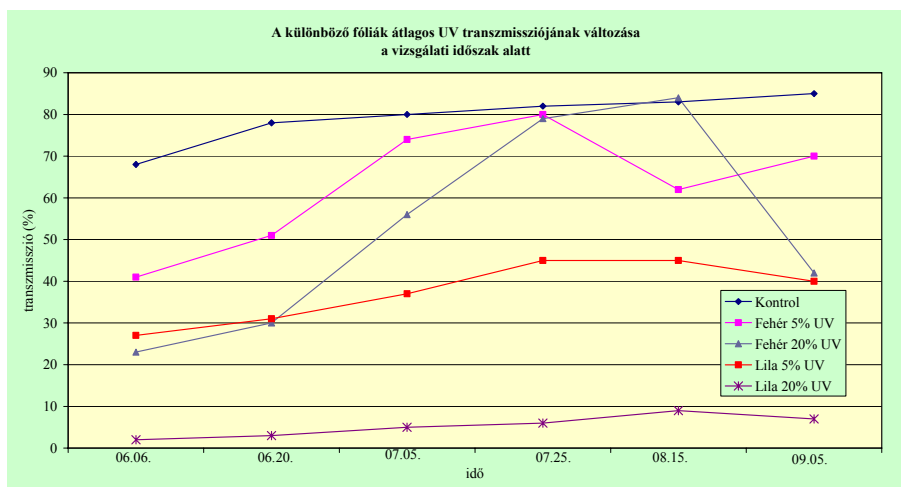
4.2. táblázat. A különböző fóliák transzmissziós spektrumának alakulása.

Jellemző	Exponátlan fóliák transzmissziója (%)				
	Kontrol	Fehér 5% UV	Fehér 20% UV	Lila 5% UV	Lila 20% UV
Minimum	53,01	20,29	6,84	15,54	0,69
Maximum	84,12	74,80	62,35	41,90	5,71
Átlag	67,96	41,43	23,79	26,56	2,49

A következőkben a különböző minták átlagos transzmisszió-változását mutatom be az idő függvényében (4.5. ábra és 4.3. táblázat).

4.3. táblázat. Különböző fóliák UV transzmissziója az idő függvényében.

Dátum	Fóliák UV-transzmissziója (%)				
	Kontrol	Fehér 5% UV	Fehér 20% UV	Lila 5% UV	Lila 20% UV
2002.06.06.	68	41	23	27	2
2002.06.20.	78	51	30	31	3
2002.07.05.	80	74	56	37	5
2002.07.25.	82	80	79	45	6
2002.08.15.	83	62	84	45	9
2002.09.05.	85	70	42	40	7

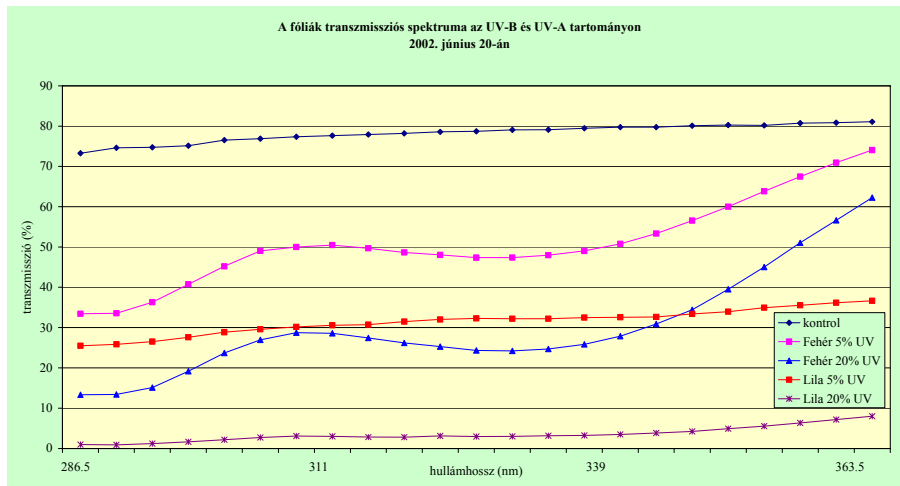


4.5. ábra. Különböző fóliák UV-transzmissziója az idő függvényében.

Az alábbi, 4.6.-4.10 ábrákon és 4.4.-4.8. táblázatokban a különböző mintavételi időpontokhoz tartozó, adott összetételű fóliák transzmisszió-spektrumait szerepeltetem.

4.4. táblázat. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

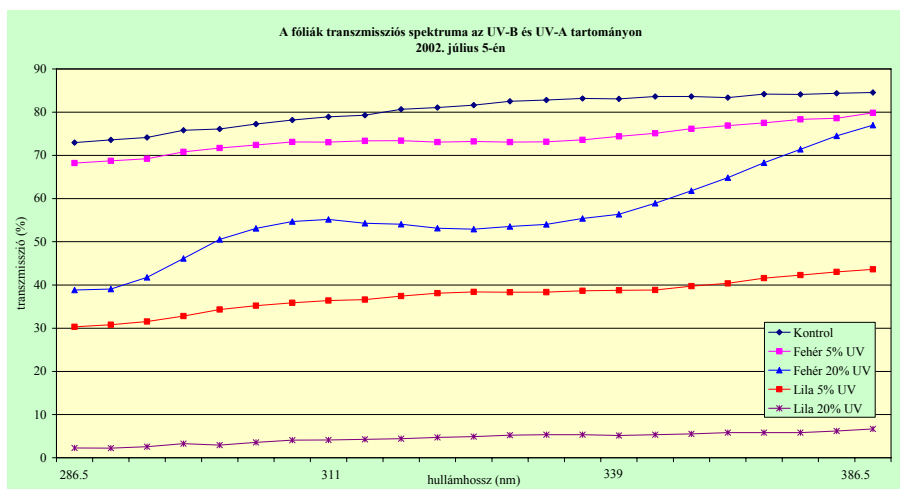
Jellemző	Exponált fóliák transzmissziója (%) [2002.06.20.]				
	Kontrol	Fehér 5% UV	Fehér 20% UV	Lila 5% UV	Lila 20% UV
Minimum	73,29	33,43	13,35	25,48	0,96
Maximum	81,09	74,05	62,28	36,63	7,99
Átlag	78,26	51,03	30,20	31,47	3,49



4.6. ábra. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma 2002.06.20.-án.

4.5. táblázat. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

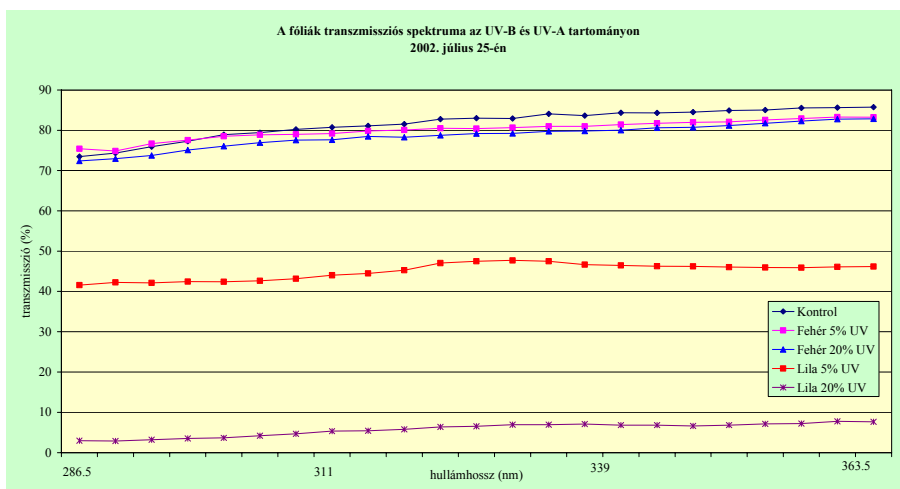
Jellemző	Exponált fóliák transzmissziója (%) [2002.07.05.]				
	Kontrol	Fehér 5% UV	Fehér 20% UV	Lila 5% UV	Lila 20% UV
Minimum	72,96	68,19	38,83	30,33	2,27
Maximum	84,56	79,85	77,01	43,59	6,66
Átlag	80,40	73,79	56,08	37,45	4,58



4.7. ábra. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma 2002.07.05.-én.

4.6. táblázat. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

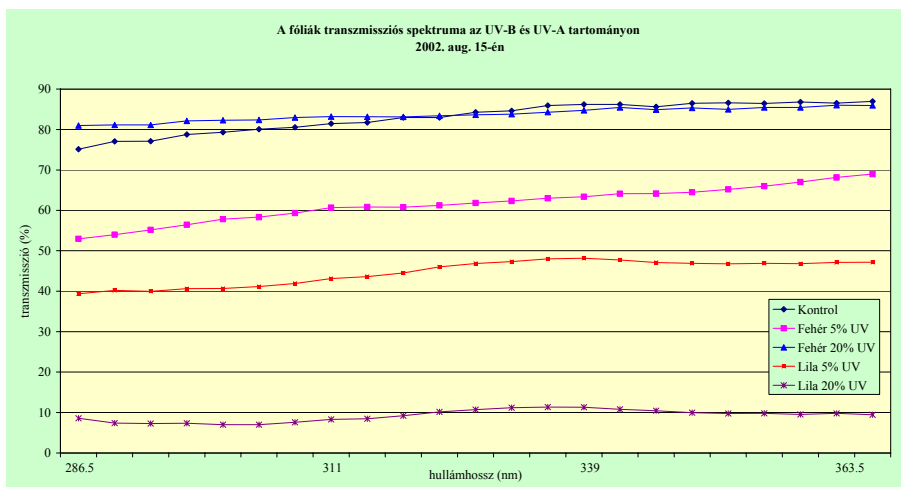
Jellemző	Exponált fóliák transzmissziója (%) [2002.07.25.]				
	Kontrol	Fehér 5% UV	Fehér 20% UV	Lila 5% UV	Lila 20% UV
Minimum	73,48	75,42	72,36	41,56	2,94
Maximum	85,76	83,23	82,84	46,16	7,65
Átlag	81,71	80,12	78,61	45,04	5,75



4.8. ábra. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma 2002.07.25.-én.

4.7. táblázat. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

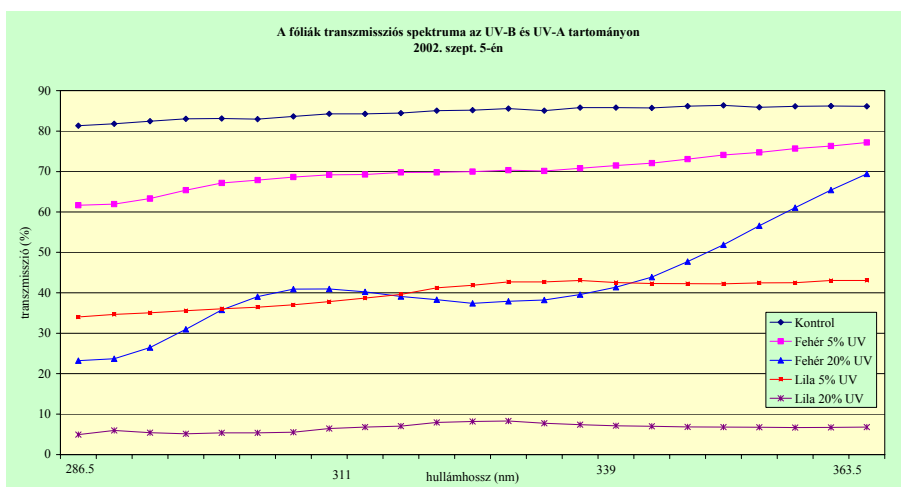
Jellemző	Exponált fóliák transzmissziója (%) [2002.08.15.]				
	Kontrol	Fehér 5% UV	Fehér 20% UV	Lila 5% UV	Lila 20% UV
Minimum	75,10	52,93	80,98	39,35	8,58
Maximum	86,97	68,95	85,94	47,14	9,46
Átlag	83,02	61,55	83,72	44,68	9,23



4.9. ábra. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma 2002.08.15.-én.

4.8. táblázat. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

Jellemző	Exponált fóliák transzmissziója (%) [2002.09.05.]				
	Kontrol	Fehér 5% UV	Fehér 20% UV	Lila 5% UV	Lila 20% UV
Minimum	81,34	61,66	23,21	34,01	4,90
Maximum	86,12	77,18	69,41	43,07	6,78
Átlag	84,62	69,99	42,14	39,86	6,61



4.10. ábra. A különböző fóliák transzmisszió-spektruma 2002.09.05.-én.

Az ábrákból egyértelműen megállapítható, hogy az adott összetételű fóliák transzmissziója az idő függvényében növekszik. A legnagyobb értékeket a kontrol

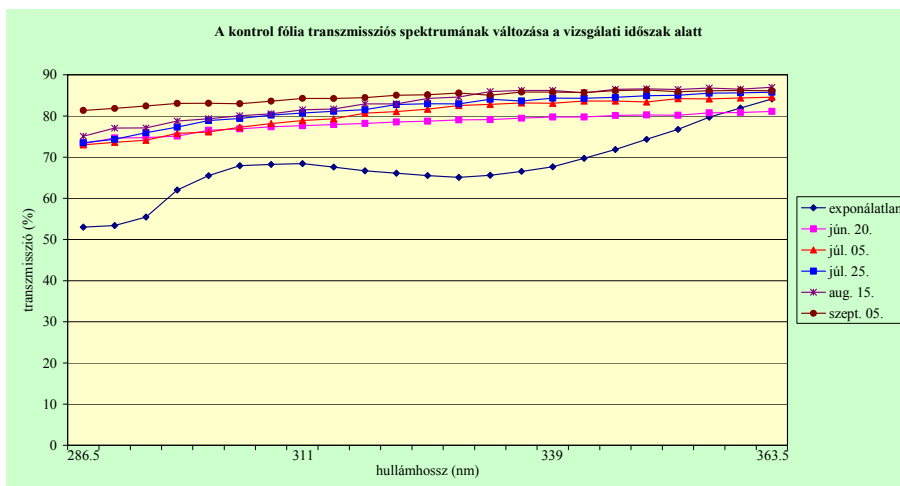
fóliánál, a legkisebbet pedig, a lila színű és 20% UV-stabilizációs adalékanyagot tartalmazó fóliánál figyelhettük meg.

4.1.2 A transzmissziós spektrum változása az anyag összetételének függvényében

A 4.11.– 4.15. ábrákon a már ismert huszonegy hullámhossz függvényében, mind a fehér, mind pedig a lila színű és 5, illetve 20% UV-stabilizációs adalékanyagot tartalmazó fóliák spektrális transzmisszióváltozását ábrázoltam. A kitüntetett adatokat a 4.9.-4.13. táblázatokban foglaltam össze.

4.9. táblázat. A kontrol fólia transzmisszió-spektrumának változása.

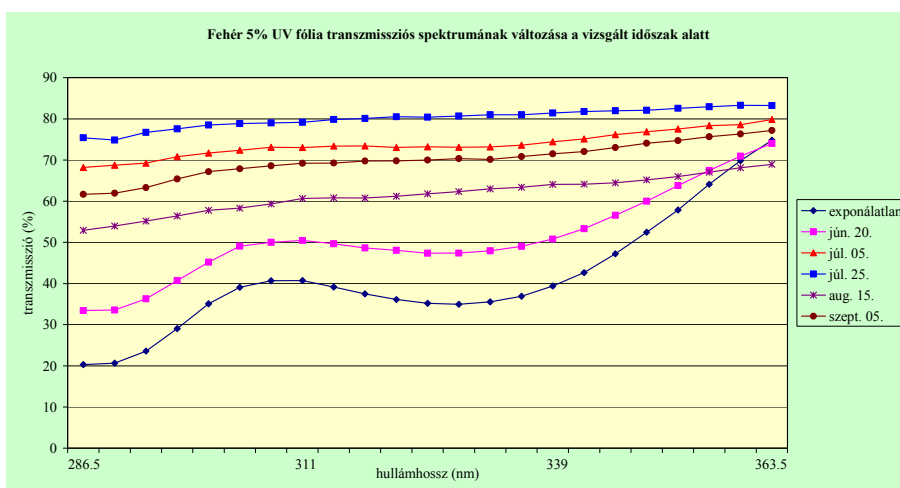
Jellemző	A fóliák transzmissziója (%)					
	Exponálás előtt	2002. 06.20.	2002. 07.05.	2002. 07.25.	2002. 08.15.	2002. 09.05.
Minimum	53,01	73,29	72,96	73,48	75,10	81,34
Maximum	84,12	81,09	84,56	85,76	86,97	86,12
Átlag	67,96	78,26	80,40	81,71	83,02	84,62



4.11. ábra. A kontrol fólia transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

4.10. táblázat. Fehér 5% UV fólia transzmisszió-spektrumának változása.

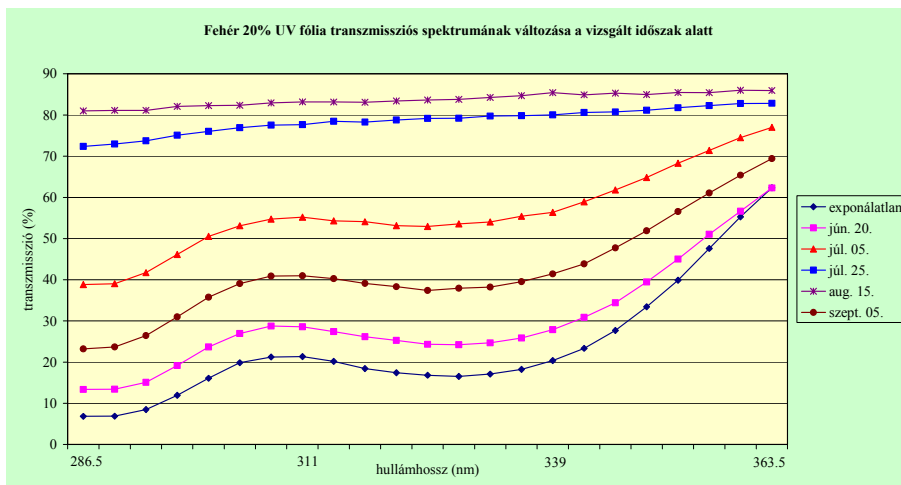
Jellemző	A fóliák transzmissziója (%)					
	Exponálás előtt	2002. 06.20.	2002. 07.05.	2002. 07.25.	2002. 08.15.	2002. 09.05.
Minimum	20,29	33,43	68,19	75,42	52,93	61,66
Maximum	74,80	74,05	79,85	83,23	68,95	77,18
Átlag	41,43	51,03	73,79	80,12	61,55	69,99



4.12. ábra. Fehér 5% UV fólia transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

4.11. táblázat. Fehér 20% UV fólia transzmisszió-spektrumának változása.

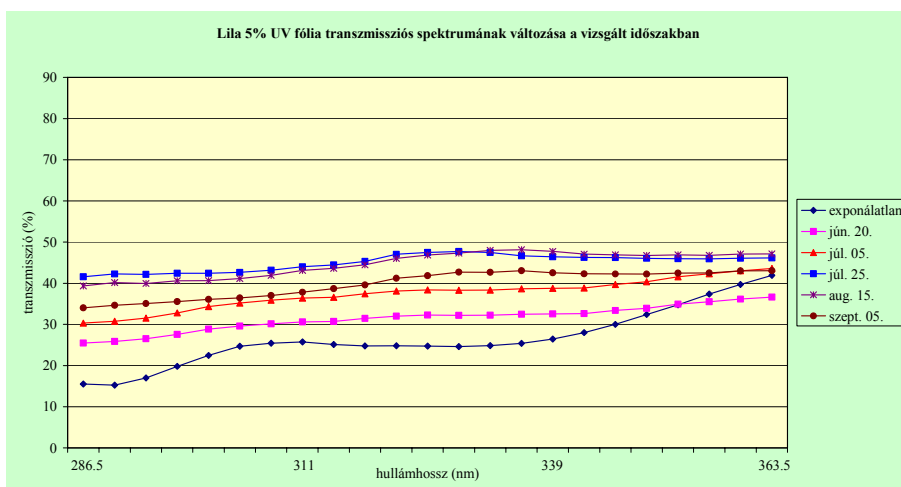
Jellemző	A fóliák transzmissziója (%)					
	Exponálás előtt	2002. 06.20.	2002. 07.05.	2002. 07.25.	2002. 08.15.	2002. 09.05.
Minimum	6,84	13,35	38,83	72,36	80,98	23,21
Maximum	62,35	62,28	77,01	82,84	85,94	69,41
Átlag	23,79	30,20	56,08	78,61	83,72	42,14



4.13. ábra. Fehér 20% UV fólia transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

4.12. táblázat. Lila 5% UV fólia transzmisszió-spektrumának változása.

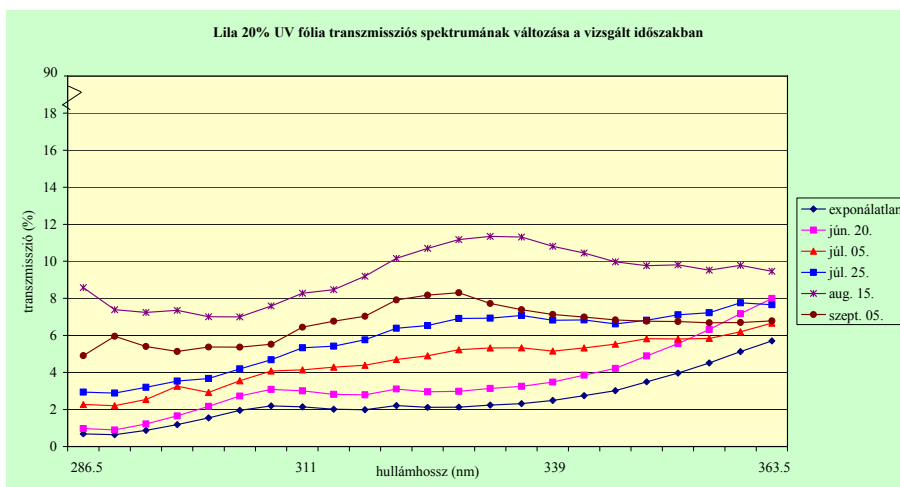
Jellemző	A fóliák transzmissziója (%)					
	Exponálás előtt	2002. 06.20.	2002. 07.05.	2002. 07.25.	2002. 08.15.	2002. 09.05.
Minimum	15,54	25,48	30,33	41,56	39,35	34,01
Maximum	41,90	36,63	43,59	46,16	47,14	43,07
Átlag	26,56	31,47	37,45	45,04	44,68	39,86



4.14. ábra. Lila 5% UV fólia transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

4.13. táblázat. Lila 20% UV fólia transzmisszió-spektrumának változása.

Jellemző	A fóliák transzmissziója (%)					
	Exponálás előtt	2002. 06.20.	2002. 07.05.	2002. 07.25.	2002. 08.15.	2002. 09.05.
Minimum	0,69	0,96	2,27	2,94	8,58	4,90
Maximum	5,71	7,99	6,66	7,65	9,46	6,78
Átlag	2,49	3,49	4,58	5,75	9,23	6,61



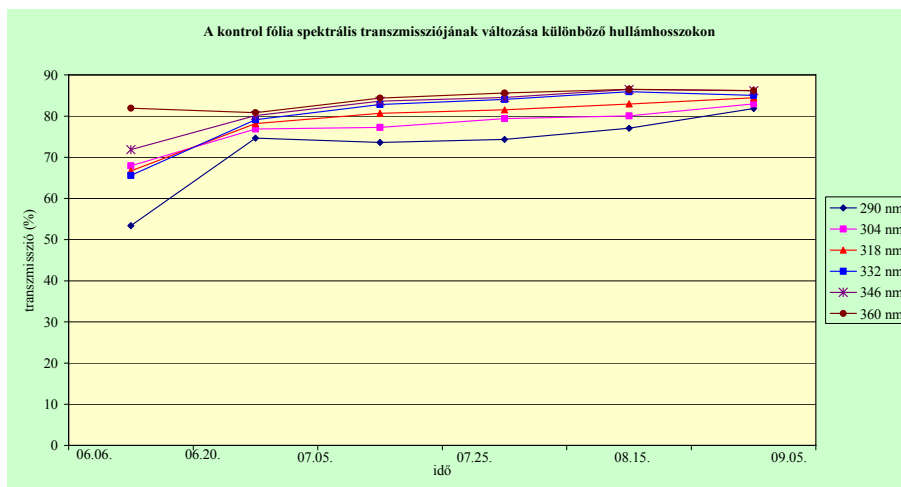
4.15. ábra. Lila 20% UV fólia transzmisszió-spektruma az idő függvényében.

4.1.3 A transzmisszió-spektrum változása a hullámhossz függvényében

A 4.16.-4.20. ábrákon és a 4.14.-4.18. táblázatokkal a hat kitüntetett (290; 304; 318; 332; 346; és 360 nm) hullámhosszra vonatkozólag, az adott összetételű fóliák 2002. június és szeptember hónapok közötti UV-transzmisszióját mutatom be.

4.14. táblázat. A kontrol fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

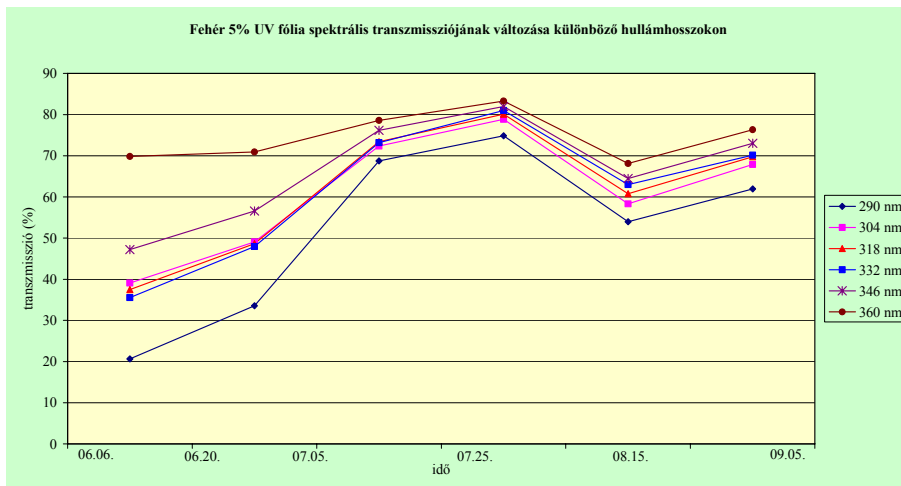
Dátum	Fóliák UV-transzmissziója (%)					
	290 nm	304 nm	318 nm	332 nm	346 nm	360 nm
2002.06.06.	53,40	67,93	66,67	65,60	71,84	81,93
2002.06.20.	74,64	76,88	78,19	79,12	80,13	80,84
2002.07.05.	73,58	77,27	80,68	82,81	83,63	84,37
2002.07.25.	74,33	79,39	81,53	84,05	84,51	85,63
2002.08.15.	77,06	80,04	82,95	85,92	86,48	86,52
2002.09.05.	81,82	82,96	84,45	85,04	86,17	86,19



4.16. ábra. A kontrol fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

4.15. táblázat. Fehér 5% UV fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

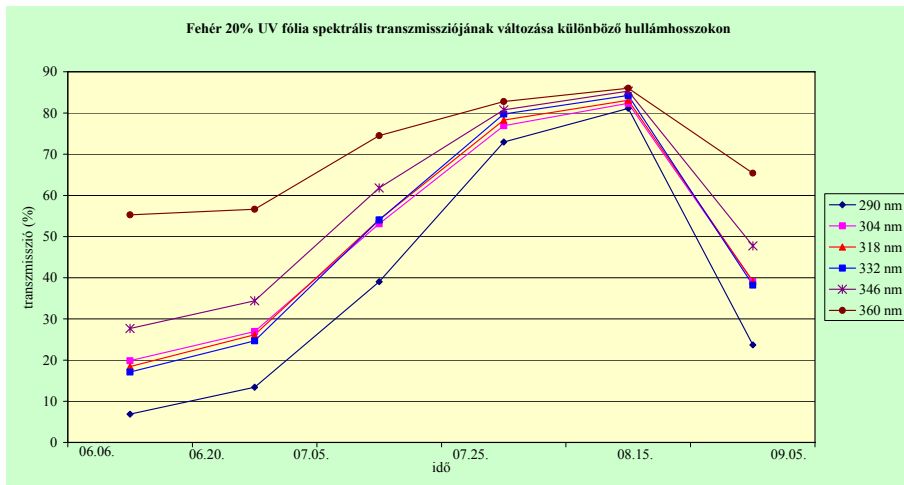
Dátum	Fóliák UV-transzmissziója (%)					
	290 nm	304 nm	318 nm	332 nm	346 nm	360 nm
2002.06.06.	20,67	39,08	37,47	35,55	47,21	69,81
2002.06.20.	33,56	49,05	48,65	47,95	56,56	70,92
2002.07.05.	68,74	72,39	73,43	73,16	76,18	78,59
2002.07.25.	74,86	78,87	80,09	80,99	81,96	83,30
2002.08.15.	53,98	58,30	60,77	62,97	64,46	68,11
2002.09.05.	61,93	67,87	69,75	70,14	73,05	76,32



4.17. ábra. Fehér 5% UV fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

4.16. táblázat. Fehér 20% UV fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

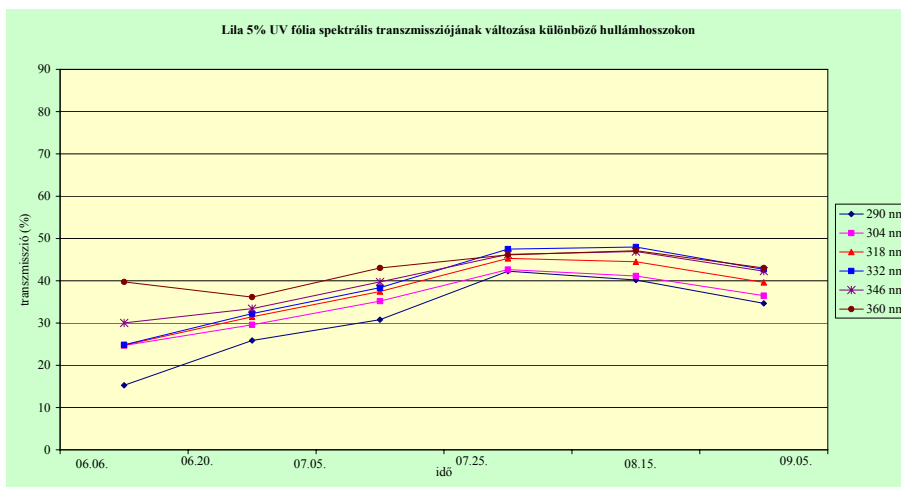
Dátum	Fóliák UV-transzmissziója (%)					
	290 nm	304 nm	318 nm	332 nm	346 nm	360 nm
2002.06.06.	6,86	19,87	18,42	17,11	27,67	55,28
2002.06.20	13,42	26,95	26,16	24,65	34,42	56,64
2002.07.05	39,05	53,09	54,07	54,01	61,80	74,51
2002.07.25	72,96	76,92	78,29	79,75	80,74	82,78
2002.08.15	81,13	82,34	83,08	84,26	85,32	86,01
2002.09.05	23,69	39,07	39,11	38,21	47,74	65,40



4.18. ábra. Fehér 20% UV fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

4.17. táblázat. Lila 5% UV fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

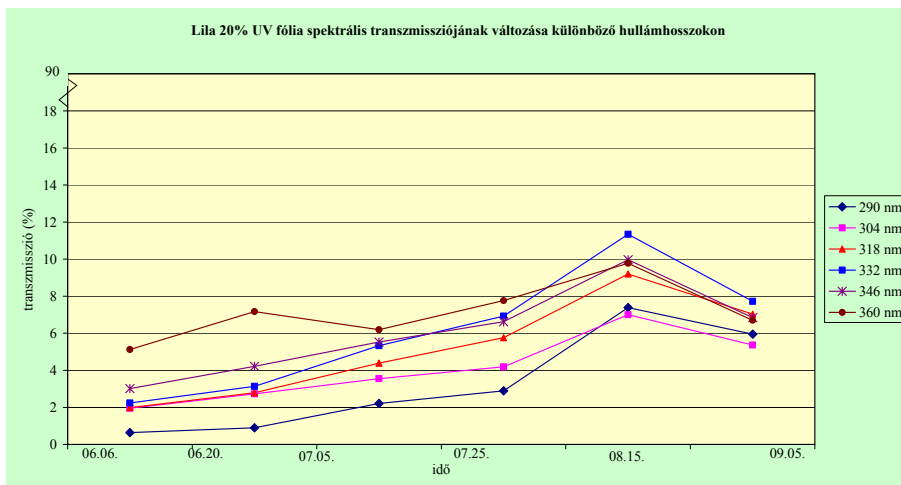
Dátum	Fóliák UV-transzmissziója (%)					
	290 nm	304 nm	318 nm	332 nm	346 nm	360 nm
2002.06.06	15,26	24,70	24,76	24,84	30,01	39,72
2002.06.20	25,87	29,58	31,46	32,22	33,38	36,15
2002.07.05	30,78	35,20	37,44	38,35	39,72	43,02
2002.07.25	42,24	42,62	45,28	47,50	46,24	46,10
2002.08.15	40,18	41,14	44,50	47,99	46,91	47,11
2002.09.05	34,65	36,44	39,61	42,67	42,26	43,02



4.19. ábra. Lila 5% UV fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

4.18. táblázat. Lila 20% UV fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

Dátum	Fóliák UV-transzmissziója (%)					
	290 nm	304 nm	318 nm	332 nm	346 nm	360 nm
2002.06.06.	0,64	1,95	1,99	2,24	3,01	5,12
2002.06.20.	0,90	2,73	2,79	3,14	4,22	7,17
2002.07.05.	2,21	3,54	4,38	5,32	5,52	6,19
2002.07.25.	2,89	4,19	5,76	6,93	6,62	7,76
2002.08.15.	7,39	7,01	9,19	11,34	9,97	9,77
2002.09.05.	5,95	5,36	7,03	7,72	6,83	6,69



4.20. ábra. L (20% UV) fólia UV-transzmissziója a hullámhossz függvényében.

A fóliák 2003. évi transzmisszió-spektrumainak vizsgálata alapján megállapítható volt, hogy azok - hasonlóan a 2002. évi eredményekhez - exponátlan esetben és az UV szűrőanyag-tartalom függvényében lényegesen elkülönülnek, illetőleg ugyancsak lényegi különbség mutatkozik a fóliák színének függvényében is. A mérési eredményekben jelentkező minimális eltérések miatt a 2003. évi vizsgálati eredményeket itt nem ismertetem.

4.1.4 A transzmissziós kutatások eredményei

Laboratóriumi körülmények között végzett 2002 évi vizsgálataim (exponálás nélküli állapot), valamint a környezeti hatásoknak (exponált állapot) kitett fóliákra alapozott sugárzás-áteresztési méréseim alapján megállapítható volt, hogy az UV stabilizációs adalékanyagot nem tartalmazó fóliák UV transzmissziója volt a legnagyobb (az egész tartományon átlagosan 68%-os) értékű, és függetlenül a minták színezőanyag-tartalmától, a magasabb szűrőanyag-tartalmú fóliák áteresztése jelentősen alacsonyabb szintűre adódott. Ugyanakkor az is megfigyelhető volt, hogy a lila fóliák a szinteleneknél nem csak a látható tartományban voltak áthatolhatatlanabbak, hanem az ultrabolya tartományban is. Míg a szintelenek esetén az átlagos áteresztés 5% és 20% UV-stabilizációs adalékanyag-tartalomnál rendre 41% és 24 %, a lilánál ez mindössze csak 27% és 2% értéket mutatott. Megfigyelhettük továbbá azt is, hogy a transzmisszió minden fólia esetén kisebb volt a rövidebb hullámhosszokon, mint a hosszabbakon, valamint a lila fóliák spektrális transzmissziója kisebb mértékben növekedett a hullámhosszal, azaz a vizsgált spektrumtartományon nem rendelkeztek akkora változással. Az effektus legfeltűnőbbben a fehér (20% UV) fólia esetén volt kimutatható. Ez a tény tulajdonképpen nem mond ellent azon várakozásunknak, miszerint az az anyag, amely a látható tartományban igen jó „átlátszóságú” és

jelentős mennyiségű UV szűrő anyagot is tartalmaz, annak az áteresztése a rövidebb hullámhosszoktól a látható tartomány felé haladva erősen növekszik.

Kontrol fólia

Megfigyelhető volt, hogy az UV áteresztés az első 14 nap után mintegy 10% körüli értékkel növekedett meg, ezután már az egymás után következő mintavételi időpontok között, csak egészen kis mértékű növekedés állt elő. A transzmisszió spektrális eloszlásának változása is hasonló képet mutatott. Ennek megfelelően az exponátlan állapotban „hullámzóbb” spektrum már az első 14 nap után jelentősen „kisimult”, melyet követően változása már nem volt számottevő.

Fehér 5% UV fólia

Ez a fólia exponátlan állapotban átlagosan 41%-át engedte át az ultraibolya sugárzásnak. A soron következő mintavételi időpontokban UV transzmissziója jelentősen meg növekedett és július 25-re már gyakorlatilag „beérte” a kontrol fóliát. Így ezt követően megszűntnek tekinthetjük az UV-szűrőanyag hatását. Ezzel együtt megszűnt az exponátlan állapotban tapasztalt, erősen szelektív transzmissziója is, mivel ekkorra már jóval kisebb volt a fólia transzmissziójának hullámhosszfüggése. Itt kell megjegyeznünk, hogy ennél a fóliánál az augusztus 15-i mérések kiugróan alacsony spektrális transzmisszió értékeket mutattak, melyből következően az átlagos UV-transzmisszió is feltűnően „kilóg” a sorból. Az ugyanis elképzelhetetlen, hogy a fólia transzmissziója folyamatosan növekszik (durván kéthetenként 10-15%- kal), az átlagos UV transzmissziós érték az exponátlan állapotban tapasztalt 41% után, a soron következő mintavételi időpontokban rendre 51%, 74% és 80%-ot mutatnak, majd értékük visszaesik 62%-ra, ezután pedig szeptember 15-én, ismét 70% értékre ugrik. A folyamatra fizikailag nagyon nehéz reális magyarázatot adni. Az anyag transzmissziója valószínűleg a minta szennyeződése miatt csökkent le. Így ennél a fóliánál az augusztus 15-i adatokat nem tekinthetjük használhatónak. Ugyanakkor az is tény, hogy az a jelenség miszerint a fóliák transzmissziója szeptember 15-ére a korábban tapasztalható folyamatos növekedés után a július 5-én mért értékre csökkent, már magyarázható jelenség. Valószínűsíthető ugyanis, hogy ez a folyamat az UV-szűrőanyag egyfajta relaxációjának köszönhető. Hasonló jelenség tapasztalható minden nyáron az OMSZ, Robertson-Berger típusú UV-B detektoraink használata esetén is azon néhány hetes időszak után, amikor azok a legnagyobb napi UV-dózisokkal jellemezhető terhelést kapják. A detektorok érzékenysége ilyenkor lecsökken, nem kevés problémát okozva ezzel a szakembernek. Megoldást csak a gyakoribb kalibráció és az ezek utáni „adat-visszakorrigálás” jelenthet. A jelenség feltehetően azzal magyarázható, hogy a nagy UV-fotonzuhatagtól az „előérzékelő” foszfor-réteg elfárad és azután, mikor már nem kap ilyen nagy dózisokat, valamilyen mértékben „magához tér”.

Fehér 20% UV fólia

Hasonlóan a fehér (5% UV) fóliához ennek is augusztus 15-ig növekedett a transzmissziója, majd ezt követően a szeptember 5-ei mintavételkor számottevően alacsonyabb értéket mutatott, melyet valahová a június 20.-ai, és a júl. 5.-i értékek közé illeszthetünk. Azt a feltételezést, hogy az előérzékelő-réteg relaxációs folyamatáról van szó, megerősíti az a tény is, hogy a fólia transzmissziós spektrumának alakja, tehát a transzmisszió hullámhosszfüggése is „visszatért”, a kisebb expozíciós időknél tapasztalt alakhoz. Mindazonáltal ugyanazt tapasztaltuk, mint a szintén szintelen, de csak 5% UV-szűrő anyagot tartalmazó fólia esetében, azaz szűk 2 hónap folyamatos és természetes nyári UV-expozíció után az UV-sugárzás elleni védőhatása, gyakorlatilag megszűnik.

Lila 5% UV fólia

Ennek a fóliának a transzmissziója is - bár kisebb gradienssel, mint az előzőekben bemutatottaknál- az expozíciós idő függvényében folyamatosan növekedett. Ezt követően július 25-e és augusztus 15-e között már gyakorlatilag nem változott, illetve utána itt is beindult a vélt relaxáció. Meg kell jegyezni, hogy jelen esetben a relaxációs folyamat után nem állt vissza az exponátlan állapothoz közeli transzmisszió-hullámhossz függés.

Lila 20% UV fólia

A legnagyobb UV-szűrést biztosító fólia UV-transzmissziójának növekedése lényegesen erősebb, mint a hasonlóan színű, de 5% UV-szűrőanyagot tartalmazó társáé. A legnagyobb abszolút értékű UV-védelmet biztosítja hosszabb időszak után is, mivel méréseim szerint átlagos UV-áteresztése még a legmagasabb, augusztus 15-ei állapot esetén is 10% alatt maradt. A relaxációs folyamatot itt is megfigyelhettük, melynek eredményeképpen szeptember 15-ére az átlagos UV-transzmissziója 7%-ra csökkent, de hasonlóan a lila (5% UV) fóliáéhoz, itt sem állt vissza az eredeti spektrumalak.

4.2 A fóliák mechanikai jellemzőinek meghatározása

A szakítószilárdsági vizsgálatokat a 3.4 pontban részletesen ismertetett módszerek, valamint az ott közölt szabványok előírásainak megfelelően végeztem el. A következő három diagramon a szabványban előírt minimális, maximális és a kettő közé eső, valamint az általam megválasztott keresztfej-elmozdulással végrehajtott szakítási vizsgálatok diagramjai láthatóak (4.21. - 4.23. ábrák).

A 4.19. táblázatban a 4.21. - 4.23. ábrákon bemutatott szakítóvizsgálatok mért és számított eredményeit foglaltam össze.

4.19. táblázat. A szakítóvizsgálatok mért és számított eredményei.

Vizsgálati sebesség: 25 mm/min				
	1. minta	2. minta	3. minta	Átlag
Szakítószilárdság* [MPa]	27,38	28,72	27,12	27,74
Fajlagos nyúlás** [%]	762,30	788,21	771,56	774,02
Folyáshatár*** [MPa]	9,67	9,46	9,53	9,55
Vizsgálati sebesség: 250 mm/min				
	1. minta	2. minta	3. minta	Átlag
Szakítószilárdság* [MPa]	30,06	31,12	29,11	30,09
Fajlagos nyúlás** [%]	778,5	787,31	772,89	779,56
Folyáshatár*** [MPa]	10,14	9,85	9,83	9,94
Vizsgálati sebesség: 500 mm/min				
	1. minta	2. minta	3. minta	Átlag
Szakítószilárdság* [MPa]	29,74	29,45	30,20	29,79
Fajlagos nyúlás** [%]	766,97	768,98	775,12	770,35
Folyáshatár*** [MPa]	10,53	10,48	10,41	10,47

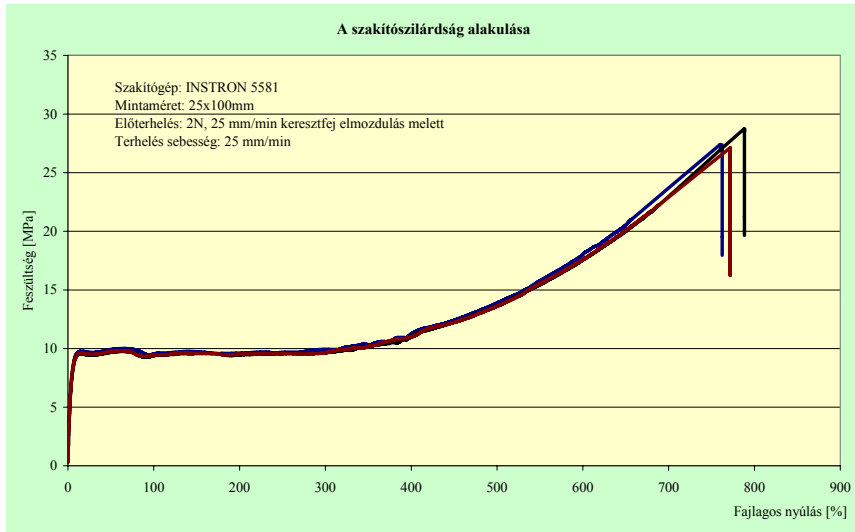
* A legnagyobb terhelőerőhöz tartozó feszültség (feszültség: a terhelőerő és a próbatest eredeti keresztmetszetének hányadosa) [MSZ EN 10002-1, 1994].

** értékét a $\frac{\Delta l - l}{l} \cdot 100$ képlet alapján határozzuk meg,

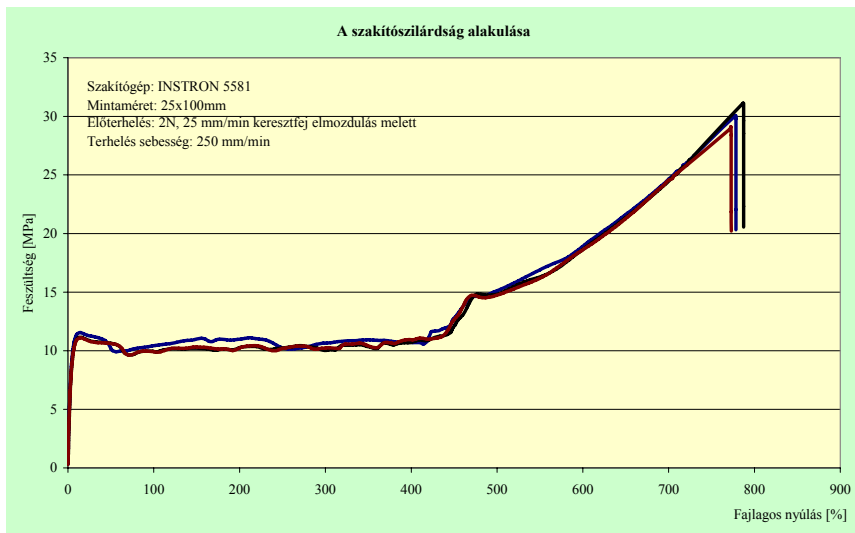
ahol: l : a befogópofák közötti eredeti távolsága, 2N-os előfeszített állapotban [mm],

Δl : a befogópofák közötti távolság növekedése [mm].

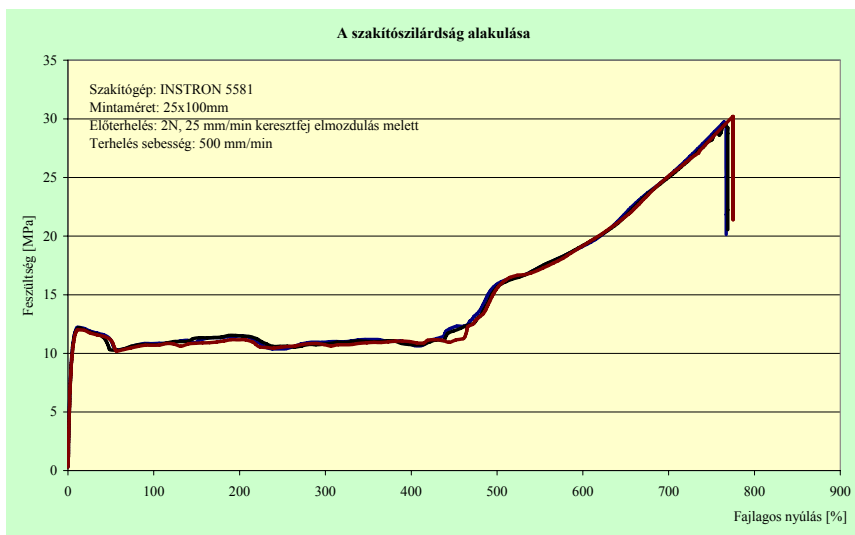
*** Az a feszültségérték, melytől a próbatest képlékeny alakváltozása a terhelőerő továbbnövekedése nélkül is tovább folyik.



4.21. ábra. A fólia szakítóvizsgálatai (sebesség: 25 mm/min).



4.22. ábra. A fólia szakítóvizsgálatai (sebesség: 250 mm/min).



4.23. ábra. A fólia szakítóvizsgálatai (sebesség: 500mm/min).

A mért és számított eredményekre a reológia méréseknél volt szükségem, a 4.19. táblázatban közölt eredményeken kívül a Poisson tényező meghatározása is szükségessé vált.

A 3.4 pontban meghatározott eljárás szerint megállapított Poisson tényezők értékeit a 4.20. táblázat tartalmazza.

4.20. táblázat. A Poisson tényező értékei.

Megnevezés	1. minta	2. minta	3. minta	4. minta	5. minta	Átlag
Poisson tényező	0,4184	0,3912	0,4178	0,4054	0,3889	0,4043

4.3 A fóliák reológiai jellemzőinek meghatározása

A szakítógépen végzett méréseim során meghatároztam a t_i időpontokhoz tartozó ε_i nyúlási értékeket. Abban az esetben, ha ezen mérési pontokhoz illesztjük az

$$\varepsilon(t) = \sigma_a \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) - \frac{1}{E_3} e^{-\frac{t}{T_3}} \right]$$

kúszási görbe függvényét, akkor a legkisebb

négyszetek módszerének felhasználásával kapjuk a keresett paramétereket (3.6.1. fejezet). A 2003.06.06. és 2003.10.14-e között kihelyezett különböző összetételű fóliák reológiai vizsgálatát követően, a 4.21. táblázatban látható paramétereket határoztam meg.

4.21. táblázat. A különböző fóliatípusok reológiai paramétereinek változása.

Jellemző	Mintavételezés időpontja				
	2003.06.06.	2003.07.10.	2003.08.15.	2003.09.18.	2003.10.14.
Fehér (5% UV-stabil adalékanyag)					
E_1 [MPa]	46,32	99,29	125,02	146,69	140,87
E_3 [MPa]	60,08	25,59	129,86	120,25	108,13
T_3 [sec]	1952	5782	3492	7620	5319
Fehér (20% UV-stabil adalékanyag)					
E_1 [MPa]	44,24	84,67	86,89	71,25	74,00
E_3 [MPa]	51,91	99,29	63,59	8,33	11,45
T_3 [sec]	1812	2098	4258	8702	9624
Lila (5% UV-stabil adalékanyag)					
E_1 [MPa]	56,55	86,63	125,72	113,04	108,32
E_3 [MPa]	48,18	21,53	100,26	122,64	34,85
T_3 [sec]	3378	3411	6170	3671	8463
Lila (20% UV-stabil adalékanyag)					
E_1 [MPa]	67,97	64,36	93,97	117,29	87,75
E_3 [MPa]	73,52	91,19	78,65	36,97	12,19
T_3 [sec]	2646	1628	2881	7970	4315

A reológiai vizsgálatok során nyert paraméterek felhasználásával és a végeselem-módszer, valamint a COSMOS/M program alkalmazásával, a különböző fóliákban keletkező feszültségeket és deformációkat, illetve azok időbeli változásait az alábbi egyenletről számíthatjuk (3.3):

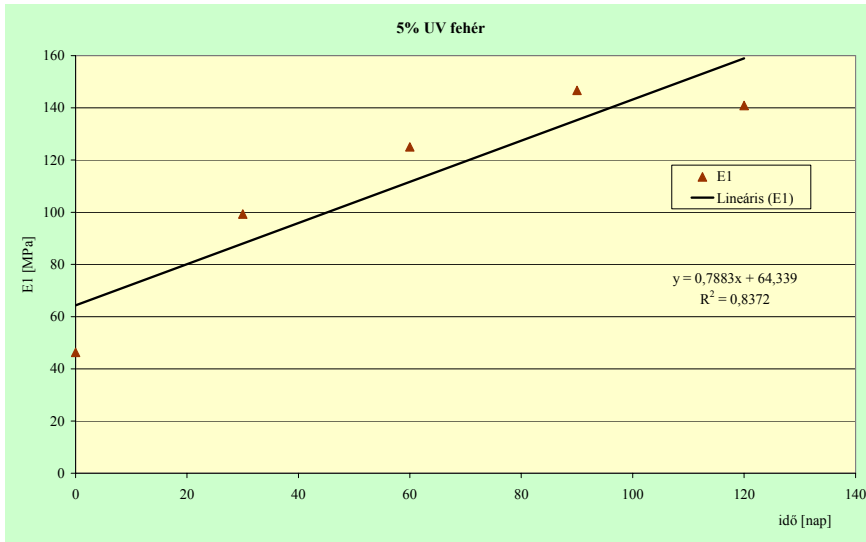
$$\mathbf{F}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \tau} \partial \tau + \mathbf{I} \int_0^t K(t-\tau) \frac{\partial \mathbf{E}_0}{\partial \tau} \partial \tau$$

ahol:

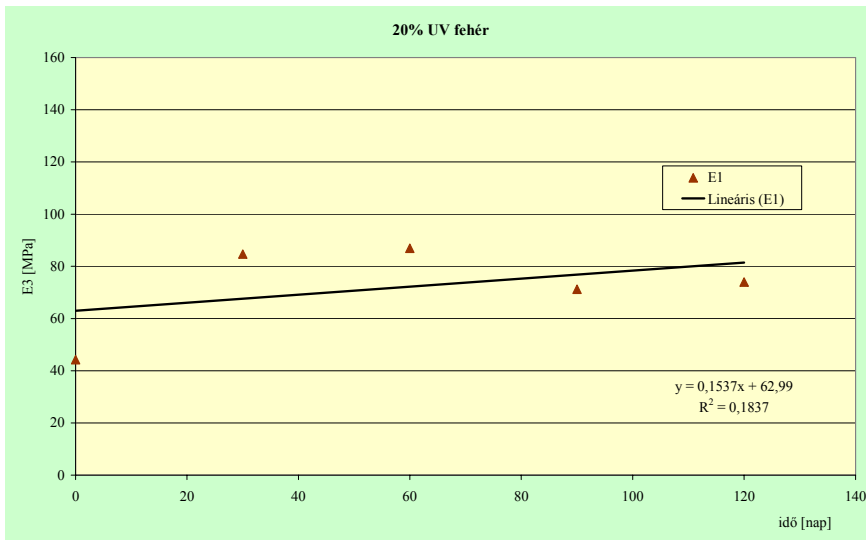
F	feszültségdeviátor tenzor, [Nm ⁻²]
E	deformációs deviátor tenzor, [1]
E₀	deformációs gömbtenzor, [1]
I	egységtenzor, [1]
<i>G(t-τ)</i>	nyírási relaxációs modulus,
<i>K(t-τ)</i>	térfogati relaxációs modulus,
<i>t</i> és <i>τ</i>	idő.

A következő, 4.24. - 4.35. ábrák grafikonjainak segítségével a táblázat eredményei szerinti környezeti hatások okozta tendenciákat szemléltetem.

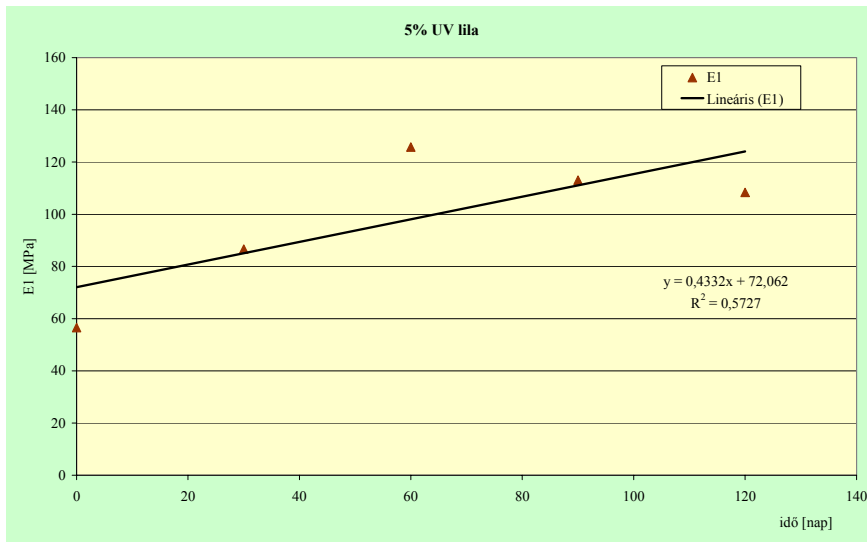
Ezek alapján már meghatározhatók a kritikus szilárdságtani értékek is. A 4.21. táblázat, a kihelyezési idő függvényében a (2.33) egyenletben szereplő és a rugókból (E_1 , E_3), illetve csillapításból (T_3) összeállított mechanikai modell paramétereinek változását mutatja. (4.24. - 4.35. ábrák). Az értékek változásának trendjét lineáris közelítéssel szemléltetik az egyenes vonalak, melyek egyenleteit az egyes ábrákon szintén feltüntettem.



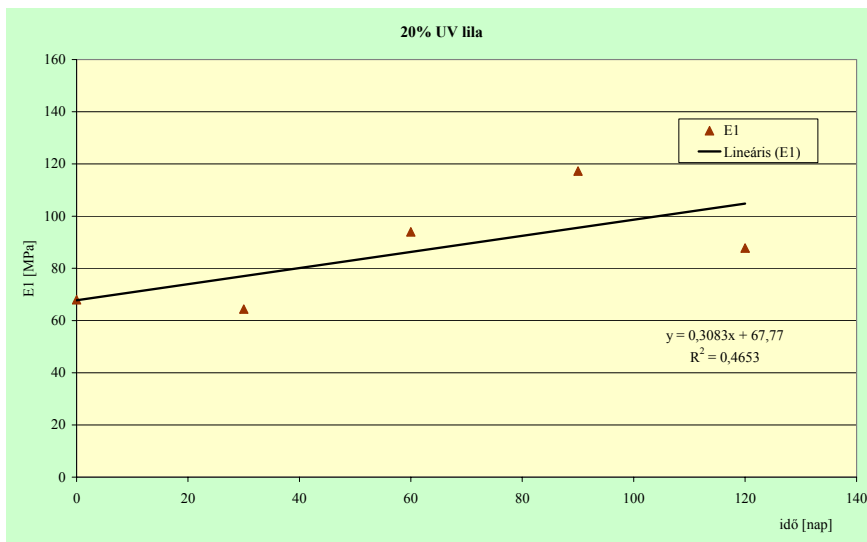
4.24. ábra. Fehér fólia E_1 paraméterének változása az idő függvényében (5% UV-stabilizációs adalék).



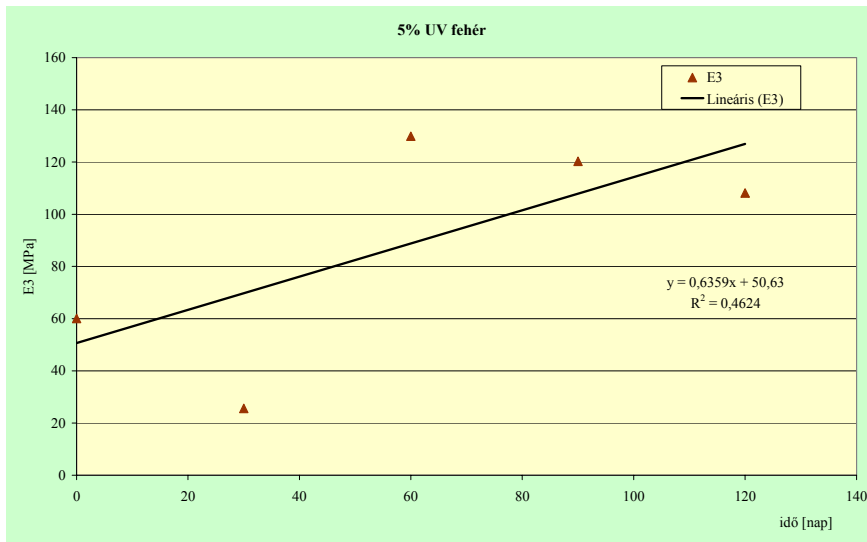
4.25. ábra. Fehér fólia E_1 paraméterének változása az idő függvényében (20% UV-stabilizációs adalék).



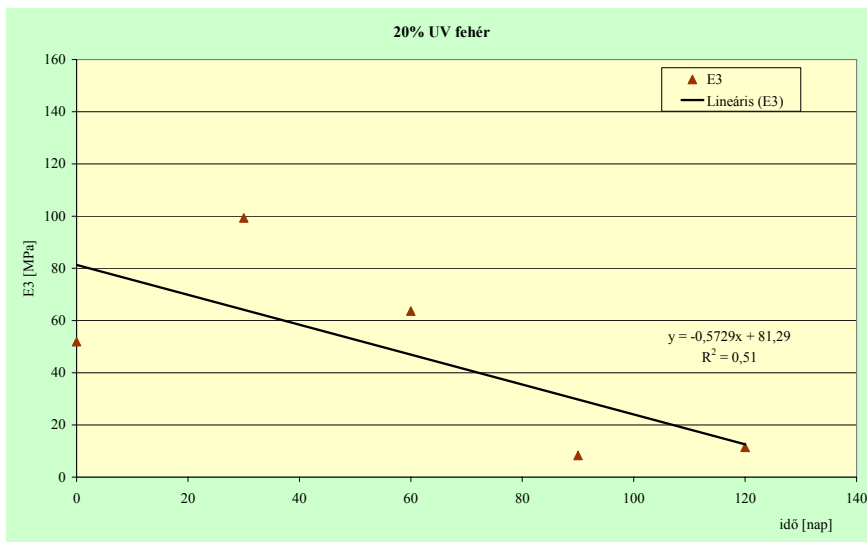
4.26. ábra. Lila fólia E_I paraméterének változása az idő függvényében (5% UV-stabilizációs adalék).



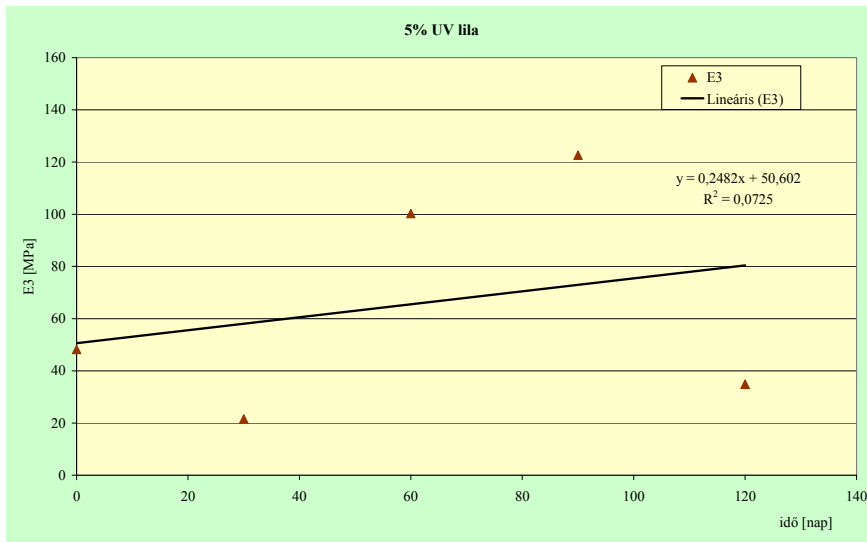
4.27. ábra. Lila fólia E_I paraméterének változása az idő függvényében (20% UV-stabilizációs adalék).



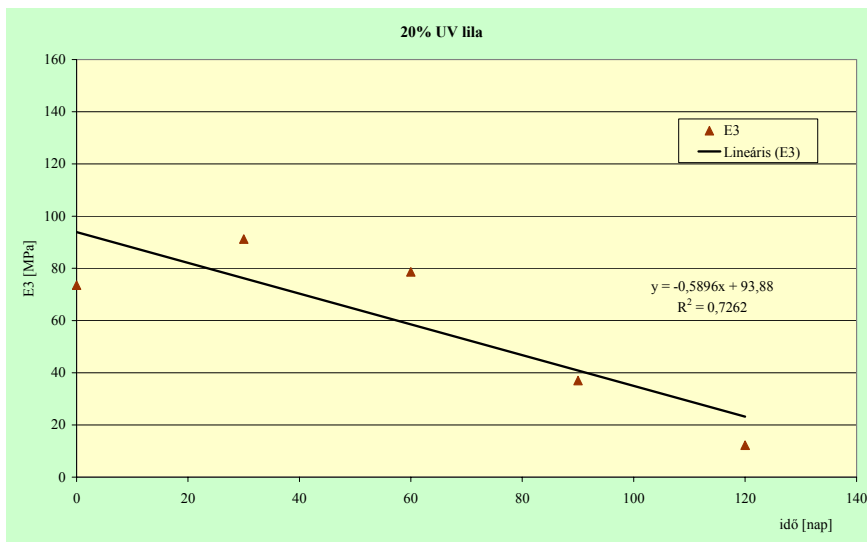
4.28. ábra. Fehér fólia E_3 paraméterének változása az idő függvényében (5% UV-stabilizációs adalék).



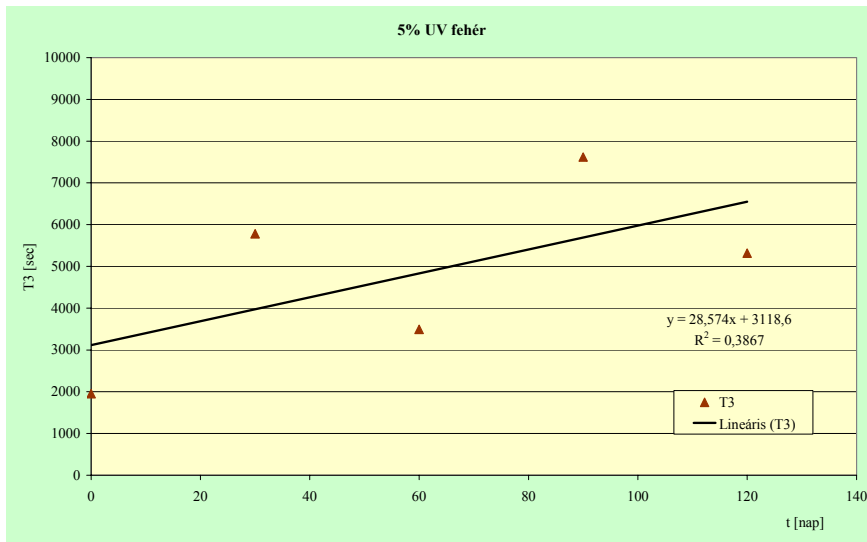
4.29. ábra. Fehér fólia E_3 paraméterének változása az idő függvényében (20% UV-stabilizációs adalék).



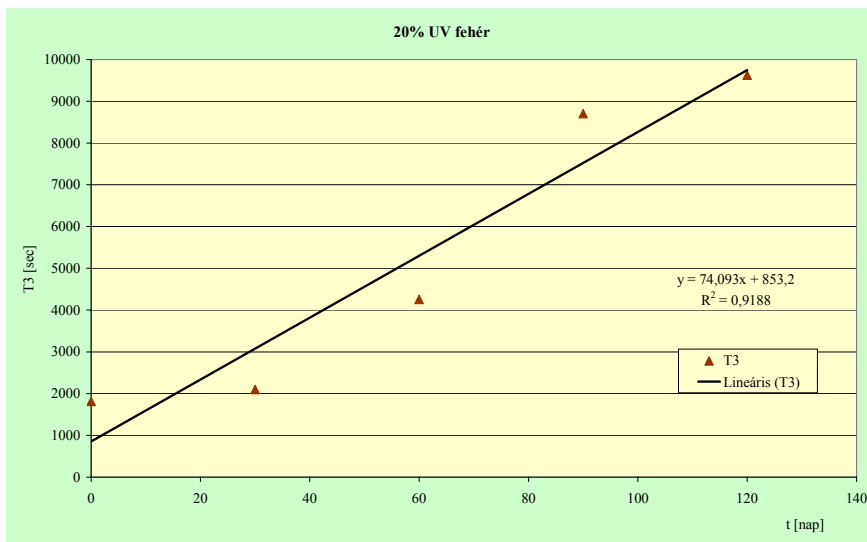
4.30. ábra. Lila fólia E_3 paraméterének változása az idő függvényében (5% UV-stabilizációs adalék).



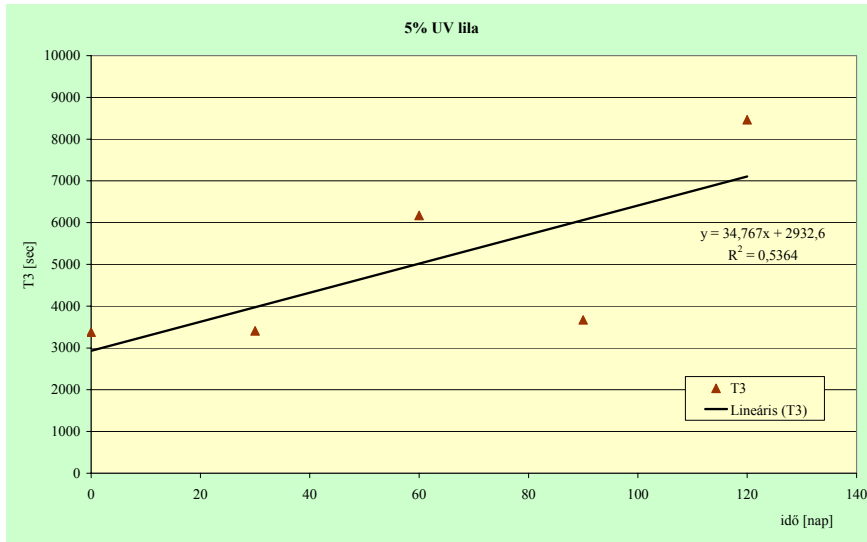
4.31. ábra. Lila fólia E_3 paraméterének változása az idő függvényében (20% UV-stabilizációs adalék).



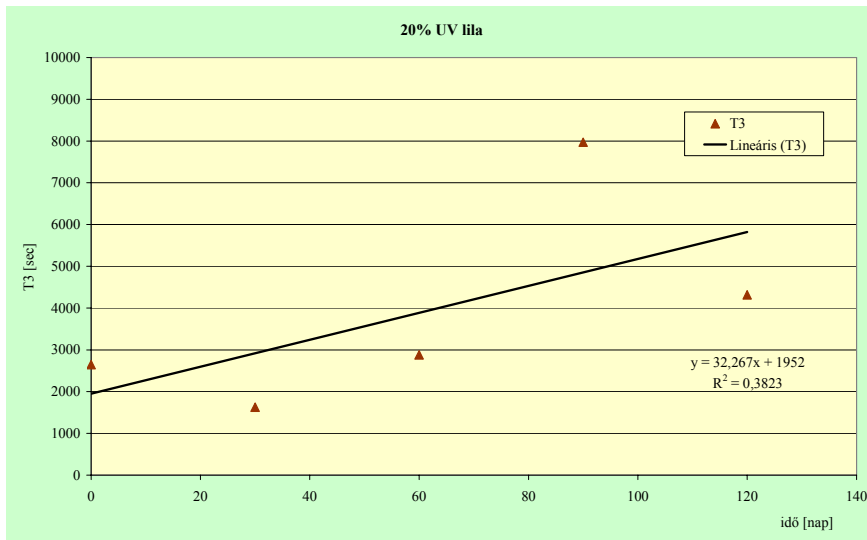
4.32. ábra. Fehér fólia T_3 paraméterének változása az idő függvényében (5% UV-stabilizációs adalék).



4.33. ábra. Fehér fólia T_3 paraméterének változása az idő függvényében (20% UV-stabilizációs adalék).



4.34. ábra. Lila fólia T₃ paraméterének változása az idő függvényében (5% UV-stabilizációs adalék).



4.35. ábra. Lila fólia T₃ paraméterének változása az idő függvényében (20% UV-stabilizációs adalék).

A diagramokból látható, hogy a lineáris közelítés nem illeszkedik megfelelően a mérési pontokhoz. Például a 4.35. ábrán a lineáris illeszkedése $R^2=0,38$, míg harmadfokú közelítés esetén ez az érték 0,88. Ha az lenne a cél, hogy interpolálással határozzunk meg számértékeket, feltétlenül a harmadfokú függvényeket illene használni. Ettől két ok miatt tértem el, az első: a jelen vizsgálat célja az volt, hogy megtudjuk milyen hatása van a színek és az adalékanyagoknak a mechanikai tulajdonságokra. A harmadfokú egyenletekből nem nagyon lehet a trendet kiolvasni, és az ábrák sem adnak egyértelmű választ. A lineáris közelítés ebből a szempontból sokkal szemléletesebb (pl. a meredekség révén). A második ok: a szakirodalomban

szokásos rugalmassági modulus meghatározásához az $E = \frac{E_1 E_3}{E_1 + E_3}$ összefüggés

szolgál. Azért, hogy viszonylag könnyen kezelhető időfüggvényt kapjunk le kell mondani a magasabb fokú közelítésekről. Egyes esetekben így is az $E(t)$ kifejezés bonyolult tört függvényt ad eredményül.

A különböző összetételű fóliatípusok esetében a modell-paraméterek segítségével meghatároztam a (2.21) differenciálegyenletben szereplő „ E ” rugalmassági modulus változását (4.22. táblázat). Abban az esetben ha a (2.33) egyenletet összevetjük a (2.21) egyenlettel, akkor a differenciálegyenletben szereplő rugalmassági modulus:

$$E = \frac{E_1 E_3}{E_1 + E_3}$$

szerint alakul. A rugalmassági modulusnak az időtől való függését, valamint a változás trendjét úgy kapjuk meg, hogy a fenti összefüggésbe behelyettesítjük a táblázatban található lineáris függvényeket. Így pl. az 5% UV-stabilizációs adalékanyagot tartalmazó lila fóliánál, 4.21. táblázat szerint:

$$E = \frac{(0,4332x + 72,062) \cdot (0,2482x + 50,602)}{(0,4332x + 72,062) + (0,2482x + 50,602)} = 0,157x + 29,85$$

értéküre adódik, ahol x a napok száma. Abban az esetben, ha a reológiai hatásoktól eltekintünk, akkor a (2.21) egyenlet a közismert:

$$\sigma = E \varepsilon$$

Hooke-törvénynek megfelelő alakot venné fel. Ennek megfelelően kihelyezéskor a $\sigma \approx 30\varepsilon$, 120 nap múlva, október 14-én pedig, a $\sigma \approx 48\varepsilon$ összefüggés adódott.

4.22. táblázat. Az E rugalmassági modulus alakulása.

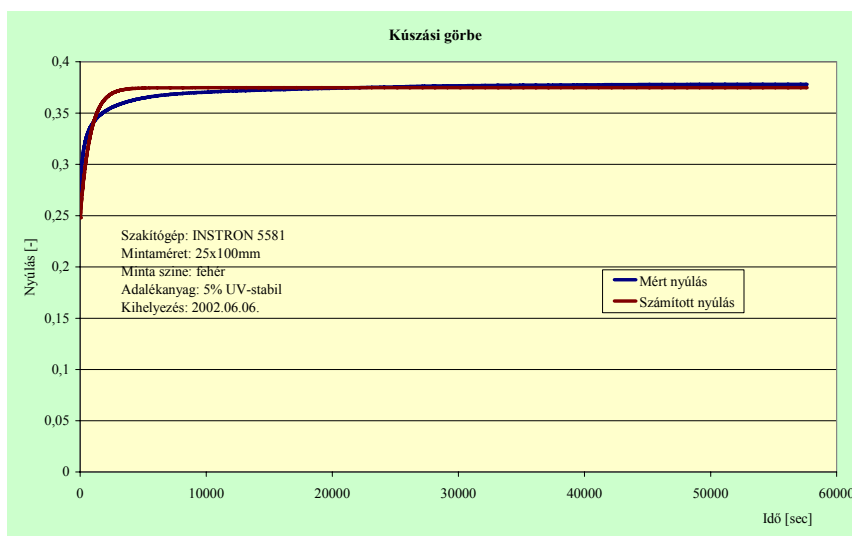
Összetétel	Összefüggés	Diagram
Fehér (5% UV)	$E(\tau) = 0,352\tau + 28,4$	
Lila (5% UV)	$E(\tau) = 0,157\tau + 29,85$	
Fehér (20% UV)	$E(\tau) = 0,21\tau + 128 - \frac{13000}{-0,42\tau + 144}$	
Lila (20% UV)	$E(\tau) = 0,648\tau + 413 - \frac{60000}{-0,28\tau + 162}$	

A táblázat alapján azt állapítottam meg, hogy a kisebb (5%) UV-tartalomnál az E rugalmassági modulus a τ függvényében növekszik, azaz az anyag keményedik, míg a magasabb (20%) UV-tartalom mellett pedig csökken, azaz lágyul. A késleltetési idő (késleltetési időnek nevezzük ami alatt a visszatartott deformáció kb.63%-a létrejön) minden esetben növekvő tendenciát mutat.

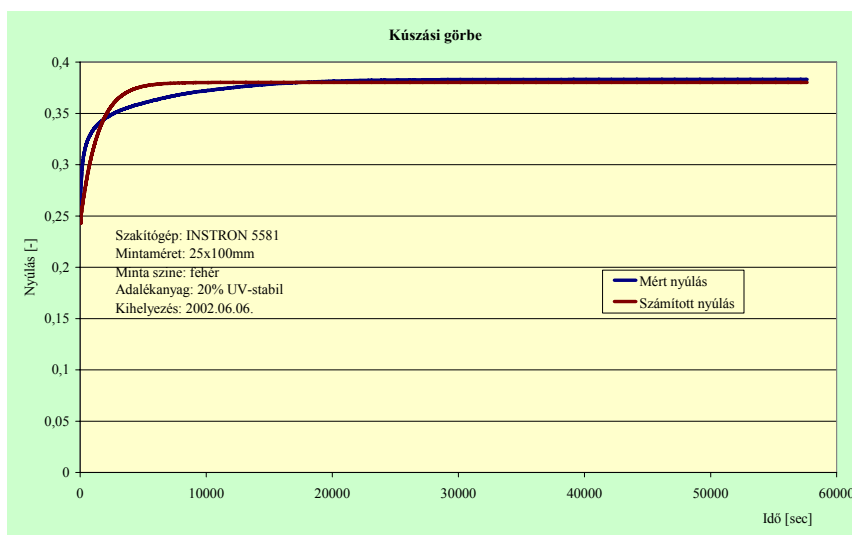
Az E rugalmassági modulus többek között a (2.21) $[\sigma + \rho\dot{\sigma} = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}]$ összefüggésben is szerepel. Ha a terhelés felvitel nagyon lassú, akkor $\dot{\sigma}$ és $\dot{\varepsilon}$ elhanyagolható és az egyenlet Hooke-törvénnyé alakul. Ezt grafikusán mutatja a 2.11. ábra OP_1 egyenese. A P-T test kúszási modelljének E_1 és E_3 értékeit kúszásvizsgálattal határoztam meg. A kúszásvizsgálat során viszont célszerű a gyors

felterhelés, hogy a $\sigma(t=0) = \sigma_a$ minél jobban teljesüljön. A mérési eredményekből a 3.1 egyenlet alapján számíthatók az E_1 és E_3 paraméterek. Vagyis összefoglalva : gyors terheléssel felvitelből lehet olyan jellemzőt számolni, amit nagyon lassú terheléssel felvitelből lehetne mérni.

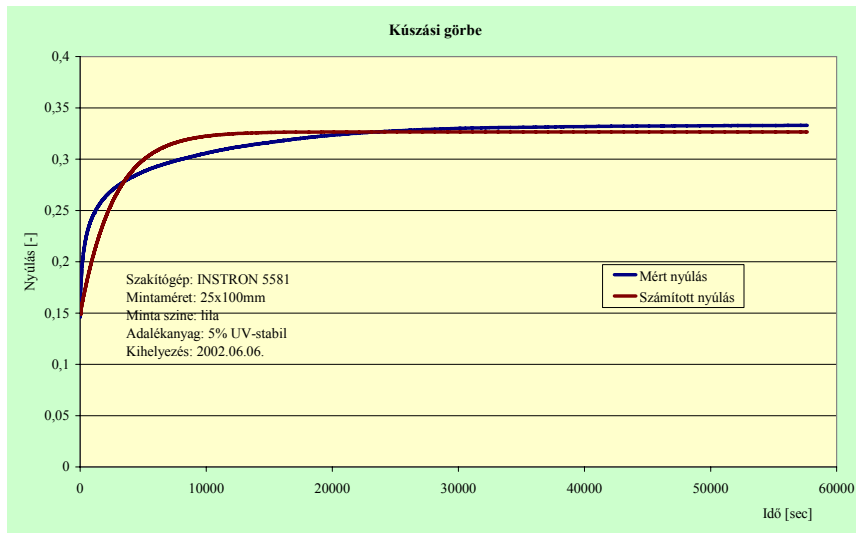
A következő 4.36. - 4.39. ábrán a különböző összetételű fóliák exponálás előtti, azaz kihelyezéskori idő-nyúlás diagramját mutatom be. A diagramokon a y-tengelyen a nyúlást a $\Delta l/l$ képlet alapján határoztam meg.



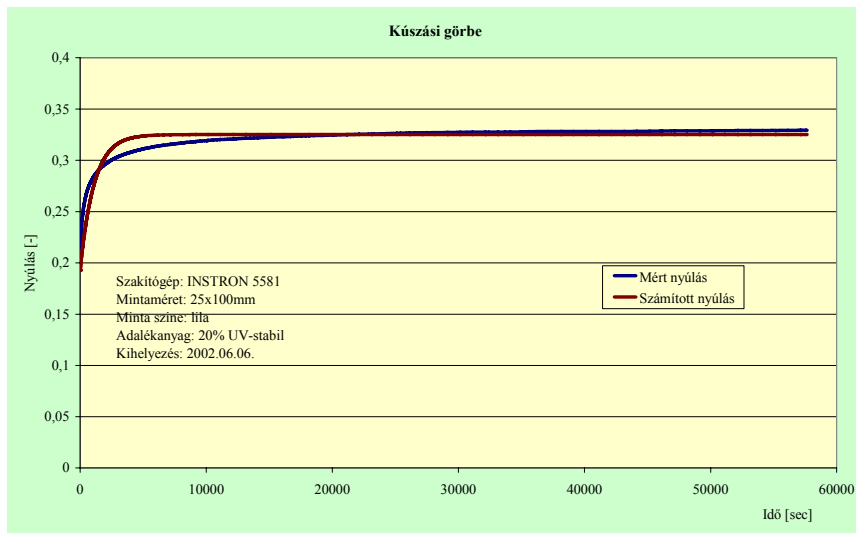
4.36. ábra. Fehér fólia kúszási görbéje exponálás előtt (5% UV-stabilizációs adalék).



4.37. ábra. Fehér fólia kúszási görbéje exponálás előtt (20% UV-stab. adalék).

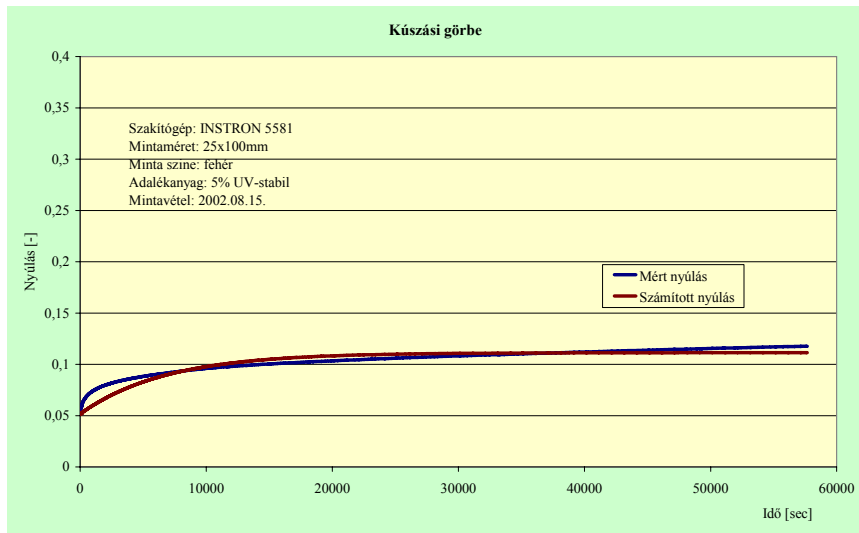


4.38. ábra. Lila fólia kúszási görbéje exponálás előtt (5% UV-stabilizációs adalék).

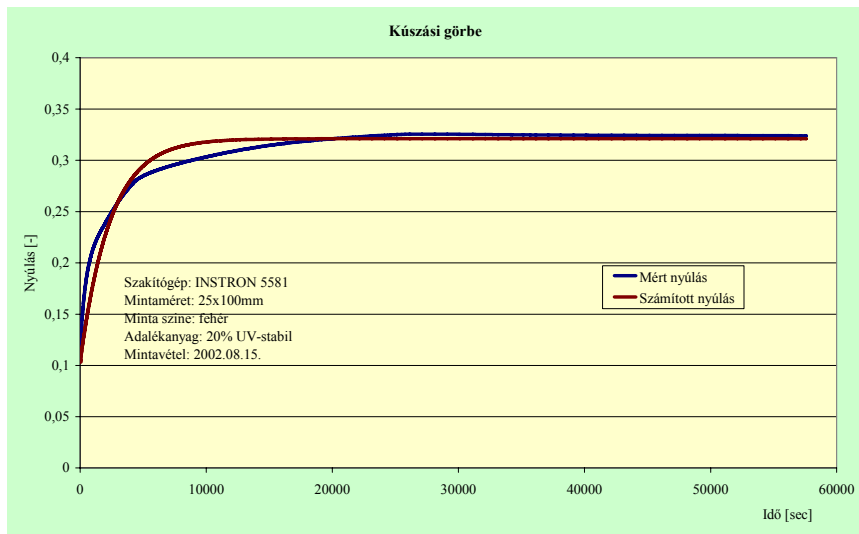


4.39. ábra. Lila fólia kúszási görbéje exponálás előtt (20% UV-stabilizációs adalék).

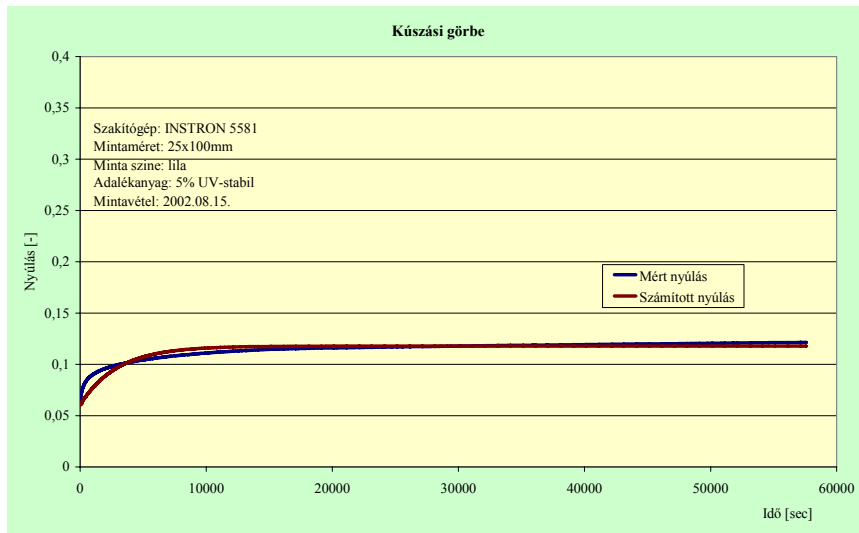
A következő 4.40. - 4.43. ábrákon a különböző összetételű fóliák idő-nyúlás diagramja látható exponálás alatt.



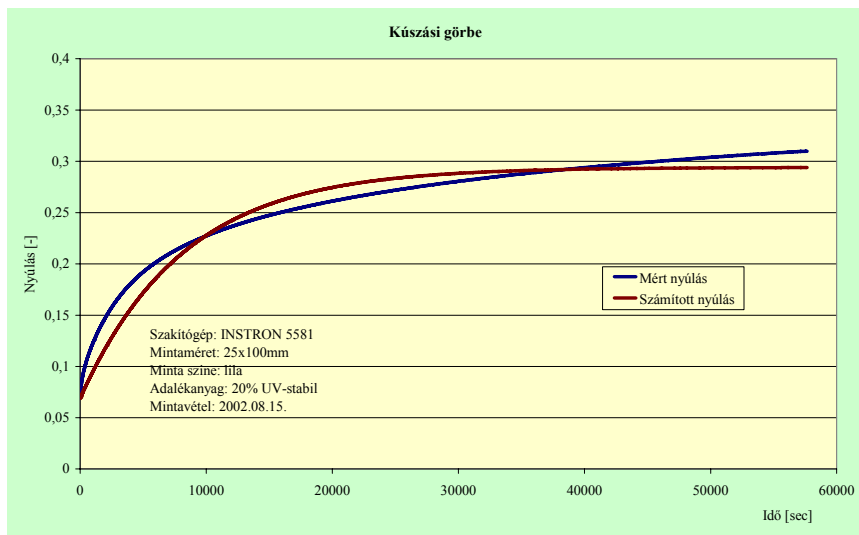
4.40. ábra. Fehér fólia kúszási görbéje exponálás után (5% UV-stabilizációs adalék).



4.41. ábra. Fehér fólia kúszási görbéje exponálás után (20% UV-stabilizációs adalék).



4.42. ábra. Lila fólia kúszási görbéje exponálás után (5% UV-stabilizációs adalék).



4.43. ábra. Lila fólia kúszási görbéje exponálás után (20% UV-stabilizációs adalék).

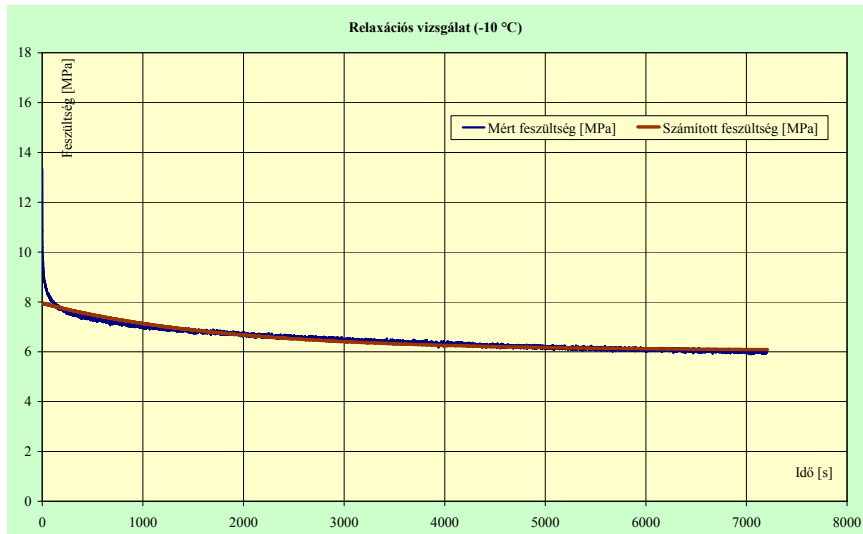
4.4 A fóliafeszültségek változásának meghatározása a hőmérséklet függvényében

A fóliatömlőkben a feszültségek változásának meghatározásához, relaxációs vizsgálatokat végeztem a hőmérséklet függvényében. Ehhez a választott Poynting-Thomson modell relaxációs görbéjének $\sigma(t) = \varepsilon_a (E_1 + E_3 e^{-T_3(t)})$ egyenletét használtam. A keresett paramétereket a (3.2) egyenlet minimalizálásával nyertem. A végeelem-program futtatásához szükséges anyagi jellemzőket a 3.7 pontban leírtak alapján határoztam meg. A mérési eredmények kiértékeléséhez az Excel programcsomag Solver eljárását használtam. A mérési és számítási eredményeket a 4.23. táblázatban foglaltam össze.

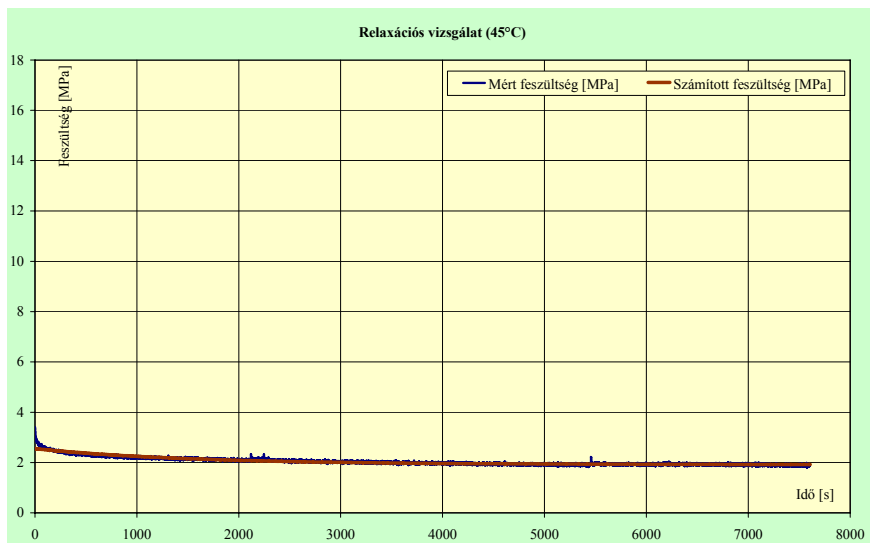
4.23. táblázat. A mérési és számítási eredmények.

Hőmérséklet [°C]		45	40	30	20	10	0	-10	-20
<i>Modell állandók:</i>									
E_1	MPa	38,38	51,30	57,48	92,17	92,98	110,70	121,12	119,21
E_3	MPa	12,69	13,27	24,95	31,11	40,08	39,03	37,80	49,62
T_3	MPa · s	19332	7407	54116	8665	22398	47909	67474	72213
<i>Differenciálegyenlet együtthatói:</i>									
a_o	MPa	38,38	51,30	57,48	92,17	92,98	110,70	121,12	119,21
a_1	MPa · s	77793	36046	178788	34336	74365	183805	283702	245697
b_1	s	1523,25	558,26	2169,10	278,52	558,88	1227,61	1785,22	1455,24
<i>COSMOS/M paramétereit:</i>									
E_x	MPa	51,07	64,57	82,43	123,28	133,06	149,73	158,92	168,84
μ	-	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
g	-	0,57	0,55	0,60	0,57	0,60	0,58	0,57	0,60
t_R^g	s	1775	753	2187	320	565	1380	2150	1499,00
<i>Másodlagos számítások</i>									
K	-	11,50	14,54	18,56	27,77	29,97	33,72	35,79	38,03
E_a	-	51,07	64,57	82,43	123,28	133,06	149,73	158,92	168,84

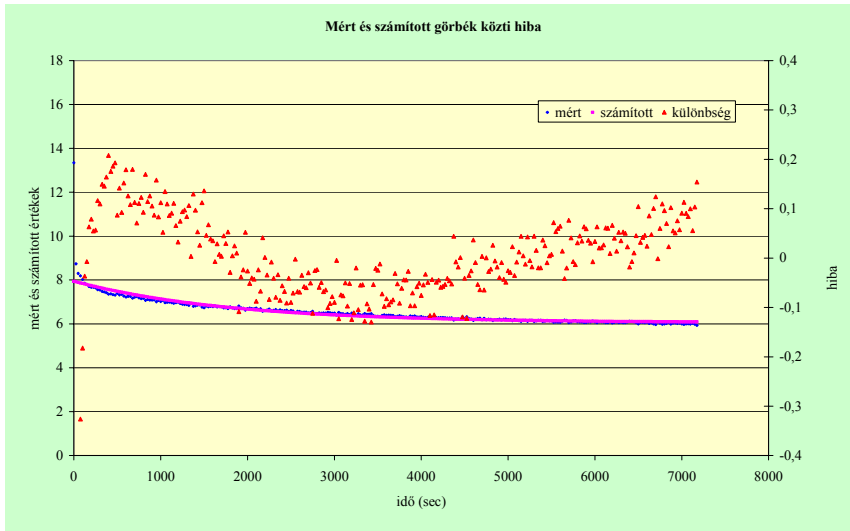
A 4.44. és 4.45. ábrán a különböző hőmérsékleten mért és számított relaxációs görbék ábrázoltam.



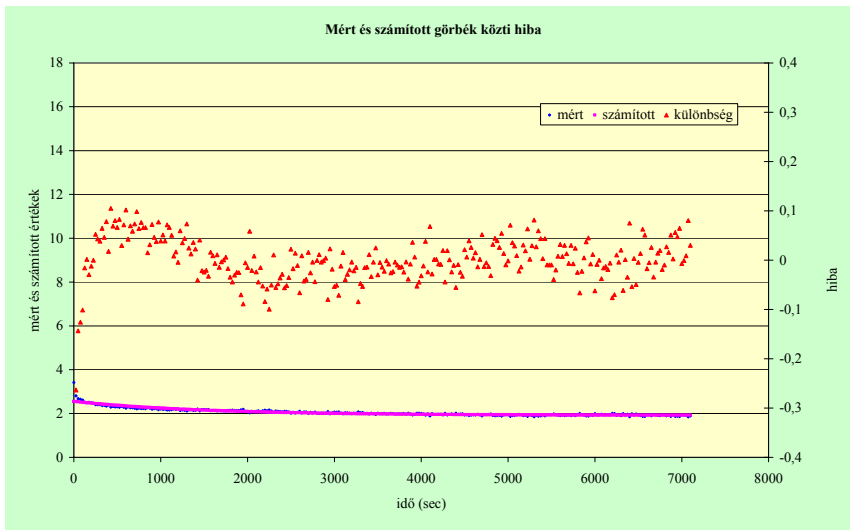
4.44. ábra. A -10°C hőmérsékleten mért és számított relaxációs görbék.



4.45. ábra. A +45°C hőmérsékleten mért és számított relaxációs görbék.



4.46. ábra. A -10°C -on mért és számított görbék közti hiba.



4.47. ábra. A $+45^{\circ}\text{C}$ -on mért és számított görbék közti hiba.

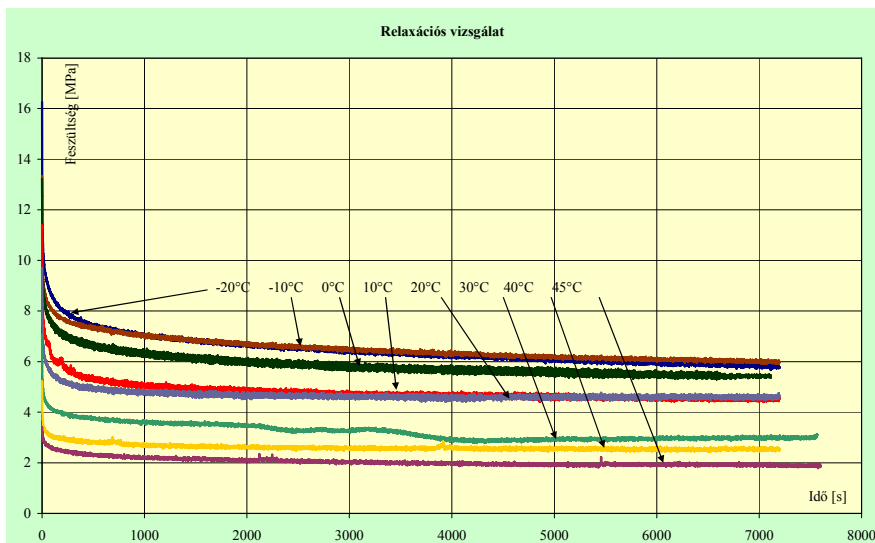
4.24 táblázat. A relatív hibák értékelése -10°C-on.

Eset	A mintaelemek függetlenek és azonos eloszlásúak (P=95%, 99%)?			Lehet normális eloszlású a minta (P=95%, 99%)?	
	Wald	futam	trend	χ^2	Kolmogorov
Eredeti hiba	N/N	N/N	N/N	I/I	I/I
2-rendű eliminálás maradék hibája	N/N	N/I	I/I	I/I	I/I
3-rendű eliminálás maradék hibája	I/I	I/I	I/I	I/I	I/I
4-rendű eliminálás maradék hibája	I/I	I/I	I/I	I/I	I/I

4.25 táblázat. A relatív hibák értékelése +45°C-on.

Eset	A mintaelemek függetlenek és azonos eloszlásúak (P=95%, 99%)?			Lehet normális eloszlású a minta (P=95%, 99%)?	
	Wald	futam	trend	χ^2	Kolmogorov
Eredeti hiba	N/N	N/N	N/N	I/I	I/I
2-rendű eliminálás maradék hibája	N/N	N/N	I/I	I/I	I/I
3-rendű eliminálás maradék hibája	N/N	I/I	I/I	I/I	I/I
4-rendű eliminálás maradék hibája	N/I	I/I	I/I	I/I	I/I

A harmadfokú közelítés után megmaradó hiba nincs ellentmondásban azokkal a hipotézissel, mely szerint zérus várható értékű Gauss típusú fehérzaj lenne. A harmadfokú trend kiküszöbölése után jutunk először a 'jó hibához', ezért célszerű ezt a harmadfokú hibagörbét alkalmazni korrekcióként.



4.46. ábra. A különböző hőmérsékleten mért relaxációs görbék.

A megállapított paraméterek segítségével és különböző hőmérsékleteken a COSMOS/M végelemprogram-csomag felhasználásával számításokat végeztem a fóliatömlőben kialakuló (a tömlőben lévő anyaghalmoz tulajdonságait a cukorrépa-szelet anyagjellemzőivel modelleztem) deformációk és feszültségek meghatározása érdekében. A program számára a görbeillesztés során kapott értékeket a COSMOS/M 2.85 Electronic Documentation Nonlinear Structural Analysis [(NSTA) Structural Research & Analysis Corporation Los Angeles, California. 2003] szerint számítottam át.

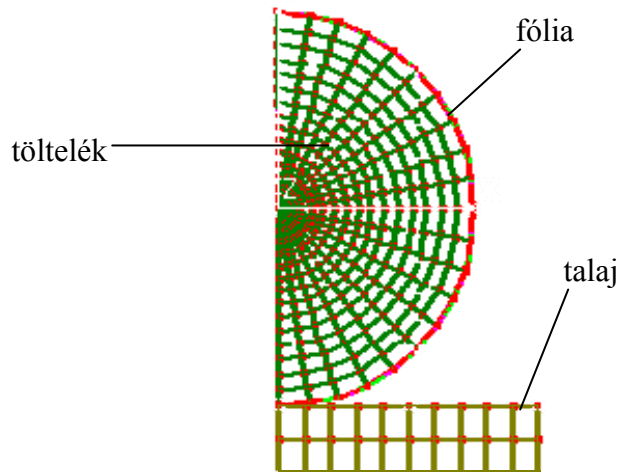
A töltelék mechanikai tulajdonságait:

EX	1.000000e+005	(rugalmassági modulus x -irányban, MPa)
NUXY	3.000000e-001	(Poisson-szám, -)
GXY	1.000000e+003	(csúsztató rugalmassági modulus, MPa)
DENS	1.500000e+003	(sűrűség, kg/m ³)

alaján vettem figyelembe és minden hőmérsékleten változatlanak tekintettem. Ezzel biztosítottam, hogy a gravitáció okozta terhelés a kiválasztott hőmérsékleteken azonos nagyságú legyen. A végelelem modell létrehozásakor feltételeztem, hogy a keresztmetszet az y tengelyre szimmetrikus, a fóliatömlőt végtelen hosszúnak tekintettem, így a probléma síkfeladatként kezelhető. A számításokhoz PLANE2D elemtípust használtam. A tölteléket és a talajt rugalmas, a fóliát pedig a fenti paraméterekkel, viszkoelasztikus állapotúnak tételeztem fel.

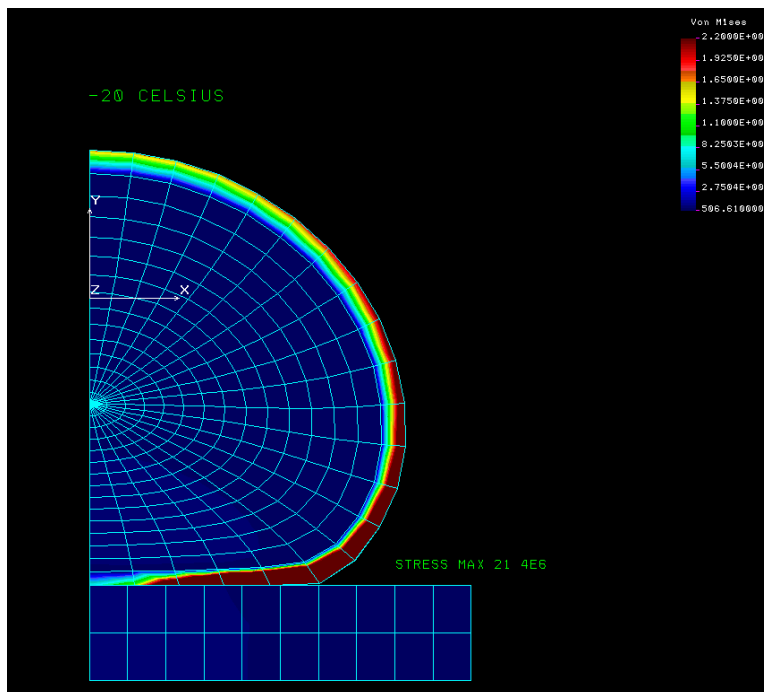
A fólia és a talaj közötti érintkezési feltételekhez egy-csomópontos GAP elemet használtam.

A fóliatöltő prégép a töltelék nagy nyomáson (a tömlőben kialakuló nyomást a prégép mozgásának fékezésével lehet szabályozni [Csermely et al. 2002]) préseli a fóliatömlőbe és elméletileg körhenger alakú „hurkát” állít elő (4.47. ábra).

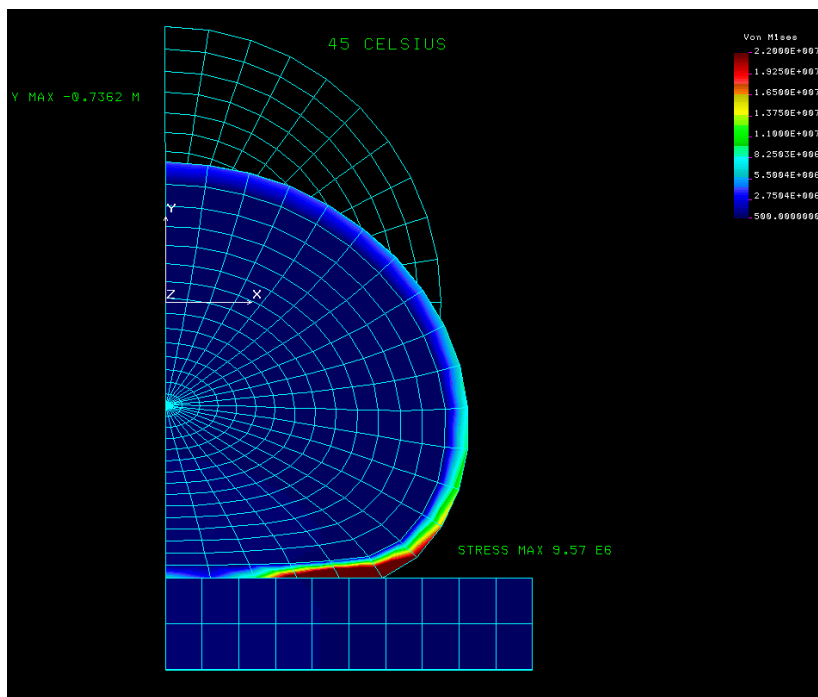


4.47. ábra. A fóliatömlő, töltelék és talaj véges-elemes modellje.

A számítások eredményeit a következő, 4.48. és 4.49. ábrákon mutatom be.



4.48. ábra. Alakváltozás és feszültségeloszlás a fóliában -20 °C hőmérsékleten.



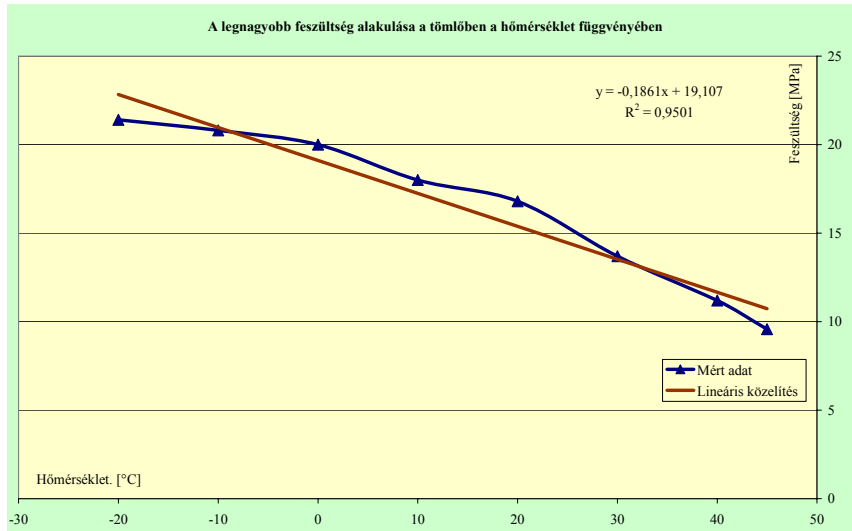
4.49. ábra. Alakváltozás és feszültségeloszlás a fóliában 45 °C hőmérsékleten.

A fóliatömlő tetőpontjának elmozdulásait és a legnagyobb redukált feszültséget (Huber-Mises-Hencky), a 4.24. táblázatban foglaltam össze. A redukált feszültség a vizsgált feszültségállapottal azonos veszélyességű, egy-tengelyű feszültségállapot [Csizmadia et al. 2002].

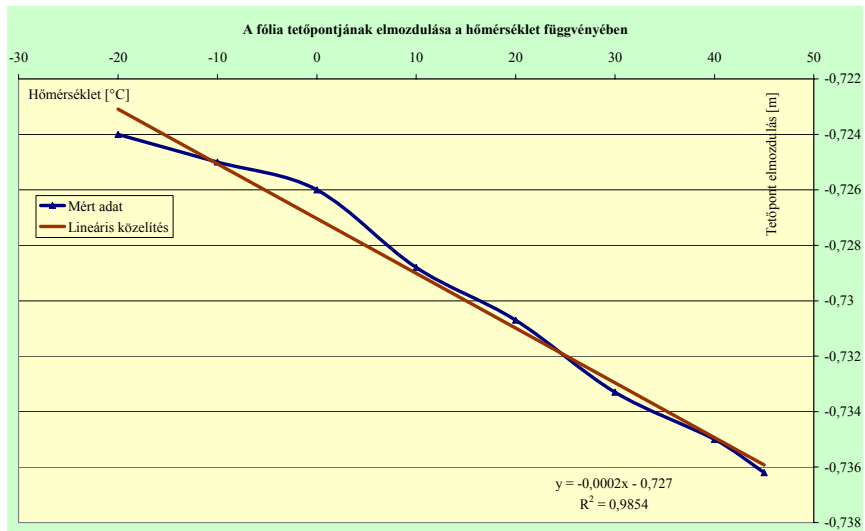
4.24. táblázat. A tetőpont elmozdulásai és a legnagyobb redukált feszültségek.

Hőmérséklet [°C]	Feszültség $\sigma_{HMH,max}$ [MPa]	Elmozdulás y_{max} [m]
-20	21,4	-0,724
-10	20,8	-0,725
0	20	-0,726
10	18	-0,7288
20	16,8	-0,7307
30	13,7	-0,7333
40	11,19	-0,735
45	9,57	-0,7362

A 4.50. és 4.51. ábrákon a 4.24. táblázat adataiból rajzolt diagramok láthatók.

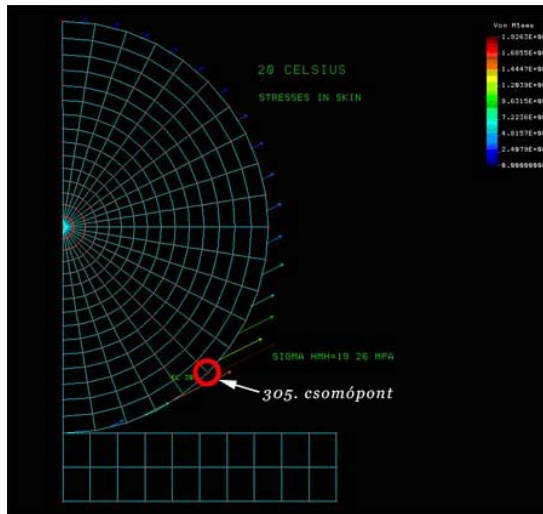


4.50. ábra. A legnagyobb redukált feszültség alakulása a hőmérséklet függvényében.

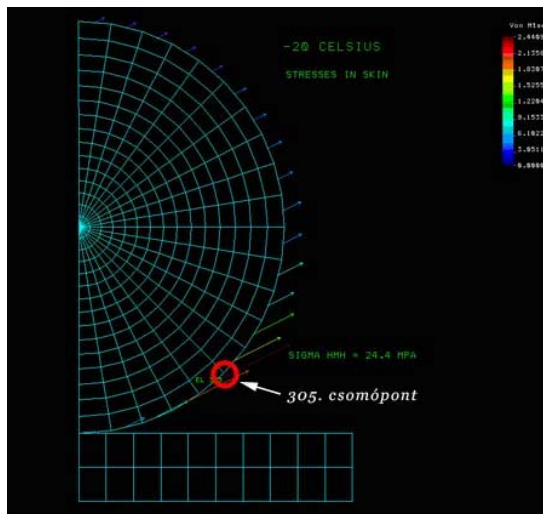


4.51. ábra. A fóliatömlő tetőpontjának elmozdulása a hőmérséklet függvényében.

A 4.24. táblázat eredményeiből az látszik, hogy a töltelékben – a töltelék állandó mechanikai tulajdonságai (rugalmassági modulus, sűrűség, Poisson szám) mellett – a fólia hőmérséklettől függő reológiai tulajdonságai miatt a „ σ ” feszültség alacsonyabb hőmérsékleten nagyobb, magasabb hőmérsékleten pedig kisebb. Mivel a fóliatömlő szakítószilárdsága hidegben csökken, ezért megnő a tönkremenetel valószínűsége. A COSMOS program eredményei a Huber-Mises-Hencky féle redukált feszültséget jeleníti meg. A következő, 4.52. és 4.53. ábrán azt mutatom be, hogy a fóliatömlőben hol alakul ki a legnagyobb feszültség.



4.52. ábra. A legnagyobb feszültség helye a fóliatömlőben +20 °C hőmérsékleten.



4.53. ábra. A legnagyobb feszültség helye a fóliatömlőben -20 °C hőmérsékleten.

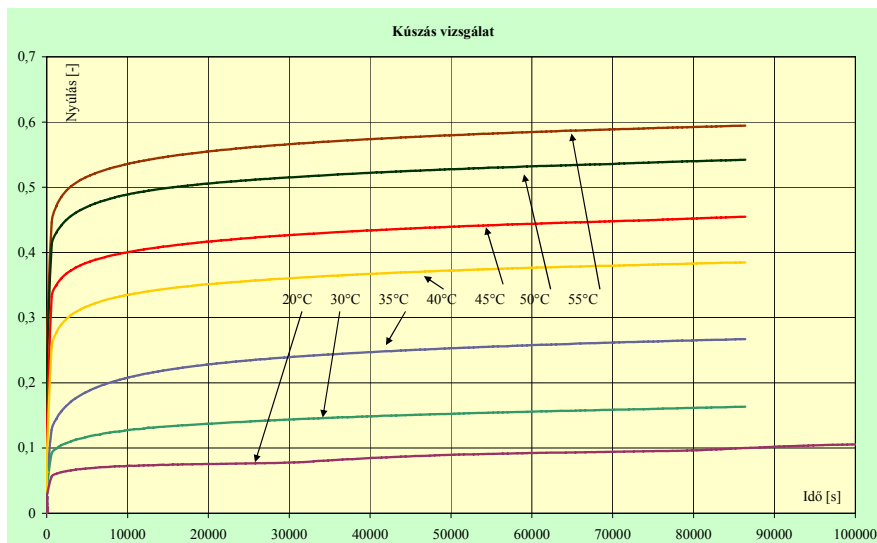
A két ábrából azt láthatjuk, hogy a fóliában a 305-ös csomópontban ébred a legnagyobb feszültség. Minden vizsgált hőmérsékleten ez volt a veszélyes hely (deformálatlan alakban bejelölve), csak a feszültség nagysága változott. Az ábrán a nyilak nagysága az adott csomópontban a feszültség nagyságával arányos, iránya érdektelen, mivel skálás értékeket jelöl.

A következtetések levonásakor azt is figyelembe kell venni, hogy a töltelék mechanikai tulajdonságait a hőmérséklettől függetlenül állandónak tekintettem. Biztosan más mechanikai paraméterek jellemeznék egy 40°C-os, mint egy -20°C hőmérsékletű tölteléket.

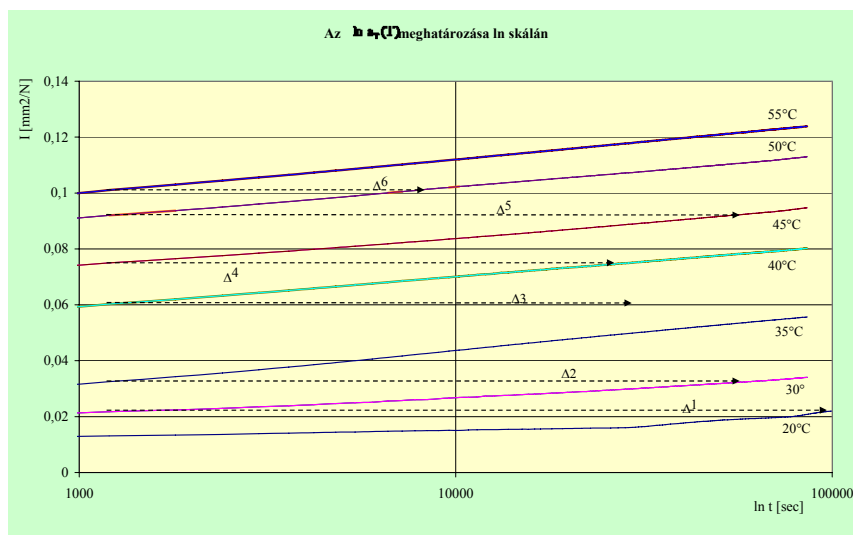
Amennyiben eltekintünk a töltelék hőmérséklet okozta feszültségállapot-változásától kijelenthető, hogy a meleg időszakban betöltött fóliák esetén a megfelelő nyomás beállításakor figyelembe kell venni azt a megállapítást, hogy a téli időszakban a fólia kisebb feszültség hatására is kiszakadhat. Mindezek alapján a megfelelő töltési nyomást a téli időszakra kell beállítani. A mérési eredményeink hűen támasztják alá a hazai gyakorlat negatív példáit, azaz a széthasadt fóliák ott szenvedtek maradandó alakváltozást, ahol azt a mi mérési- és számolási eredményeink előre jelezték (az ábrán a 305 jelzésű csomópont). Emellett egyértelmű, hogy a fóliák tönkremenetele mindig a hidegebb időszakokra tehető.

4.5 A hőmérséklet-idő eltolási tényező állandóinak meghatározása

A hét vizsgálati hőmérséklethez (55°C; 50°C; 45°C; 40°C; 35°C; 30°C és 20°C) tartozó kúszási görbét a 4.54. ábrán mutatom be. Ezeket a görbéket az $\ln a_T(T)$ meghatározásához fél-logaritmikus skálán célszerű ábrázolni úgy, hogy az y -tengelyre a megnyúlás helyett az érzékenységet ($I = \varepsilon / \sigma$) kell felvinni (4.55. ábra). Az $\ln a_T$ értékeit a 3.8 pontban leírtak alapján határoztam meg.



4.54. ábra. A különböző hőmérsékleten mért kúszási görbék.

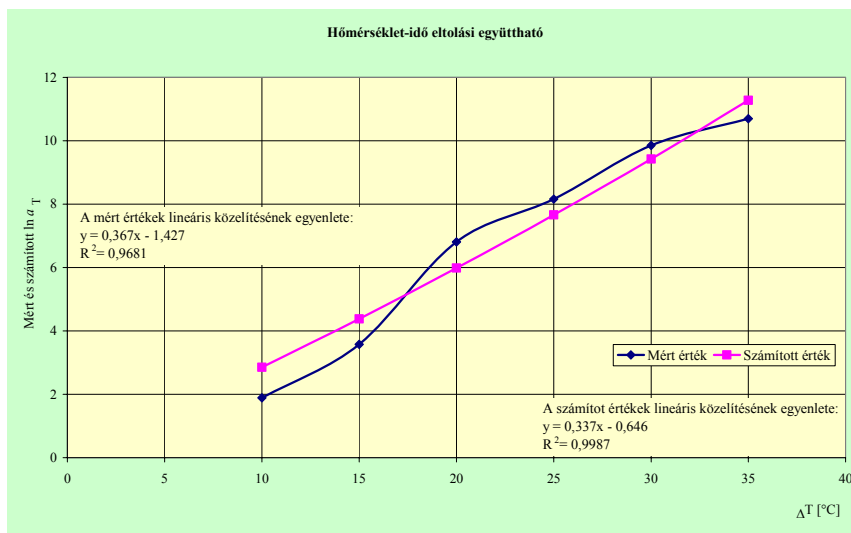


4.55. ábra. Az $\ln a_T(T)$ meghatározása.

A 4.56. ábra adatait a 4.25. táblázatban foglaltam össze.

4.25. táblázat. Mért és számított $\ln a_T$ értékek.

T (°C)	$T-T_0$ (°C)	$\ln a_T^K$ (mért)	$\ln a_T^a$ (számított)
30	10	1,88	2,85
35	15	3,57	4,38
40	20	6,80	5,98
45	25	8,15	7,65
50	30	9,85	9,42
55	35	10,69	11,27



4.56. ábra. A hőmérséklet-idő eltolási együttható alakulása.

Ezt követően a Williams-Landell-Ferry által javasolt hőmérséklet-idő eltolási tényező összefüggésből a legkisebb négyzetek módszerének segítségével

$$(3.10), \left[\ln a_T = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)} \right] \text{ határoztam meg a } c_1 \text{ és } c_2 \text{ értékét. A vonatkoztatási}$$

hőmérséklet ekkor $T_0 = 20$ °C volt. Méréseim és számításaim alapján ezek a tényezők $c_1 = -62,51$ és $c_2 = -229,02$ értékre adódtak, melyek hasonlóak voltak, mint a kis sűrűségű polietilén fóliák esetén az irodalomban található $c_1 = -43,45$ és $c_2 = -129,45$ (Urzsumcev et al. 1982) értékek.

Vizsgálatok a minták elemeinek egymástól való függetlenségéről [Kemény et al. 1990], a 4.25. táblázat mért és számított $\ln a_T$ értékeire vonatkozólag.

1. *Függetlenek és azonos eloszlásúak a mintaelemek?*

4.26. táblázat. Wald, trend és futam próba.

	P=95%	P=99%
Wald	I	I
trend	I	I
futam	I	I

Következmény: a minták a próbák szerint külön-külön mind statisztikai mintának tekinthetők, azaz a mintaelemek független sorozatnak tarthatók.

2. *Lehet normális eloszlású a minta?*

H_0 : a minta normális eloszlású.

χ^2 próbához kevés az adat.

4.27. táblázat. Kolmogorov-próba.

	P=95%	P=99%
Kolmogorov	I	I

Következtetés: a minta nem mond ellent a normális eloszlásnak.

3. *Normált autókorreláció függvény (NAKF)*

Az adatok kevés száma miatt csak a szomszédos adatok között vizsgálható.

H_0 : $r = 0$ (ami az előbbi, a normalitásra vonatkozó próba eredménye miatt a függetlenséget is jelenti).

Ha $r = 0$, ha $\hat{r} = 0,21$ és $N = 5 \Rightarrow P [-0,83 < r < 0,92] = 0,95$

ahol: r korreláció,
 \hat{r} korrelációs együttható becslése,
 N adatpárok száma,
 P a várható érték 95%-os valószínűséggel.

Következtetés: függetlennek tekinthető a sorozat.

4. Várható érték

$$H_0 : M = 0$$

$$P (-0,71 < M < 0,91) = 0,95 \Rightarrow \text{megtartható a } H_0 : M = 0$$

ahol: H_0 nullhipotézis,
 M hiba várható értéke.

Következtetés: a mért és számított értékek között nincs ellentmondás (P=95%), a különbség véletlen hibaként értelmezhető.

Becslés:

$$P (-0,71 < \text{hiba} < 0,91) = 0,95$$

$$\text{ha } 10 \leq T - T_0 \leq 35.$$

5. H_0 : a mért és a számított trend azonos-e?

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}(x - \bar{x})$$

$$\hat{a} = \hat{y} = 6,830; \quad S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}(x_i)]^2}{n-2}} = 4,5653$$

$$\hat{b} = \frac{\bar{xy} - \bar{x}\bar{y}}{S_e^2} = 0,367; \quad \bar{x} = 22,50; \quad n = 6$$

$$\hat{y} = 6,830 + 0,367(x - 22,50) = -1,427 + 0,367x$$

ahol: \hat{y} becsült regressziós görbe,
 $\hat{a}; \hat{b}$ becsült regressziós görbe együtthatói,
 S_e szórásnégyzet,
 n a minta elemszáma.

Konfidenciabecslések a regressziós egyenes paramétereire.

$$- P(\hat{a} - S_a \cdot t_p^{n-2} < a < \hat{a} + S_a \cdot t_p^{n-2}) = 1 - p = B$$

$$S_a = \frac{S_e}{\sqrt{n}} = \frac{4,5653}{\sqrt{6}} = 1,864$$

$$t_{0,05}^4 = 2,776$$

$$P(1,656 < a < 12,004) = 0,95$$

$$- P(\hat{b} - S_b \cdot t_p^{n-2} < b < \hat{b} + S_b \cdot t_p^{n-2}) = 1 - p = B$$

$$S_b = \frac{S_e}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} = \frac{4,5653}{\sqrt{20,9165}} = 0,218$$

$$P(-0,239 < b < 0,973) = 0,95$$

ahol: S_a, S_b \hat{a} és \hat{b} szórásnégyzete,
 t_p^{n-2} A Student-féle t-eloszlás kritikus értéke.

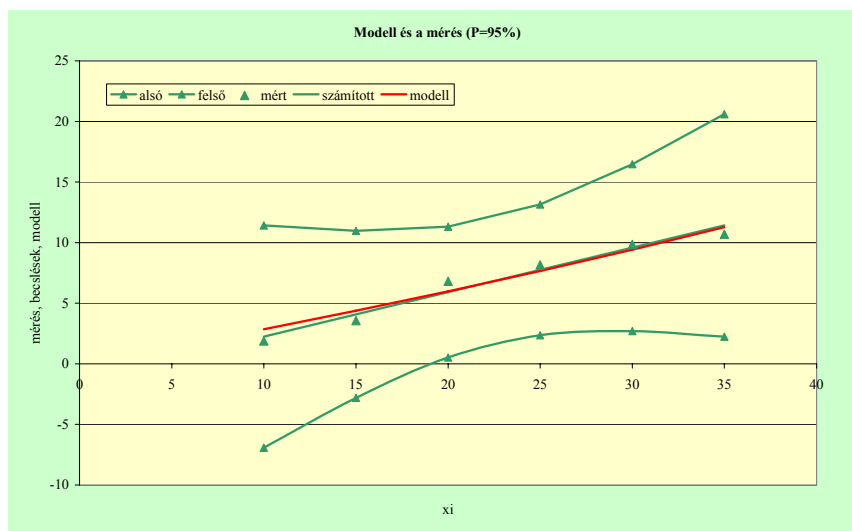
Mivel a mérésből kapott $y = 0,367x - 1,427$ egyenes paramétereinek konfidencia intervalluma mindkét modellparamétert tartalmazza, ezért a regressziós egyenes nincs ellentmondásban a modell egyenesével.

A regressziós egyenes B szintű konfidencia intervalluma .

$$\hat{y}(x_i) = 1,427 + 0,367x_i$$

$$S_{\hat{y}(x_i)} = S_e \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} = 4,565 \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{(x_i - 22,5)^2}{20,917^2}}$$

$$P[\hat{y}(x_i) - S_{\hat{y}(x_i)} t_p^{n-2} < y(x_i) < \hat{y}(x_i) + S_{\hat{y}(x_i)} t_p^{n-2}] = 1 - p = B = 0,95$$



4.57. ábra. A regressziós egyenes konfidencia intervalluma.

A mérés alapján a regressziós egyenes (a méréssel nem ellentmondásban lévő lineáris modell) a zöld sávban P=95% eséllyel található. Mivel a modellként megadott piros összefüggést ez a sáv tartalmazza, ezért a mérés nem mond ellent a modellnek (P=95%).

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1 A kutatási tevékenység összefoglalása

A dolgozat elkészítésekor első lépésben elvégeztem a tématerület szakirodalmának áttekintését, melyen belül feltérképeztem a hiányzó szakterületeket, pótoltam a tématerület hiányosságait, kiválasztottam a feladat megoldásához szükséges modellt és megfogalmaztam az UV-sugárzás, a hőmérséklet és a fóliák mechanikai jellemzői közötti kapcsolatot.

Részletesen elemeztem a viszkózus és elasztikus, valamint viszkoelasztikus rendszerek egyensúlyi állapotát, valamint a viszkoelaszticitásra vonatkozó kúszás és relaxáció jelenségét. Megállapítottam, hogy modellezéssel a lineáris viszkoelasztikus rendszerek reológiai viselkedése elfogadható pontossággal leképezhető.

Ahhoz, hogy kiválaszthassam a megfelelő reológiai modellt, részletesen taglaltam a Hooke és Newton testekből felépíthető egységek rendszerét. Így az egy-elemestől a többelemes modellekig bemutattam a Kelvin, a Maxwell, a Poynting-Thomson és a Jeffrey, valamint a Burger testeket, melyek kúszási és relaxációs modelljeire külön is kitértem.

Ahhoz, hogy egy adott és tetszőleges számú elemet tartalmazó lineáris viszkoelasztikus reológiai modell általánosított anyagegyenletét kezelhessem, azaz az n -ed fokú differenciálegyenletet algebrai úton megoldhassam, a Laplace-transzformációt alkalmaztam. Az így előállított átviteli függvények szélsőértékei alapján elvégeztem a bemutatott modellek osztályozását.

Mivel a további számításokhoz szükséges volt meghatározni az ismert feszültség- és nyúlásfüggvényekre adott és az átviteli függvény rendszerjellemzőit is tartalmazó válaszfüggvényeket, tanulmányoztam a megoldásban használt Duhamel-tételt és súlyfüggvényt.

Az első modellosztály vizsgálatán belül elemeztem az általam a későbbiekben alkalmazott három-elemes Poynting-Thomson modellt. Külön kitértem a nagyon lassú és a nagyon gyors terhelésvitelek viselkedési hátterére, valamint arra a két terhelési állapotra, amikor vagy a feszültséget, vagy a deformációt tartottam állandó szinten. A PT modell viselkedési diagramjának elemzésével, valamint a már említett függvényanalízis felhasználásával előállítottam a kúszási és relaxációs modellek átviteli függvényre alapozott változatát.

A relaxációs folyamatokat alapvetően befolyásoló hőmérséklet hatását a viszkoelasztikus függvények időskálájának mennyiségi változásában kezeltem. A polimerekre megadott viszkoelasztikus függvény a hőmérséklet és az idő hasonlósági elvén alapul. A folytonos és a diszkrét relaxáció-spektrumok idő függvényében kialakuló hőmérséklet-függőségét diagramokon mutattam be.

Az anyag és módszer fejezet első részében a polietilének és a metallocének szerkezeti felépítését mutattam be, majd a többretegű fóliák néhány vizsgálati módszerét ismertettem, melyek vizsgálatát nem végeztem el. A továbbiakban a fóliák

mechanikai- és reológiai jellemzőinek változását leíró összefüggések megállapításához szükséges laboratóriumi vizsgálatok módszerét dolgoztam ki. Ezen belül kitértem a sugárzás, azaz az UV-transzmisszió, valamint az anyagjellemzők és a hőmérséklet-idő hasonlósági elv felhasználásával készített reológiai összefüggések meghatározásának módszerére is.

Az eredmények pontban és a már említett három fő fejezet szerinti taglalásban, elkülönítve tárgyaltam a fóliák mechanikai és reológiai tulajdonságainak változását. A transzmissziós kutatások fejezetben a különböző fóliák UV-tartományon belüli és exponálás előtti, valamint alatti transzmisszió-spektrumának változását határoztam meg. Ezeket az eredményeket kiegészítettem ezen fóliák UV-transzmissziója exponálás alatti hat időpontra vonatkozó részletes változásának bemutatásával.

A mechanikai tulajdonságok vizsgálata fejezetben a fóliák három terhelési sebesség melletti szakítószilárdsági mérésének fajlagos nyúlásra vonatkozó értékeit foglaltam össze, majd az eredményeket diagramokon jelenítettem meg.

A reológiai jellemzők meghatározása témakörben céloomul az adott időpontokhoz tartozó nyúlási értékek meghatározását tűztem ki. A mérési eredményekre illesztett kúszási függvénynek és a legkisebb négyzetek módszerének segítségével meghatároztam a három-elemes Poynting Thomson modell alkalmazásához szükséges paramétereket. A különböző összetételű fóliák mérési eredményeit az idő függvényében ábrázoltam és az anyagegyenletben szereplő rugalmassági modulus változását a modellparaméterek segítségével határoztam meg is. Az exponálás előtti és alatti kúszásgörbéket külön diagramokon keresztül mutattam be.

A fóliatömlőkben keletkező feszültségek változásának meghatározásához relaxációs vizsgálatokat végeztem. A kiértékeléshez az említett Poynting Thomson modell relaxációs függvényét használtam és a keresett paramétereket az egyenlet minimalizálásával nyertem. Az eredmények kiértékeléshez az Excel/Solver eljárást alkalmaztam, majd a különböző hőmérsékletek függvényében kialakuló feszültségváltozást, véges-elemes program segítségével modelleztem.

Ezt követően az általam kiválasztott (vonatkoztatási) hőmérsékleteken meghatároztam a fóliák folyási görbéit, majd ezeket a görbéket a viszkoelasztikus érzékenység megállapítása érdekében féllogaritmikus beosztású diagramban ábrázoltam. A részfeladat befejezésekképpen meghatároztam az idő függvényében jelentkező analitikus és kísérleti $\ln a_T$ értékeket, az így kapott értékekből pedig, kiszámítottam a W-L-F összefüggésben szereplő empirikus állandókat.

5.2 Új tudományos eredmények

5.2.1 A fóliák transzmissziós tulajdonságainak elemzésénél

- Az UV-szűrőanyagot tartalmazó fóliák UV-áteresztésének csökkenése a vizsgált 286-363,5 nm-es spektrumon a 5500 J/cm^2 halmozott káros energiájú besugárzás első 14,5%-a alatt (800 J/cm^2) zajlik le.
- A 286-320 nm-es rövidebb UV-B hullámhossz-tartományra jellemző magasabb UV-szűrőképesség 800 J/cm^2 halmozott energiadózis (nyári időszak megközelítőleg 14 napos természetes UV-sugárzása) után, átlagosan 50%-kal esett vissza. A fóliák ezt követően közel azonos mértékben szűrték a nagyobb energiájú és rövidebb hullámhosszúságú (UV-B sugárzás), valamint a kisebb energiájú és nagyobb hullámhosszúságú spektrumokat (UV-A sugárzás).
- Az 5% és 20% UV-szűrőanyagot tartalmazó fehér fóliák 2300 J/cm^2 halmozott energiabesugárzás hatására (45 nap folyamatos és természetes UV-sugárzása) veszítették el UV-sugárzás elleni védőképességüket, azaz a védőképesség minimuma a halmozott teljes besugárzás 41,8%-ánál jelentkezett.
- Az 5% és 20% UV-szűrőanyagot tartalmazó lila fóliák a 286-363,5 nm-es spektrumon minimális UV-szűrőképesség esetén is jelentős védeltséget biztosítottak: $tr_{L5\%} = 45\%$; $tr_{L20\%} = 10\%$.

5.2.2 A fóliák reológiai tulajdonságait illetően

- A különböző összetételű fóliák E rugalmassági modulusa az idő függvényében fordítottan arányos a fóliák UV-szűrőanyag tartalmával. A <5% UV-szűrőanyag tartalmú fóliák az idő függvényében keményedtek:

$$E(\tau) = 0,352\tau + 28,4 [\text{MPa}]; (0 \leq \tau \leq 120) [\text{nap}].$$

A >20% UV-szűrőanyag tartalmú fóliák az idő függvényében lágyultak:

$$E(\tau) = 0,21\tau + 128 - \frac{13000}{-0,42\tau + 144} [\text{MPa}]; (0 \leq \tau \leq 120) [\text{nap}].$$

- A különböző összetételű fóliák rugalmassági modulus függvényének iránytangense a színezőanyagtól függően fordítottan arányos az UV-szűrőanyag tartalommal:

$$E(\tau) = 0,352\tau + 28,4 [\text{MPa}] \text{ (5\% UV-szűrőanyag tartalmú fehér fólia),}$$

$$E(\tau) = 0,157\tau + 29,84 [\text{MPa}] \text{ (5\% UV-szűrőanyag tartalmú lila fólia).}$$

- c) A színezőanyag rugalmassági modulus csökkentő hatása csak >20% UV-szűrőanyag tartalom esetén jelentkezik:

$$E(\tau) = 0,21\tau + 128 - \frac{13000}{-0,42\tau + 144} [\text{MPa}]; \quad (0 \leq \tau \leq 120) [\text{nap}]$$

(20% UV-szűrőanyag tartalmú fehér fólia),

$$E(\tau) = 0,648\tau + 413 - \frac{60000}{-0,28\tau + 162} [\text{MPa}]; \quad (0 \leq \tau \leq 120) [\text{nap}]$$

(20% UV-szűrőanyag tartalmú lila fólia).

5.2.3 A fóliák feszültség változásának alakulása a hőmérséklet függvényében

- a) A $-20 \leq T \leq 50$ [°C] hőmérséklettartományban míg a legnagyobb redukált feszültség nő, a fólia szakítószilárdsága a $\sigma = -0,1861T + 19,107$ [MPa] összefüggés szerint változik, azaz a hőmérséklet függvényében ébredő szakítószilárdság és redukált feszültség között fordított arányosság áll fenn. A fólia tönkremenetelének valószínűsége a hőmérséklet csökkenésével nő.

5.2.4 A hőmérséklet-idő eltolási tényező meghatározása

- a) A Williams-Landell-Ferry féle hőmérséklet-idő eltolási tényező $\ln a_T = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)}$ összefüggésének érvényessége a többrétegű csomagoló fóliákra is kiterjeszthető. A függvény alkalmazásához szükséges tapasztalati állandókat $c_1 = -62,51$ és $c_2 = -229,02$ értéken állapítottam meg.

5.3 A tudományos eredmények gyakorlati alkalmazhatósága

A fóliák transzmissziós vizsgálatai rámutattak arra, hogy a gyártástechnológiában alkalmazott különböző színekkomponenseknek és UV-stabilizációs adalékanyagoknak meghatározó szerepe van a mechanikai tulajdonságok alakulásában. Mivel ezek az anyagok és közülük is kiemelten az UV-stabilizációs adalék döntő szereppel bír a fóliák árának alakulásában, ezért az ezirányú kutatások eredményei optimalizálhatják a megfelelő összetétel meghatározását.

A fóliák mechanikai és reológiai vizsgálatai is egyértelműen igazolták az említett adalékanyagok pozitív hatását. A feladat ekkor is a helyes összetétel megállapítására kell, hogy irányuljon. Az általam alkalmazott módszer alapján a viszkoelasztikus fóliák reológiai és mechanikai igénybevételei kezelhetők, a szükséges számítások elvégezhetők. Ez lényeges előrelépést jelenthet a speciális fóliatömlők, időben elhúzódó deformációjának és relaxációjának kezelése esetén is. A laboratóriumi körülmények között végrehajtott vizsgálatok, valamint a véges-elem módszer megbízható eljárást biztosít az optimális anyagösszetétel kiválasztásához.

A tématerületen belül végzett vizsgálatok igen hasznosak lehetnek a mezőgazdaság zöldségtermesztési, valamint tartósítási és tárolási eljárásaiban alkalmazott csomagolóanyagok kifejlesztése terén:

- a) Hajtatófóliák,
- b) fóliasátrak,
- c) bálacsomagoló fóliák és
- d) silófóliatömlők,

összetételének (szín- és UV-stabilizációs adalékanyag-tartalmának, terhelést átvivő rétegeinek) meghatározása.

6. SUMMARY

6.1 Summary of research activities

In my Dissertation first of all I prepared the overview of the professional literature, where I mapped the missing specialties, I made up for its deficiencies, I chose an appropriate model to solve the task and I defined the relationship between the UV-radiation, the temperature and the mechanic features of the foils. I analysed in detail the equilibrium state of viscous, elastic and viscous-elastic systems, and the phenomena of creeping and relaxation. I determined that the rheologic behaviour of linear viscous-elastic systems could be modelled with appropriate accuracy.

To be able to choose an appropriate rheologic model I detailed the system built-in with Hooke and Newton bodies. This way I showed the Kelvin, Maxwell, Poynting-Thomson, Jeffrey and Burger bodies containing one or more elements and I reviewed their creeping and relaxation models separately.

I applied the Laplace transformation to help me to solve the general material equation of linear viscous-elastic rheologic model with one single or arbitrary number of elements, namely a differential equation with n-degree in algebraic way. Then I classified the introduced models on the basis of the extreme values of these transformation functions.

For the sake of further calculations it was necessary to determine the answer function for the strength and relaxation functions which contains the system properties of the transformation function, too. Therefore the Duhamel-theory and the weight function, both used in the solution, were detailed as well.

Within the research of the first model class I analysed the Poynting-Thomson (PT) model with three elements which I used in the coming steps. I detailed the background of behaviour during very slow and very fast loading, and those two loading scenarios where the strength or the deformation was kept on a constant level. One version of the creeping and relaxation models based on the transformation functions was created with the help of the analysis of the PT model's behaviour diagrams as well as that of the previously mentioned function analysis.

The relaxation processes, which are basically influenced by the temperature, were handled through the quantity change on the timeline of viscous-elastic functions. The viscous-elastic function for polymers is based on the similarity theory between the temperature and the time. The temperature dependency of continuous and discrete relaxation spectrums in time was shown in some diagrams.

The texture of polyethylene and metallocene was shown in the first part of chapter Materials and Methods. Then some analysis methods of multi-layer foils were detailed which were not carried out during my research. Afterwards the laboratory-scale research method for the analysis of mechanic and rheologic properties of foils

was worked out, where I detailed the determination method of rheologic relationships with the help of the UV-transmission, the material properties and the temperature-time similarity theory.

The change in mechanic and rheologic features of foils was described in detail in section Results and in the previously mentioned three main chapters as well. In chapter Transmission researches the change in the transmission spectrum of different foils was determined in a UV-range before and during the exposure. These results were expanded with the introduction of the UV-transmission change of these foils during a six-date exposure.

Some special relaxation values during tensile strength tests of different foil types with three loading rates were summarised in chapter Mechanical Features; the results are shown in diagrams.

The determination of relaxation values for a given time was aimed in chapter Determination of Rheologic Features. The necessary parameters for the Poynting-Thomson model were identified by the creeping functions fitted to the measurement results and by the least-square method, respectively. The measurement results were shown in diagrams in function of time and the variation of the elasticity modulus, which was used in the material equations, was determined by the model parameters. The creeping curves were shown in separate diagrams before and during the exposure.

Some relaxation examinations were carried out for the identification of the strength variation within the foil tubes. The relaxation function of the previously mentioned Poynting-Thomson model was applied for evaluation purposes and the requested parameters were determined by the minimisation of this function. To evaluate the results I used the Excel/Solver method; then the developing strength-variation was modelled in function of different temperatures by a finite-element program.

I determined the fluidity curves of the foils at an individual chosen (reference) temperature which were shown in a semi-logarithmic chart in order to see their viscous-elastic sensibility. Finally I determined the analytic and experimental $\ln aT$ values which are dependent on time; then the empiric constants in the Williams-Landell-Ferry equations could be calculated.

6.2 New Scientific Results

6.2.1 In the analysis of transmission properties of foils

- a) Decreasing UV-permeability of UV-resistive foils occurs within the analysed 286-363.5 nm spectrum in the first 14.5% (800 J/cm²) of the 5500 J/cm² cumulated damaging energy radiation.
- b) The ability for higher UV-filtration, which is typical for the shorter 286-320 nm UV-B wavelength range, decreased with 50% in average after 800 J/cm² cumulated energy unit (natural UV-radiation of about 14 days in summer). Afterwards every foil filtered the short wavelength spectrum with large energy content (UV-B) and the long wavelength spectrum with low energy content (UV-A) with a similar rate.
- c) White foils with 5% and 20% UV-filtration material content lost their UV-filtration ability after 2300 J/cm² cumulated energy irradiation (continuous and natural UV-radiation for 45 days). It means that the minimum protection ability appears at 41.8% of the cumulated whole irradiation.
- d) Violet foils with 5% and 20% UV-filtration material content proved significant safety with a minimal UV-filtration ability and 286-363.5 nm spectrum: $tr_{L,5\%} = 45\%$; $tr_{L,20\%} = 10\%$.

6.2.2 In the rheologic features of the foils

- a) The E elastic coefficient of foils made of different materials is in inverse proportion to the UV-filtration material content of foils in time.
Foils with <5% UV-filtration material content harden in time:

$$E(\tau) = 0,352\tau + 28,4 [\text{MPa}]; (0 \leq \tau \leq 120) [\text{day}].$$

Foils with >20% UV-filtration material content soften in time:

$$E(\tau) = 0,21\tau + 128 - \frac{13000}{-0,42\tau + 144} [\text{MPa}]; (0 \leq \tau \leq 120) [\text{day}].$$

- b) The tangent value of the elastic coefficient of foils with different consistency depending on the colouring material is in inverse proportion to the UV-filtration material content:

$$E(\tau) = 0,352\tau + 28,4 [\text{MPa}] \text{ (white foil with 5\% UV-filtration material content),}$$

$$E(\tau) = 0,157\tau + 29,84 [\text{MPa}] \text{ (violet foil with 5\% UV-filtration material content).}$$

- c) The decreasing effect of the colouring material in the elastic coefficient appears only at a more than 20% UV-filtration material content:

$$E(\tau) = 0,21\tau + 128 - \frac{13000}{-0,42\tau + 144} [\text{MPa}]; \quad (0 \leq \tau \leq 120) [\text{day}]$$

(white foil with 20% UV-filtration material content),

$$E(\tau) = 0,648\tau + 413 - \frac{60000}{-0,28\tau + 162} [\text{MPa}]; \quad (0 \leq \tau \leq 120) [\text{day}]$$

(violet foil with 20% UV-filtration material content).

6.2.3 Change in foils' strength in function of the temperature

- a) If the highest reduced strength rises in the $-20 \leq T \leq 50$ [°C] temperature range, the tensile strength varies according to the $\sigma = -0,1861T + 19,107$ [MPa] equation, which means that the tensile strength in function of the temperature is in inverse proportion to the reduced strength. The damaging probability of the foil rises if the temperature decreases.

6.2.4 Determination of the temperature-time shifting coefficient

- a) The Williams-Landell-Ferry temperature-time shifting coefficient in the form of $\ln a_T = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)}$ is valid for the multi-layer packing foils, too. To apply this function the constants were determined as follows: $c_1 = -62.51$ and $c_2 = -229.02$.

6.3 Practical applicability of the scientific results

The transmission analyses of foils pointed out that the different colouring materials and UV-stabilisation additives used by the industry play an important role in the foils' mechanical features. The cost of these materials, and mainly that of the UV-stabilisation additives, has a significant influence on the cost of the foils; therefore the research projects with such an aim could optimise the appropriate material content.

The mechanic and rheologic tests of these foils unambiguously proved the positive effect of the additives mentioned above. The right material content ratio must be determined even in this case. The rheologic and mechanic stresses of viscous-elastic foils can be handled by this method and the necessary calculations can be done, too. It could be a great step forward in the handling of long-ranging deformation and relaxation processes of special foil tubes. Laboratory-scale researches and the FEM analysis prove to be a reliable method for the selection of optimal material content.

Researches carried out in this professional field could be very useful in agricultural plant production and in the development of packing-materials for storage and conservation, such as:

- sprouting foils
- foil tents
- bail packing foils
- foil tubes for silo

to determine their material-content (colour- and UV-stabilisation additives content, loading transmission layers).

7. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. Asszonyi Cs., Gálos M., Kertész P., Richter R.: *A kőzetmechanika anyagszerkezeti és reológiai alapjai*, MTA Veszprémi Akadémiai Bizottsága, Veszprém, 1980.
2. Asszonyi Cs.: *Izotróp kontinuumok anyagtörvénye*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2006.
3. Asszonyi Cs., Ván P., Szarka Z.: *Izotróp kontinuumok rugalmas és képlékeny állapota*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2007.
4. Asszonyi Cs., Kapolyi L.: *A kőzetmechanika reológiai alapegyenleteiről*, Tatabányai Szénbányák Műszaki Közgazdasági Közleményei, 1972. 3. 123-132. pp.
5. Asszonyi Cs., Kapolyi L.: *Kőzetek reológiai jellemzőinek meghatározása*, NIM Továbbképző Központ, Budapest, 1977.
6. Asszonyi Cs., Richter R.: *Bevezetés a kőzetmechanika reológiai elméletébe*, Nehézipari Minisztérium Továbbképző Központja, Budapest, 1974.
7. Barnes, H.A.-Hutton, J.F.-Walters, K.: *An introduction to rheology*, Elsevier, Amsterdam. 1989.
8. Bellus Z., Csatár A.: *Fóliák fizikai és mechanikai vizsgálata*, FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet, Gödöllő, 2004.
9. Bellus, Z.-Csatár A.-Csorba, L.: *Többrétegű fóliatömlő reológiai tulajdonságainak változása a hőmérséklet függvényében*, GÉP, 2006. 3-8 p.
10. Bernhardt, J.H.: ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Lásd: *Measurements of Optical Radiation Hazards*, 1998, pp. 3-11, CIE x016
11. Budó, Á.-Mátrai, T.: *Kísérleti fizika III.*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1992.
12. Chen P., Fridley R.B.: *Analytical Method for Determining Viscoelastic Constants of Agricultural Materials*, Trans. ASAE 1972. 1103-1106. p.
13. Commission Internationale de l'Éclairage: *International Lighting Vocabulary*, 1987, CIE 17.4

14. Commission Internationale de l'Éclairage: *Standardization of the terms UV-A1, UV-A2 and UV-B*, 1999, CIE 134/1
15. Commission Internationale de l'Éclairage: *A proposed global UV index*, 2000, CIE 138/4
16. *COSMOS/M 2.85 Electronic Documentation, Nonlinear Structural Analysis* (NSTA) Structural Research & Analysis Corporation Los Angeles, California, 2003.
17. Csatár A., Bellus Z., Csorba L.: *Mechanical features of agricultural packaging folis*, Hungarian Agricultural Engineering, Gödöllő, 2004.
18. Csatár A., Csorba L.: *Műanyag csomagoló- és takarófoliák reológiai vizsgálata*, Mezőgazdasági Gépesítési Tanulmányok, Gödöllő, 2004.
19. Csermely J., Bellus Z., Kelemen Zs., Schmidt J., Sipőcz J.: *Erjesztett takarmányok készítése fóliahengerben*, Értesítő Termeléstechológiák Műszaki és Gazdasági Vizsgálatáról, Gödöllő, 2002.
20. Csizmadia B., Nádori E.: *Szilárdságtan*, Nemzeti tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
21. Csorba L.: *Talajok reológiai vizsgálata*, Doktori értekezés, Gödöllő, 1973.
22. Csurgay Á., Simonyi K.: *Az információtechnika fizikai alapjai*, Mérnöktovábbképző Intézet, Budapest, 1997.
23. Eugenijus U, William W., Christopher J. Cramer, John E., Paul von Ragué Schleyer: *A Carbon-Free Sandwich Complex $[(P_5)_2Ti]^2$* , Science 1 February 2002:Vol. 295. no. 5556, pp. 832 - 834
24. Fenyvesi L.: *Termények fizikai sérülése*, Doktori értekezés, Gödöllő, 2002.
25. Fenyvesi, L.: *Mezőgazdasági termények sérülése*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2003.
26. Fodor Gy.: *A Laplace-transzformáció műszaki alkalmazása*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1966.
27. Gelencsér E.: *Description of stress and strain condition ont he basis of rheological models*, Bull. Univ. Of Agric. Sci., Gödöllő. 1986. N° 1. 149-160 p.
28. Gelencsér E.: *Feszültségmező és tömörítés vizsgálata szálás halmazoknál modellkísérletekkel*, Doktori értekezés, GATE, Gödöllő, 1997.
29. Gräff J.: *Laplace transzformáció*, Kézirat, Budapest, 2006. 3-7. p.
30. Huszár I.: *Szilárdsági és reológiai vizsgálatok a nagyegyházi medencében lemélyített kutatófurások egyes kijelölt magmintáinak anyagán*, Kutatási jelentés, Gödöllő, 1975. p. 1-259.

31. J. Kahovec, R. B. Fox, K. Hatada: *Nomenclature of regular single-strand organic polymers*, Pure and Applied Chemistry; IUPAC 2002; 74 (10): pp. 1921–1956.
32. Meise S., Steinhöfel O., Weber U.: *Dick allein genügt nicht - Folienqualität von Siloschläuchen*, Neue Landwirtschaft, 4-2006-Sonderdruck, Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 2006.
33. Kemény S., Deák A.: *Mérések tervezése és eredmények kiértékelése*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1990.
34. Klausner Y.: *Fundamentals of continuum mechanics of soils*, Springer-Verlag, London, 1991.
35. Mohsenin N.: *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, Vol 1: Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties, Gordon and Breach, London, 1971.
36. Mohsenin N.: *A testing machine for determination of mechanical and rheological properties of agricultural products*, Pennsylvania State University, USA, 1963.
37. Mohsenin N.: *Thermal properties of foods and other agricultural materials*, Gordon&Breach Science Publisher, London, 1980.
38. Mózes Gy., Vámos E.: *Reológia és reometria*, Műszaki Kiadó, Budapest, 1968.
39. MSZ EN ISO 10002-1: *Fémek. Szakítóvizsgálata*, Magyar Szabványügyi Testület, Budapest, 1994.
40. MSZ EN ISO 527-1, 527-3.: *Műanyagok. A húzási jellemzők meghatározása*, Magyar Szabványügyi Testület, Budapest, 2001.
41. Muck R.E., Holmes B.J.: *Bag Silo Densities and Losses*, Transaction of the ASABE, 2006, pp. 1277-1284
42. Müller Z.: *Classification of Rheological Models Composed of Springs and Dashpots*, Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych, 1976, z. 168.
43. Müller, Z.: *Mezőgazdasági anyagok mechanikai vizsgálata*, Jegyzet, Gödöllő, 1988. és 2003.
44. Penn R.W.: *Dynamic mechanical properties of crystalline, linear polyethylene. Frequence and temperature dependence of the dynamic mechanical properties of poly-4-methylpentene-1*, J Polimer Sci. 1966.
45. Phan-Thien N.: *Understanding Viscoelasticity Basics of rheology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002.

46. Poynting J., Thomson J.: *Properties of Matter*, Charles Griffin and Co. London, 1934.
47. Prager W.: *Probleme der Plastizitätstheorie*. Birkhause, Basel und Stuttgart 1955.
48. Robert H.: *Crabtree The Organometallic*, Chemistry of the Transition Metals 4th ed. Wiley-Interscience, 2005.
49. Schanda, J.: *Az optikai sugárzás élettani hatásai*, Magyar Tudomány, Budapest, 2002./8.
50. Sitkei Gy.: *Mezőgazdasági anyagok mechanikája I-II.*, kézirat, Körmend, 1972.
51. Sitkei Gy.: *A mezőgazdasági anyagok mechanikája*, Akadémiai Kiadó, Budapest 1981.
52. Sitkei Gy.: *Mechanics of Agricultural Materials*, Akadémiai Kiadó, Budapest 1986.
53. Sitkei Gy.: *A gyümölcs- és zöldségtermesztés műszaki vonatkozásai*, Mgi könyvek, FVM-MGI, Gödöllő, 2005.
54. Snell H., Oberndorfer S., Lücke W., Van den Weghe H.: *Effects of the colour and thickness of polyethylene film on ensiling conditions and silage quality of chopped maize, as investigated under ambient conditions and in mini-silos*, Blackwell Science Ltd. Grass and Forage Science, 2002. 342–350. pp.
55. Snell H., Oberndorfer S., Lücke W., Van den Weghe H.: *Effects of polyethylene colour and thickness on grass silage quality*, Blackwell Publishing Ltd. Grass and Forage Science, 2003. 239–248. pp.
56. Szendrő P., Bense L., Vincze Gy.: *Thermodynamics of rheological models*, Hungarian Agricultural Engineering, 2000. 13. 12-14. p.
57. Thamm F.: *Műanyagok szilárdságtana I.*, Kézirat, Budapest, 1988.
58. Truesdell C., Noll W.: *The Non-linear field theories of mechanics*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004.
59. Urzsumcev J.Sz., Makszimov R.D.: *A műanyagok alakváltozása. Prognosztika a hasonlósági elvek alapján*, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1982.
60. Ván P., Asszonyi Cs.: *Izotróp kontinuumok anyagtörvénye 2. Az általános törvényszerűségek levezetése*, „Mérnökgeológia-Kőzetmechanika 2006” ISRM konferencia, 2006.
61. Verhás J.: *Termodinamika és reológia*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1997.

62. Weber U, Müller A: *Interne Mindeststandards für AG BAG Schläuche mit 2,70 m Durchmesser*, RKW Michelstadt, 2005.
63. White J.L.: *Principles of Polymer Engineering-Rheology*, J. Wiley, New York, 1990.
64. Zimm B. H.: *Dynamic of polymer molecules in dilute solution viscoelasticity, flow birefringence and dielectric loss*, J. Chem. Phys. 1965.

M2. Fóliák transzmissziós jellemzői

7.1. táblázat. A globál- és UV sugárzás értékeinek napi összege a 2002-es év nyári hónapjaiban.

Nap	Globál sugárzás (Jcm ⁻²)				UV sugárzás (Jcm ⁻²)			
	06. hó	07. hó	08. hó	09. hó	06. hó	07. hó	08. hó	09. hó
1	2453	2764	1851	1924	62,1	70,6	38,0	46,8
2	2257	2624	2087	1290	62,7	60,9	48,0	32,6
3	1214	2457	2262	1766	33,0	58,8	57,0	41,0
4	2594	1066	1828	1763	68,0	27,8	48,7	41,9
5	2293	2834	1843	1520	61,8	72,0	48,9	38,3
6	932	2854	2023	1346	26,4	71,7	54,1	33,6
7	1394	2715	526	1630	38,1	46,3	18,9	39,0
8	1255	2430	459	1629	36,9	59,0	15,9	38,0
9	1672	2713	1040	1674	50,2	68,9	31,8	37,8
10	427	2751	2279	1630	16,6	70,9	59,6	36,6
11	1854	2671	730	1709	52,5	65,6	21,9	39,0
12	2376	2570	530	1794	61,3	63,2	16,6	41,8
13	2460	2325	408	729	71,5	60,5	15,1	20,4
14	2682	1444	1035	1671	55,8	40,0	30,6	36,2
15	2836	2236	1227	977	73,4	60,4	35,8	26,7
16	2060	1857	1530	1525	57,1	48,0	41,5	34,4
17	2415	2436	1894	1101	59,8	63,9	48,4	28,5
18	2778	672	2294	815	69,6	23,4	56,9	27,1
19	2873	1103	2232	1511	74,4	35,8	52,7	35,7
20	2938	2514	1892	667	75,1	43,6	44,5	16,7
21	2808	2553	2131	1611	70,0	64,9	38,9	38,9
22	2820	2198	1368	271	73,5	59,3	29,0	10,0
23	2758	2489	2075	765	72,9	62,7	49,6	21,1
24	2710	2291	2124	167	70,3	60,1	50,3	6,5
25	1429	2532	1985	256	41,0	65,3	48,9	8,7
26	2405	2328	2088	895	61,3	57,8	49,0	23,6
27	2903	2439	1883	870	70,8	64,3	44,6	24,1
28	1550	2503	1008	549	24,2	64,1	27,7	15,4
29	2588	2246	1470	1498	69,3	57,8	39,2	32,3
30	2713	2023	1842	1546	69,1	47,3	43,2	34,2
31		2062	1840			54,0	43,8	

7.2. táblázat. Az exponálatlan fóliák transzmissziós spektruma az UV-A és UV-B tartományban (2002).

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Kontrol	F (5% UV)	F (20% UV)	L (5% UV)	L (20% UV)
Hullámhossz					
286,5 nm	53,00306	20,29961	6,847353	15,54026	0,692082
290,0 nm	53,40649	20,67202	6,866557	15,26405	0,645069
293,5 nm	55,43641	23,58082	8,463925	16,98339	0,873534
297,0 nm	61,9959	29,05678	11,93456	19,8304	1,186585
300,5 nm	65,50937	35,07472	16,09951	22,48448	1,553094
304,0 nm	67,93428	39,08452	19,8716	24,70505	1,951371
307,5 nm	68,21577	40,70459	21,25873	25,44256	2,204622
311,0 nm	68,42528	40,73954	21,36549	25,76503	2,150831
314,5 nm	67,58122	39,15557	20,16593	25,11815	2,01489
318,0 nm	66,67506	37,47902	18,42262	24,76957	1,995148
321,5 nm	66,09772	36,13001	17,39911	24,80256	2,219508
325,0 nm	65,55096	35,22099	16,80368	24,73116	2,117561
328,5 nm	65,0823	34,96323	16,55671	24,63912	2,135282
332,0 nm	65,60328	35,55527	17,11649	24,84177	2,244447
335,5 nm	66,55709	36,91811	18,25619	25,3967	2,318756
339,0 nm	67,67587	39,39487	20,37741	26,46825	2,489358
342,5 nm	69,7197	42,64431	23,33147	28,02809	2,751567
346,0 nm	71,84617	47,21754	27,67703	30,01651	3,015285
349,5 nm	74,32121	52,44158	33,41919	32,40848	3,495599
353,0 nm	76,74929	57,85331	39,88099	34,74111	3,974174
356,5 nm	79,70347	64,10773	47,61034	37,36458	4,516033
360,0 nm	81,93327	69,81342	55,28826	39,72703	5,125785
363,5 nm	84,12666	74,80847	62,35089	41,90981	5,711496

7.3. táblázat. Az exponált fóliák transzmissziós spektruma az UV-A és UV-B tartományban (2002.június 20.).

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Kontrol	F (5% UV)	F (20% UV)	L (5% UV)	L (20% UV)
Hullámhossz					
286,5 nm	73,29813	33,4338	13,3502	25,4885	0,968915
290,0 nm	74,64601	33,56988	13,42189	25,87251	0,903096
293,5 nm	74,72912	36,28294	15,11279	26,52046	1,222947
297,0 nm	75,13271	40,73629	19,1567	27,57773	1,66122
300,5 nm	76,51327	45,19378	23,70275	28,85908	2,174332
304,0 nm	76,88213	49,05918	26,95145	29,58305	2,73192
307,5 nm	77,36621	49,99874	28,75809	30,16298	3,086471
311,0 nm	77,65314	50,46005	28,57805	30,59337	3,011164
314,5 nm	77,92245	49,66485	27,44156	30,75335	2,820846
318,0 nm	78,19725	48,65557	26,1669	31,46923	2,793207
321,5 nm	78,56402	48,04171	25,27513	32,01489	3,107311
325,0 nm	78,71371	47,36071	24,32954	32,26772	2,964585
328,5 nm	79,0596	47,40103	24,21573	32,20172	2,989395
332,0 nm	79,12781	47,95481	24,65927	32,22821	3,142226
335,5 nm	79,46256	49,03424	25,8681	32,48433	3,246258
339,0 nm	79,72534	50,79343	27,88815	32,56767	3,485102
342,5 nm	79,74933	53,33451	30,8848	32,63797	3,852194
346,0 nm	80,13007	56,56783	34,42276	33,38528	4,221399
349,5 nm	80,27828	59,98657	39,48163	33,93495	4,893839
353,0 nm	80,19093	63,80582	45,01336	34,93386	5,563844
356,5 nm	80,73896	67,4699	51,05987	35,53796	6,322446
360,0 nm	80,84023	70,92636	56,64362	36,15692	7,176099
363,5 nm	81,0921	74,05058	62,28048	36,63428	7,996094

7.4. táblázat. Az exponált fóliák transzmissziós spektruma az UV-A és UV-B tartományban (2002. július 05.).

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Kontrol	F (5% UV)	F (20%UV)	L (5% UV)	L (20%UV)
Hullámhossz					
286,5 nm	72,96893	68,19814	38,83566	30,33132	2,271664
290,0 nm	73,58782	68,74234	39,0592	30,78828	2,2119
293,5 nm	74,13095	69,23146	41,74579	31,55935	2,547426
297,0 nm	75,79915	70,81883	46,13697	32,8175	3,255334
300,5 nm	76,114	71,72226	50,5457	34,3423	2,921681
304,0 nm	77,27389	72,39388	53,09721	35,20383	3,548794
307,5 nm	78,17002	73,1083	54,70891	35,89395	4,075893
311,0 nm	78,91269	73,05136	55,19438	36,40611	4,14034
314,5 nm	79,31761	73,37349	54,30562	36,59649	4,290201
318,0 nm	80,6838	73,43234	54,07404	37,44838	4,385643
321,5 nm	81,07602	73,08191	53,14658	38,09771	4,699691
325,0 nm	81,64668	73,22783	52,93053	38,39859	4,900521
328,5 nm	82,52453	73,10409	53,5521	38,32004	5,22537
332,0 nm	82,81681	73,16341	54,01574	38,35158	5,328221
335,5 nm	83,16733	73,61304	55,406	38,65635	5,336976
339,0 nm	83,09989	74,42095	56,35896	38,75553	5,153987
342,5 nm	83,65186	75,11767	58,94289	38,83918	5,324374
346,0 nm	83,63584	76,18148	61,80492	39,72849	5,526312
349,5 nm	83,39619	76,88476	64,85045	40,38259	5,822158
353,0 nm	84,20047	77,53237	68,30074	41,57129	5,807712
356,5 nm	84,14725	78,36075	71,40593	42,29018	5,838824
360,0 nm	84,37901	78,59435	74,51661	43,02673	6,199824
363,5 nm	84,56232	79,85528	77,00649	43,59479	6,662019

7.5. táblázat. Az exponált fóliák transzmissziós spektruma az UV-A és UV-B tartományban (2002. július 25.).

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Kontrol	F (5% UV)	F (20% UV)	L (5% UV)	L (20% UV)
Hullámhossz					
286,5 nm	73,48761	75,42413	72,36981	41,56781	2,941176
290,0 nm	74,33277	74,86538	72,96376	42,24861	2,896089
293,5 nm	75,94512	76,69261	73,73095	42,13889	3,199882
297,0 nm	77,28188	77,59198	75,11529	42,44847	3,535345
300,5 nm	78,91007	78,52165	76,03514	42,42191	3,672997
304,0 nm	79,39929	78,87266	76,92956	42,62975	4,194607
307,5 nm	80,22156	79,00242	77,53939	43,15234	4,682038
311,0 nm	80,7118	79,17882	77,66003	44,01386	5,337952
314,5 nm	81,12213	79,83335	78,49679	44,46377	5,419508
318,0 nm	81,53342	80,09738	78,29008	45,28774	5,762607
321,5 nm	82,76754	80,50514	78,78378	47,02684	6,387188
325,0 nm	82,99085	80,41022	79,19312	47,49229	6,538215
328,5 nm	82,9562	80,67243	79,20678	47,7014	6,920138
332,0 nm	84,05757	80,99187	79,75238	47,50087	6,93034
335,5 nm	83,64533	80,98351	79,84016	46,66002	7,078839
339,0 nm	84,34732	81,43062	80,03259	46,44988	6,824699
342,5 nm	84,31865	81,75803	80,62557	46,26772	6,837718
346,0 nm	84,51258	81,96577	80,74853	46,24348	6,622701
349,5 nm	84,89797	82,06637	81,18617	46,05586	6,821511
353,0 nm	85,03142	82,55724	81,76331	45,95725	7,114248
356,5 nm	85,54031	82,95426	82,2968	45,92797	7,228112
360,0 nm	85,63586	83,30376	82,78045	46,10691	7,762802
363,5 nm	85,76956	83,2392	82,8481	46,16405	7,65195

7.6. táblázat. Az exponált fóliák transzmissziós spektruma az UV-A és UV-B tartományban (2002. augusztus 15.).

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Kontrol	F (5% UV)	F (20% UV)	L (5% UV)	L (20% UV)
Hullámhossz					
286,5 nm	75,10101	52,93471	80,98668	39,35153	8,580938
290,0 nm	77,06518	53,98371	81,13568	40,18366	7,392482
293,5 nm	77,0896	55,16788	81,12765	39,96202	7,245477
297,0 nm	78,76007	56,41701	82,09265	40,62071	7,352045
300,5 nm	79,32772	57,80452	82,28378	40,66958	7,008221
304,0 nm	80,04103	58,30248	82,34727	41,14212	7,006116
307,5 nm	80,53697	59,32814	82,93351	41,90495	7,589617
311,0 nm	81,47709	60,64737	83,19183	43,12253	8,281139
314,5 nm	81,70802	60,83482	83,17067	43,60473	8,465214
318,0 nm	82,95889	60,77903	83,0876	44,50012	9,197449
321,5 nm	82,96608	61,2152	83,39694	46,01256	10,15717
325,0 nm	84,25838	61,82042	83,64871	46,87402	10,70466
328,5 nm	84,59662	62,32859	83,78151	47,30644	11,1771
332,0 nm	85,92257	62,97576	84,26655	47,9943	11,3474
335,5 nm	86,18747	63,38322	84,7095	48,14304	11,31181
339,0 nm	86,19233	64,0886	85,43458	47,73849	10,81279
342,5 nm	85,63084	64,12448	84,88819	47,08172	10,4483
346,0 nm	86,48387	64,46416	85,32644	46,9126	9,970413
349,5 nm	86,57459	65,18501	84,99208	46,76277	9,763167
353,0 nm	86,43188	65,98894	85,46783	46,88701	9,812081
356,5 nm	86,79775	67,02639	85,41644	46,79507	9,52687
360,0 nm	86,52087	68,11882	86,00724	47,11662	9,7791
363,5 nm	86,97717	68,95469	85,9407	47,14598	9,462498

7.7. táblázat. Az exponált fóliák transzmissziós spektruma az UV-A és UV-B tartományban (2002. szeptember 05.).

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Kontrol	F (5% UV)	F (20% UV)	L (5% UV)	L (20% UV)
Hullámhossz					
286,5 nm	81,34526	61,66893	23,21188	34,0151	4,908461
290,0 nm	81,82001	61,93896	23,6996	34,65511	5,952899
293,5 nm	82,44301	63,31343	26,46435	35,07459	5,402688
297,0 nm	83,0442	65,39691	30,97792	35,57617	5,130968
300,5 nm	83,09549	67,18573	35,78462	36,06751	5,372348
304,0 nm	82,96952	67,87339	39,07321	36,44081	5,369193
307,5 nm	83,62843	68,62034	40,91255	37,01836	5,52303
311,0 nm	84,27955	69,19636	40,97071	37,81126	6,441765
314,5 nm	84,25583	69,26558	40,25866	38,68685	6,766345
318,0 nm	84,45068	69,75567	39,11558	39,61152	7,030358
321,5 nm	85,04593	69,80488	38,313	41,21386	7,915235
325,0 nm	85,1659	69,99973	37,41554	41,84662	8,175693
328,5 nm	85,56163	70,34118	37,92796	42,72151	8,304025
332,0 nm	85,04082	70,14131	38,21435	42,67831	7,72118
335,5 nm	85,80376	70,83212	39,55366	43,07359	7,387359
339,0 nm	85,80238	71,50227	41,41038	42,54873	7,134327
342,5 nm	85,71874	72,04937	43,86648	42,29402	6,997129
346,0 nm	86,17769	73,05519	47,74505	42,26781	6,837429
349,5 nm	86,34807	74,08618	51,89666	42,22213	6,771205
353,0 nm	85,86678	74,72888	56,57911	42,47125	6,756913
356,5 nm	86,13849	75,66612	61,06476	42,4955	6,686114
360,0 nm	86,19315	76,32973	65,40525	43,02692	6,698342
363,5 nm	86,12016	77,18963	69,41866	43,07994	6,788864

7.8. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt (Kontrol).

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)					
	Unexp.	2002.06.20.	2002.07.05.	2002.07.25.	2002.08.15.	2002.09.05.
Hullámhossz						
286,5 nm	53,00306	73,29813	72,96893	73,48761	75,10101	81,34526
290,0 nm	53,40649	74,64601	73,58782	74,33277	77,06518	81,82001
293,5 nm	55,43641	74,72912	74,13095	75,94512	77,0896	82,44301
297,0 nm	61,9959	75,13271	75,79915	77,28188	78,76007	83,0442
300,5 nm	65,50937	76,51327	76,114	78,91007	79,32772	83,09549
304,0 nm	67,93428	76,88213	77,27389	79,39929	80,04103	82,96952
307,5 nm	68,21577	77,36621	78,17002	80,22156	80,53697	83,62843
311,0 nm	68,42528	77,65314	78,91269	80,7118	81,47709	84,27955
314,5 nm	67,58122	77,92245	79,31761	81,12213	81,70802	84,25583
318,0 nm	66,67506	78,19725	80,6838	81,53342	82,95889	84,45068
321,5 nm	66,09772	78,56402	81,07602	82,76754	82,96608	85,04593
325,0 nm	65,55096	78,71371	81,64668	82,99085	84,25838	85,1659
328,5 nm	65,0823	79,0596	82,52453	82,9562	84,59662	85,56163
332,0 nm	65,60328	79,12781	82,81681	84,05757	85,92257	85,04082
335,5 nm	66,55709	79,46256	83,16733	83,64533	86,18747	85,80376
339,0 nm	67,67587	79,72534	83,09989	84,34732	86,19233	85,80238
342,5 nm	69,7197	79,74933	83,65186	84,31865	85,63084	85,71874
346,0 nm	71,84617	80,13007	83,63584	84,51258	86,48387	86,17769
349,5 nm	74,32121	80,27828	83,39619	84,89797	86,57459	86,34807
353,0 nm	76,74929	80,19093	84,20047	85,03142	86,43188	85,86678
356,5 nm	79,70347	80,73896	84,14725	85,54031	86,79775	86,13849
360,0 nm	81,93327	80,84023	84,37901	85,63586	86,52087	86,19315
363,5 nm	84,12666	81,0921	84,56232	85,76956	86,97717	86,12016

7.9. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt [F (5 % UV stabil)].

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)					
	Unexp.	2002.06.20.	2002.07.05.	2002.07.25.	2002.08.15.	2002.09.05.
Hullámhossz						
286,5 nm	20,29961	33,4338	68,19814	75,42413	52,93471	61,66893
290,0 nm	20,67202	33,56988	68,74234	74,86538	53,98371	61,93896
293,5 nm	23,58082	36,28294	69,23146	76,69261	55,16788	63,31343
297,0 nm	29,05678	40,73629	70,81883	77,59198	56,41701	65,39691
300,5 nm	35,07472	45,19378	71,72226	78,52165	57,80452	67,18573
304,0 nm	39,08452	49,05918	72,39388	78,87266	58,30248	67,87339
307,5 nm	40,70459	49,99874	73,1083	79,00242	59,32814	68,62034
311,0 nm	40,73954	50,46005	73,05136	79,17882	60,64737	69,19636
314,5 nm	39,15557	49,66485	73,37349	79,83335	60,83482	69,26558
318,0 nm	37,47902	48,65557	73,43234	80,09738	60,77903	69,75567
321,5 nm	36,13001	48,04171	73,08191	80,50514	61,2152	69,80488
325,0 nm	35,22099	47,36071	73,22783	80,41022	61,82042	69,99973
328,5 nm	34,96323	47,40103	73,10409	80,67243	62,32859	70,34118
332,0 nm	35,55527	47,95481	73,16341	80,99187	62,97576	70,14131
335,5 nm	36,91811	49,03424	73,61304	80,98351	63,38322	70,83212
339,0 nm	39,39487	50,79343	74,42095	81,43062	64,0886	71,50227
342,5 nm	42,64431	53,33451	75,11767	81,75803	64,12448	72,04937
346,0 nm	47,21754	56,56783	76,18148	81,96577	64,46416	73,05519
349,5 nm	52,44158	59,98657	76,88476	82,06637	65,18501	74,08618
353,0 nm	57,85331	63,80582	77,53237	82,55724	65,98894	74,72888
356,5 nm	64,10773	67,4699	78,36075	82,95426	67,02639	75,66612
360,0 nm	69,81342	70,92636	78,59435	83,30376	68,11882	76,32973
363,5 nm	74,80847	74,05058	79,85528	83,2392	68,95469	77,18963

7.10. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt [F (20% UV stabil)].

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)					
	Unexp.	2002.06.20.	2002.07.05.	2002.07.25.	2002.08.15.	2002.09.05.
Hullámhossz						
286,5 nm	6,847353	13,3502	38,83566	72,36981	80,98668	23,21188
290,0 nm	6,866557	13,42189	39,0592	72,96376	81,13568	23,6996
293,5 nm	8,463925	15,11279	41,74579	73,73095	81,12765	26,46435
297,0 nm	11,93456	19,1567	46,13697	75,11529	82,09265	30,97792
300,5 nm	16,09951	23,70275	50,5457	76,03514	82,28378	35,78462
304,0 nm	19,8716	26,95145	53,09721	76,92956	82,34727	39,07321
307,5 nm	21,25873	28,75809	54,70891	77,53939	82,93351	40,91255
311,0 nm	21,36549	28,57805	55,19438	77,66003	83,19183	40,97071
314,5 nm	20,16593	27,44156	54,30562	78,49679	83,17067	40,25866
318,0 nm	18,42262	26,1669	54,07404	78,29008	83,0876	39,11558
321,5 nm	17,39911	25,27513	53,14658	78,78378	83,39694	38,313
325,0 nm	16,80368	24,32954	52,93053	79,19312	83,64871	37,41554
328,5 nm	16,55671	24,21573	53,5521	79,20678	83,78151	37,92796
332,0 nm	17,11649	24,65927	54,01574	79,75238	84,26655	38,21435
335,5 nm	18,25619	25,8681	55,406	79,84016	84,7095	39,55366
339,0 nm	20,37741	27,88815	56,35896	80,03259	85,43458	41,41038
342,5 nm	23,33147	30,8848	58,94289	80,62557	84,88819	43,86648
346,0 nm	27,67703	34,42276	61,80492	80,74853	85,32644	47,74505
349,5 nm	33,41919	39,48163	64,85045	81,18617	84,99208	51,89666
353,0 nm	39,88099	45,01336	68,30074	81,76331	85,46783	56,57911
356,5 nm	47,61034	51,05987	71,40593	82,2968	85,41644	61,06476
360,0 nm	55,28826	56,64362	74,51661	82,78045	86,00724	65,40525
363,5 nm	62,35089	62,28048	77,00649	82,8481	85,9407	69,41866

7.11. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt [L (5% UV stabil)].

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)					
	Unexp.	2002.06.20.	2002.07.05.	2002.07.25.	2002.08.15.	2002.09.05.
Hullámhossz						
286,5 nm	15,54026	25,4885	30,33132	41,56781	39,35153	34,0151
290,0 nm	15,26405	25,87251	30,78828	42,24861	40,18366	34,65511
293,5 nm	16,98339	26,52046	31,55935	42,13889	39,96202	35,07459
297,0 nm	19,8304	27,57773	32,8175	42,44847	40,62071	35,57617
300,5 nm	22,48448	28,85908	34,3423	42,42191	40,66958	36,06751
304,0 nm	24,70505	29,58305	35,20383	42,62975	41,14212	36,44081
307,5 nm	25,44256	30,16298	35,89395	43,15234	41,90495	37,01836
311,0 nm	25,76503	30,59337	36,40611	44,01386	43,12253	37,81126
314,5 nm	25,11815	30,75335	36,59649	44,46377	43,60473	38,68685
318,0 nm	24,76957	31,46923	37,44838	45,28774	44,50012	39,61152
321,5 nm	24,80256	32,01489	38,09771	47,02684	46,01256	41,21386
325,0 nm	24,73116	32,26772	38,39859	47,49229	46,87402	41,84662
328,5 nm	24,63912	32,20172	38,32004	47,7014	47,30644	42,72151
332,0 nm	24,84177	32,22821	38,35158	47,50087	47,9943	42,67831
335,5 nm	25,3967	32,48433	38,65635	46,66002	48,14304	43,07359
339,0 nm	26,46825	32,56767	38,75553	46,44988	47,73849	42,54873
342,5 nm	28,02809	32,63797	38,83918	46,26772	47,08172	42,29402
346,0 nm	30,01651	33,38528	39,72849	46,24348	46,9126	42,26781
349,5 nm	32,40848	33,93495	40,38259	46,05586	46,76277	42,22213
353,0 nm	34,74111	34,93386	41,57129	45,95725	46,88701	42,47125
356,5 nm	37,36458	35,53796	42,29018	45,92797	46,79507	42,4955
360,0 nm	39,72703	36,15692	43,02673	46,10691	47,11662	43,02692
363,5 nm	41,90981	36,63428	43,59479	46,16405	47,14598	43,07994

7.12. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt [L (20% UV stabil)].

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)					
	Unexp.	2002.06.20.	2002.07.05.	2002.07.25.	2002.08.15.	2002.09.05.
Hullámhossz						
286,5 nm	0,692082	0,968915	2,271664	2,941176	8,580938	4,908461
290,0 nm	0,645069	0,903096	2,2119	2,896089	7,392482	5,952899
293,5 nm	0,873534	1,222947	2,547426	3,199882	7,245477	5,402688
297,0 nm	1,186585	1,66122	3,255334	3,535345	7,352045	5,130968
300,5 nm	1,553094	2,174332	2,921681	3,672997	7,008221	5,372348
304,0 nm	1,951371	2,73192	3,548794	4,194607	7,006116	5,369193
307,5 nm	2,204622	3,086471	4,075893	4,682038	7,589617	5,52303
311,0 nm	2,150831	3,011164	4,14034	5,337952	8,281139	6,441765
314,5 nm	2,01489	2,820846	4,290201	5,419508	8,465214	6,766345
318,0 nm	1,995148	2,793207	4,385643	5,762607	9,197449	7,030358
321,5 nm	2,219508	3,107311	4,699691	6,387188	10,15717	7,915235
325,0 nm	2,117561	2,964585	4,900521	6,538215	10,70466	8,175693
328,5 nm	2,135282	2,989395	5,22537	6,920138	11,1771	8,304025
332,0 nm	2,244447	3,142226	5,328221	6,93034	11,3474	7,72118
335,5 nm	2,318756	3,246258	5,336976	7,078839	11,31181	7,387359
339,0 nm	2,489358	3,485102	5,153987	6,824699	10,81279	7,134327
342,5 nm	2,751567	3,852194	5,324374	6,837718	10,4483	6,997129
346,0 nm	3,015285	4,221399	5,526312	6,622701	9,970413	6,837429
349,5 nm	3,495599	4,893839	5,822158	6,821511	9,763167	6,771205
353,0 nm	3,974174	5,563844	5,807712	7,114248	9,812081	6,756913
356,5 nm	4,516033	6,322446	5,838824	7,228112	9,52687	6,686114
360,0 nm	5,125785	7,176099	6,199824	7,762802	9,7791	6,698342
363,5 nm	5,711496	7,996094	6,662019	7,65195	9,462498	6,788864

7.13. táblázat. A globál- és UV sugárzás értékeinek napi összege a 2003-as év nyári hónapjaiban.

Nap	Globál sugárzás (Jcm ⁻²)				UV sugárzás (Jcm ⁻²)			
	06. hó	07. hó	08. hó	09. hó	06. hó	07. hó	08. hó	09. hó
1	2156	2654	1959	2112	40,6	68,6	57,8	46,6
2	2148	2636	1967	1391	40,3	76,0	60,0	34,4
3	1416	2455	2026	1677	56,1	44,1	59,7	44,5
4	2675	1234	1658	1673	56,1	34,3	56,6	38,2
5	2413	2765	1634	1482	56,1	43,4	56,6	44,5
6	1023	2548	2191	1564	55,4	57,4	52,4	47,9
7	1439	2527	982	1498	47,5	56,7	57,0	45,4
8	1299	2157	1003	1399	60,1	25,9	56,6	7,1
9	1436	2317	1040	1497	51,2	29,1	53,6	29,8
10	1427	2301	1825	1581	59,4	43,8	55,9	21,8
11	1655	2517	1703	1514	59,7	63,4	74,5	37,0
12	2311	2543	1532	1794	67,3	53,2	56,6	13,9
13	2640	2032	1508	1729	54,1	44,1	47,5	22,7
14	2428	1784	1235	1176	59,1	63,7	46,7	38,2
15	2569	2056	1648	1978	32,7	50,1	28,9	40,7
16	2117	1768	1658	1322	42,2	56,4	41,0	41,6
17	2466	1436	1498	982	46,5	34,7	47,9	39,9
18	2439	1762	2165	1021	32,0	18,6	47,9	39,1
19	2645	1854	2023	1468	53,1	28,7	52,4	37,4
20	2754	2125	1499	1119	43,2	52,2	49,0	38,2
21	2625	2257	2045	1465	60,1	53,2	41,0	37,4
22	2551	2002	1547	1279	64,4	32,9	42,2	36,1
23	2689	2042	2055	1145	59,1	16,1	47,5	34,4
24	2125	2129	2078	1622	40,6	51,8	50,9	11,8
25	1667	2453	1756	1249	60,7	18,2	42,2	35,3
26	2124	2198	1866	1019	68,3	55,7	47,9	35,7
27	2233	2025	1764	987	62,0	71,4	46,4	32,3
28	2016	2125	2001	1245	61,1	56,4	35,7	29,8
29	2259	2089	1547	1325	55,1	18,6	35,7	11,8
30	2527	1895	1659	1124	63,7	33,6	24,3	33,6
31		1765	1627			27,0	11,0	

7.14. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt (Kontrol).

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Unexp.	2003.07.02	2003.08.07	2003.09.18	2003.10.14
Hullámhossz					
286,5 nm	53,48009	67,43379	73,47971	73,74482	79,7997
290,0 nm	53,88715	68,67383	74,10293	74,59294	80,26543
293,5 nm	55,93534	68,75029	74,64987	76,21093	80,87659
297,0 nm	62,55386	69,12159	76,32974	77,55236	81,46636
300,5 nm	66,09895	70,39169	76,6468	79,18626	81,51668
304,0 nm	68,54569	70,73104	77,81481	79,67719	81,3931
307,5 nm	68,82971	71,17639	78,71721	80,50234	82,03949
311,0 nm	69,0411	71,44037	79,46508	80,99429	82,67824
314,5 nm	68,18945	71,68813	79,87283	81,40606	82,65497
318,0 nm	67,27514	71,94095	81,24859	81,81878	82,84612
321,5 nm	66,6926	72,27837	81,64356	83,05723	83,43006
325,0 nm	66,14092	72,41608	82,21821	83,28131	83,54775
328,5 nm	65,66804	72,7343	83,1022	83,24655	83,93596
332,0 nm	66,19371	72,79706	83,39653	84,35177	83,42505
335,5 nm	67,1561	73,10502	83,7495	83,93809	84,17349
339,0 nm	68,28495	73,34678	83,68159	84,64254	84,17213
342,5 nm	70,34717	73,36885	84,23742	84,61377	84,09008
346,0 nm	72,49278	73,71912	84,22129	84,80838	84,54031
349,5 nm	74,9901	73,85548	83,97996	85,19511	84,70746
353,0 nm	77,44003	73,77511	84,78987	85,32903	84,23531
356,5 nm	80,42081	74,2793	84,73628	85,8397	84,50186
360,0 nm	82,67067	74,37246	84,96966	85,93558	84,55548
363,5 nm	84,8838	74,60419	85,15425	86,06976	84,48387

7.15. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt [F (5 % UV stabil)].

Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Unexp.	2003.07.02	2003.08.07	2003.09.18	2003.10.14
Hullámhossz					
286,5 nm	20,25965	30,79253	71,13066	73,38768	59,88054
290,0 nm	20,63133	30,91786	71,69827	72,84401	60,14273
293,5 nm	23,5344	33,41658	72,20841	74,62191	61,47734
297,0 nm	28,99959	37,51812	73,86404	75,497	63,5004
300,5 nm	35,00568	41,62347	74,80632	76,40156	65,23734
304,0 nm	39,00758	45,1835	75,50682	76,7431	65,90506
307,5 nm	40,62446	46,04884	76,25195	76,86936	66,63035
311,0 nm	40,65934	46,47371	76,19257	77,041	67,18966
314,5 nm	39,07849	45,74132	76,52855	77,67785	67,25688
318,0 nm	37,40524	44,81178	76,58993	77,93475	67,73276
321,5 nm	36,05889	44,24641	76,22443	78,3315	67,78054
325,0 nm	35,15165	43,61922	76,37662	78,23915	67,96974
328,5 nm	34,89441	43,65635	76,24757	78,49427	68,30128
332,0 nm	35,48528	44,16638	76,30943	78,80509	68,10721
335,5 nm	36,84544	45,16054	76,77841	78,79696	68,77799
339,0 nm	39,31732	46,78074	77,62105	79,232	69,4287
342,5 nm	42,56036	49,12108	78,34773	79,55057	69,95994
346,0 nm	47,12459	52,09897	79,45729	79,7527	70,93659
349,5 nm	52,33835	55,24763	80,19081	79,85057	71,93768
353,0 nm	57,73943	58,76516	80,86626	80,32819	72,56174
356,5 nm	63,98154	62,13978	81,73027	80,7145	73,47181
360,0 nm	69,67599	65,32318	81,97391	81,05456	74,11617
363,5 nm	74,66121	68,20058	83,28906	80,99175	74,95113

7.16. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt [F (20% UV stabil)].

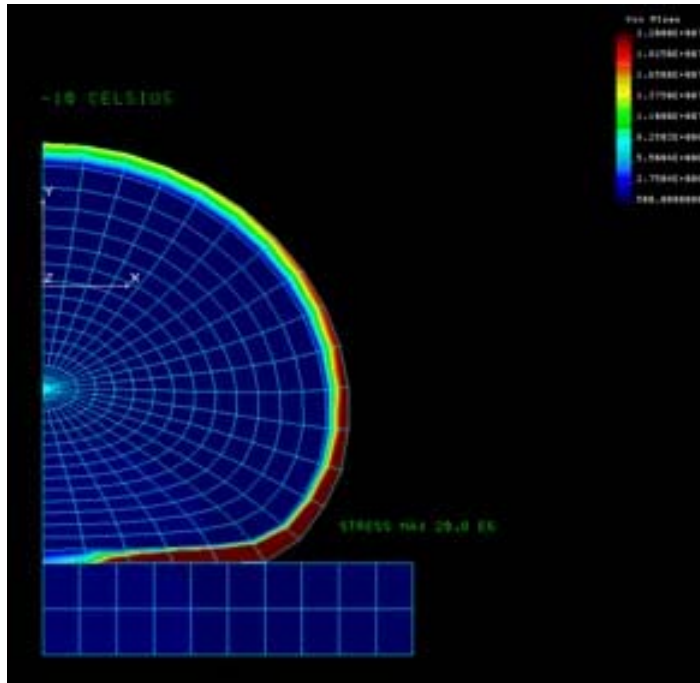
Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Unexp.	2003.07.02	2003.08.07	2003.09.18	2003.10.14
Hullámhossz					
286,5 nm	7,045926	12,37564	64,40913	77,42327	22,02808
290,0 nm	7,065687	12,44209	64,93775	77,56571	22,49092
293,5 nm	8,709379	14,00955	65,62055	77,55803	25,11467
297,0 nm	12,28066	17,75826	66,85261	78,48057	29,39805
300,5 nm	16,56639	21,97245	67,67127	78,66329	33,95961
304,0 nm	20,44787	24,98399	68,46731	78,72399	37,08048
307,5 nm	21,87523	26,65875	69,01005	79,28443	38,82601
311,0 nm	21,98509	26,49185	69,11742	79,53139	38,88121
314,5 nm	20,75074	25,43832	69,86215	79,51116	38,20547
318,0 nm	18,95688	24,25672	69,67817	79,43174	37,12068
321,5 nm	17,90369	23,43004	70,11756	79,72748	36,35904
325,0 nm	17,29098	22,55348	70,48188	79,96817	35,50735
328,5 nm	17,03685	22,44798	70,49404	80,09512	35,99363
332,0 nm	17,61286	22,85915	70,97962	80,55882	36,26541
335,5 nm	18,78562	23,97973	71,05775	80,98228	37,53642
339,0 nm	20,96835	25,85231	71,22901	81,67546	39,29845
342,5 nm	24,00808	28,63021	71,75676	81,15311	41,62929
346,0 nm	28,47966	31,9099	71,86619	81,57208	45,31005
349,5 nm	34,38834	36,59947	72,25569	81,25243	49,24993
353,0 nm	41,03754	41,72738	72,76935	81,70725	53,69357
356,5 nm	48,99104	47,3325	73,24415	81,65811	57,95046
360,0 nm	56,89162	52,50864	73,6746	82,22292	62,06958
363,5 nm	64,15907	57,73401	73,73481	82,15931	65,87831

7.17. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt [L (5% UV stabil)].

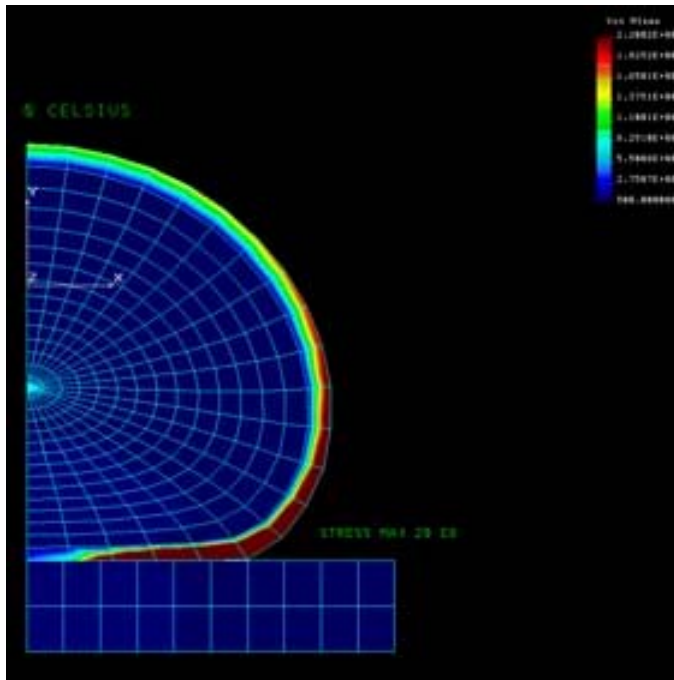
Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Unexp.	2003.07.02	2003.08.07	2003.09.18	2003.10.14
Hullámhossz					
286,5 nm	15,49451	23,47491	39,69726	37,85617	33,26677
290,0 nm	15,21911	23,82858	40,34742	38,65668	33,8927
293,5 nm	16,93339	24,42534	40,24264	38,44346	34,30295
297,0 nm	19,77202	25,39909	40,53829	39,07713	34,79349
300,5 nm	22,41828	26,57921	40,51292	39,12414	35,27403
304,0 nm	24,63231	27,24599	40,71141	39,57872	35,63911
307,5 nm	25,36765	27,78011	41,21049	40,31257	36,20396
311,0 nm	25,68917	28,17649	42,03324	41,48387	36,97941
314,5 nm	25,0442	28,32384	42,4629	41,94775	37,83574
318,0 nm	24,69665	28,98316	43,24979	42,80912	38,74007
321,5 nm	24,72954	29,48571	44,91063	44,26408	40,30716
325,0 nm	24,65835	29,71857	45,35514	45,09281	40,92599
328,5 nm	24,56658	29,65778	45,55484	45,5088	41,78163
332,0 nm	24,76863	29,68219	45,36333	46,17052	41,73939
335,5 nm	25,32193	29,91807	44,56032	46,3136	42,12597
339,0 nm	26,39033	29,99483	44,35964	45,92442	41,61266
342,5 nm	27,94558	30,05957	44,18567	45,29262	41,36355
346,0 nm	29,92814	30,74784	44,16252	45,12992	41,33792
349,5 nm	32,31307	31,25409	43,98335	44,98578	41,29324
353,0 nm	34,63883	32,17408	43,88917	45,10531	41,53688
356,5 nm	37,25458	32,73046	43,86121	45,01686	41,5606
360,0 nm	39,61007	33,30052	44,0321	45,32619	42,08032
363,5 nm	41,78642	33,74017	44,08667	45,35443	42,13218

7.18. táblázat. A fóliák transzmissziós spektruma a vizsgálati időszak alatt [L (20% UV stabil)].

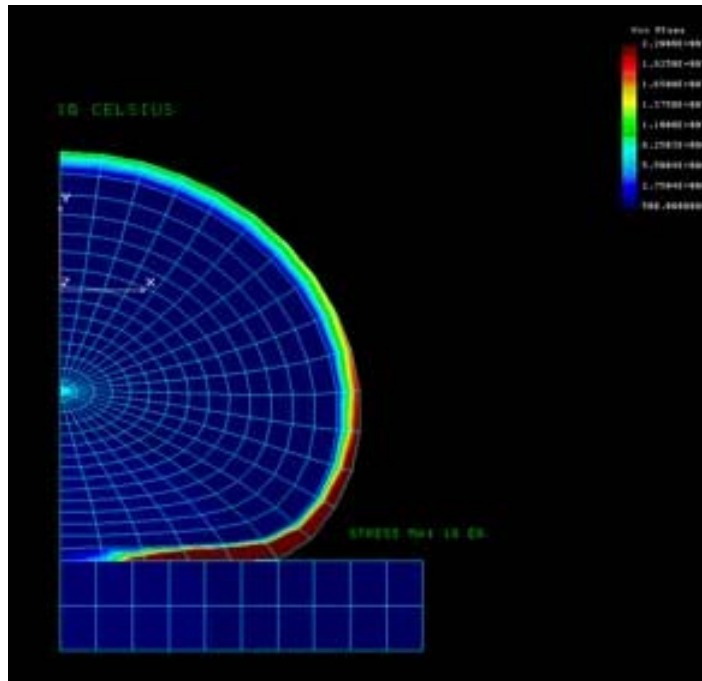
Jellemző	Fóliák transzmissziója (%)				
	Unexp.	2003.07.02	2003.08.07	2003.09.18	2003.10.14
Hullámhossz					
286,5 nm	0,690095	0,83387	2,452941	7,894463	4,677764
290,0 nm	0,643217	0,777224	2,415338	6,801083	5,673112
293,5 nm	0,871026	1,052495	2,668702	6,665839	5,148762
297,0 nm	1,183179	1,429682	2,948478	6,763881	4,889813
300,5 nm	1,548635	1,871277	3,063279	6,447564	5,119848
304,0 nm	1,945769	2,35115	3,498302	6,445626	5,116841
307,5 nm	2,198293	2,656284	3,90482	6,982448	5,263447
311,0 nm	2,144657	2,591473	4,451852	7,618648	6,139002
314,5 nm	2,009106	2,427682	4,51987	7,787997	6,448327
318,0 nm	1,98942	2,403895	4,806014	8,461653	6,699931
321,5 nm	2,213136	2,67422	5,326915	9,344598	7,543219
325,0 nm	2,111481	2,551387	5,452871	9,848291	7,791435
328,5 nm	2,129152	2,572739	5,771395	10,28293	7,913736
332,0 nm	2,238004	2,704268	5,779903	10,43961	7,358284
335,5 nm	2,312099	2,793801	5,903752	10,40687	7,040153
339,0 nm	2,482212	2,999355	5,691799	9,947767	6,799014
342,5 nm	2,743668	3,315282	5,702656	9,612433	6,668263
346,0 nm	3,006629	3,633028	5,523333	9,17278	6,51607
349,5 nm	3,485564	4,211745	5,68914	8,982113	6,452958
353,0 nm	3,962765	4,788366	5,933283	9,027115	6,439338
356,5 nm	4,503068	5,441236	6,028245	8,76472	6,371867
360,0 nm	5,11107	6,175908	6,474177	8,996772	6,38352
363,5 nm	5,695099	6,881614	6,381726	8,705498	6,469787

M3. Alakváltozási mező és feszültségeloszlás a fóliában.

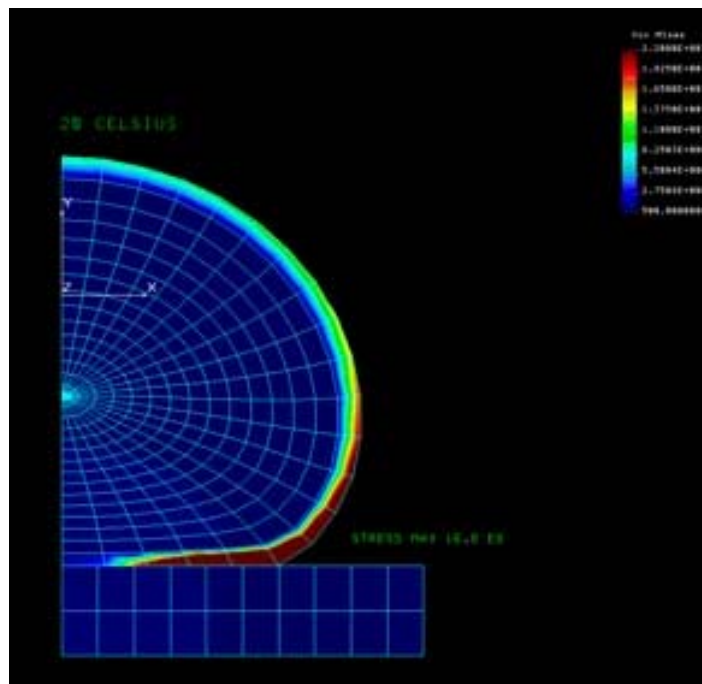
7.1. ábra. Alakváltozás és feszültségeloszlás a fóliában -10°C-on.



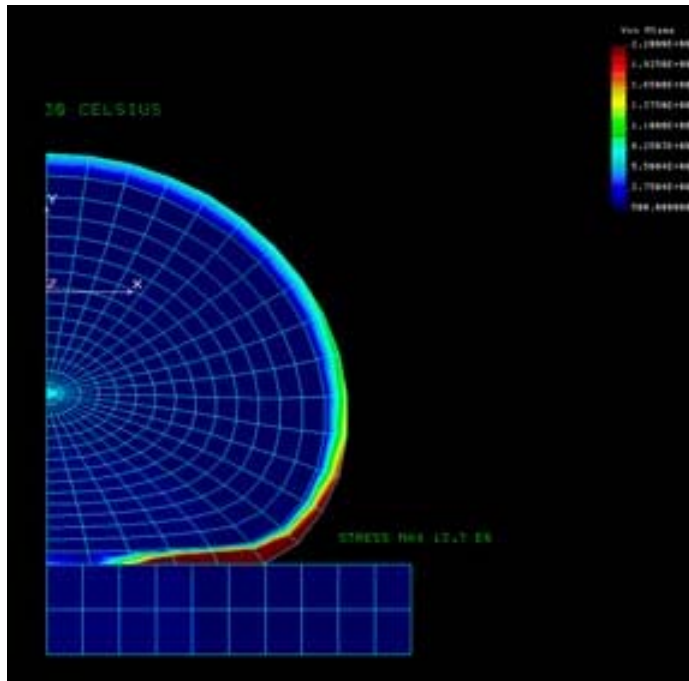
7.2. ábra. Alakváltozás és feszültségeloszlás a fóliában 0°C-on.



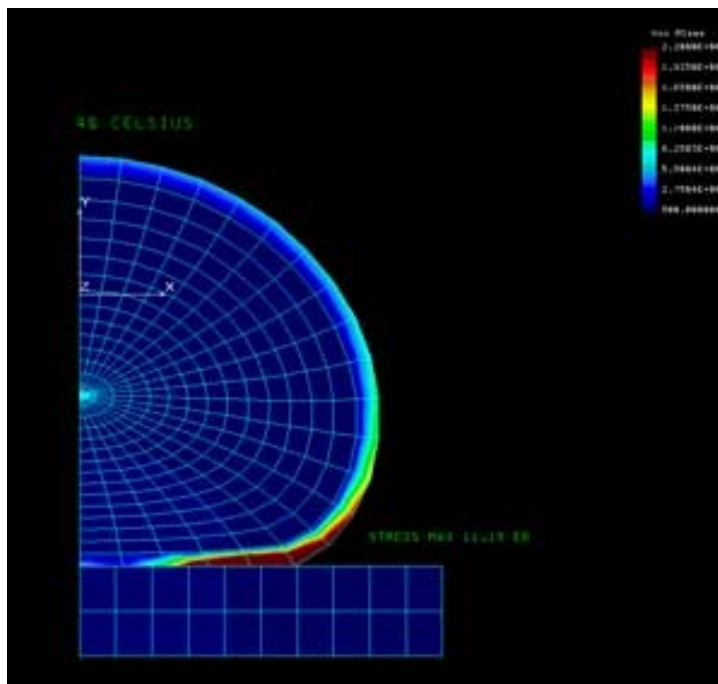
7.3. ábra. Alakváltozás és feszültségeloszlás a fóliában 10°C-on.



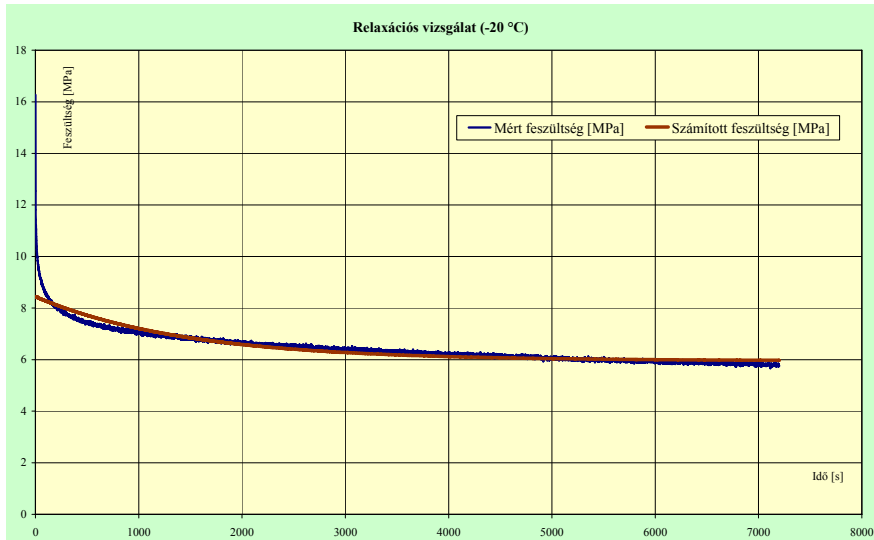
7.4. ábra. Alakváltozás és feszültségeloszlás a fóliában 20°C-on.



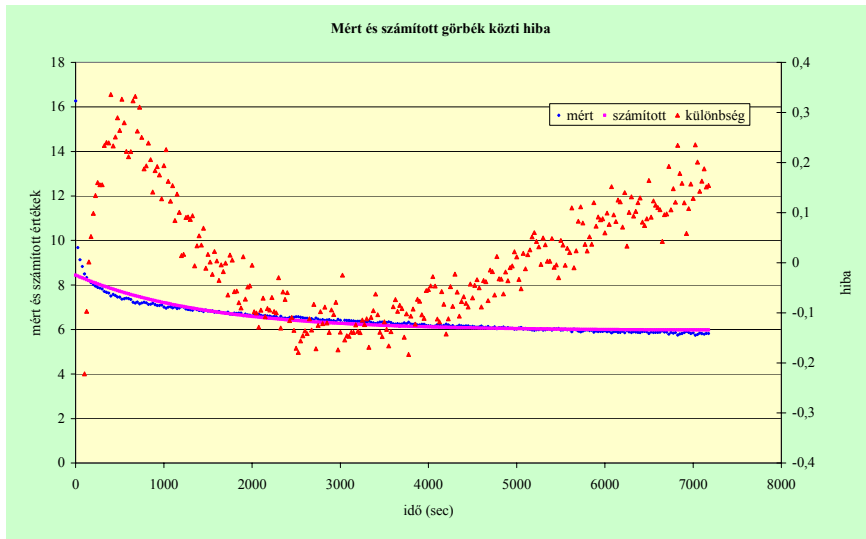
7.5. ábra. Alakváltozás és feszültségeloszlás a fóliában 30°C-on.



7.6. ábra. Alakváltozás és feszültségeloszlás a fóliában 40°C-on.

M4. A relaxációs mérések görbéi és statisztikai elemzésük

7.8. ábra. A -20°C-on mért és számított relaxációs görbék.



7.9. ábra. A -20°C-on mért és számított görbék közötti hiba.

Részletes tesztek a -20°C -on mért és számított relaxációs görbéken.

1. Az eredeti *relatív hibák* tesztvizsgálatai

W A L D - W O L F O W I T Z P R Ó B A

Nr./Itáv	R	ELSŐFAJÚ HIBA VALÓ- SZÍNŰSÉGE	mintaszám	VÉLETLEN?
1 1	13.1689	0.0000	218	NEM!

FUTAMPRÓBA: VÉLETLENSÉGTESZT
A MÁTRIX 1 . OSZLOPÁRA

A mérés száma: rhi
forrásadat: 218

lépéstáv	mintaszám	R	ELSŐFAJÚ HIBA VALÓ- SZÍNŰSÉGE	VÉLETLEN?
1	218	-10.837	0.0000	NEM!

Trend

Az U érték: -10.49492
 Elsőfajú hiba P: 9.319756E-26

Erősen növekvő trend tapasztalható a mintában.

Normalitás

Khi-négyzet próba

o s z t á l y
 ma alsó felső mért várt % relatív r a j z a

1	-3.0	-2.1	26	18	11.9	I*****o**
2	-2.1	-1.3	53	35	24.3	I*****o*****
3	-1.3	-0.4	44	48	20.2	I***** o
4	-0.4	0.5	35	48	16.1	I***** o
5	0.5	1.3	22	34	10.1	I***** o
6	1.3	2.2	29	17	13.3	I*****o*****
7	2.2	3.1	7	6	3.2	I**o
8	3.1	3.9	2	2	0.9	Io

khi-négyzet próba normális eloszlásra

khi-négyzetösszeg= 23.2043
 szabadságfok khi-négyzet táblázathoz = 3
 annak valószínűsége, hogy $\chi^2 > \text{mint } 23.2043 = 2.187491\text{E-}05$

Az adatok ellentmondásban vannak a normális eloszlás feltételezésével.

Kolmogorov teszt normalitásra

AZ ADATOK ÁTLAGA:	-0.42856	
SZORÁSA:	1.476246	
ELEMSZÁMA:	218	
veszteség lenn:	0	
fenn:	0	
ELTÉRÉSÉNEK MAXIMUMA:		8.315811E-02
SQR(N)*DMAX:		1.227815
AZ ELSŐFAJÚ HIBA VALÓSZÍNŰSEGE P:		9.807444E-02

A HIPOTÉZIS 95%-OS SZINTEN ELFOGADHATÓ.

2. A másodrendű trend eliminálása után megmaradó *relatív hibák* tesztvizsgálatai

W A L D - W O L F O W I T Z PRÓBA

A mérés száma: rhi2

Nr./ltáv	R	ELSŐFAJÚ HIBA VALÓ- SZÍNŰSÉGE	mintaszám	VÉLETLEN?
1 1	4.9656	0.0000	218	NEM!

FUTAMPRÓBA: VÉLETLENSÉGTESZT A MÁTRIX 1 . OSZLOPÁRA

A mérés száma: rhi2
forrásadat: 218

lépéstáv	mintaszám	R	ELSŐFAJU HIBA VALÓ- SZÍNŰSÉGE	VÉLETLEN? DÖNTÉS
1	218	-4.470	0.0000	NEM!

Trend

Az U érték: -1.313509
Elsőfajú hiba P: 0.1890145

Nincs trend a mintában.

Normalitás

Khi-négyzet próba

o s z t á l y

ma alsó felső mért várt % relatív r a j z a

1	-2.0	-1.5	2	1	0.9	I _o
2	-1.5	-1.1	7	7	3.2	I*** _o
3	-1.1	-0.7	17	22	7.8	I***** _o
4	-0.7	-0.2	51	44	23.4	I***** _{o**}
5	-0.2	0.2	58	58	26.6	I***** _o
6	0.2	0.6	41	49	18.8	I***** _o
7	0.6	1.1	30	26	13.8	I***** _{o*}
8	1.1	1.5	12	9	5.5	I*** _o

khi-négyzet próba normális eloszlásra

khi-négyzetösszeg=	3.394597
szabadságfok khi-négyzet táblazathoz=	3
annak valószínűsége, hogy $\chi^2 >$ mint 3.394597 =	0.3346822

A normalitás hipotézise 95%-os szinten elfogadható.

Kolmogorov próba

AZ ADATOK ATLÁGA:	0.0188181
SZORÁSA:	0.6361039
ELEMSZÁMA:	218
veszteség lenn:	0
fenn:	0
ELTÉRÉSÉNEK MAXIMUMA:	0.0353812
SQR(N)*DMAX:	0.5223971
AZ ELSŐFAJÚ HIBA VALÓSZÍNŰSÉGE P:	0.9481091

A normalitás hipotézise 95%-os szinten elfogadható.

3. A harmadrendű trend eliminálása után megmaradó *relatív hibák* tesztvizsgálatai

W A L D - W O L F O W I T Z PRÓBA

Nr./ltáv	R	ELSŐFAJÚ HIBA VALÓ- SZÍNŰSÉGE	mintaszám	VÉLETLEN?
1 1	1.3381	0.1809	218	95%: IGEN.

FUTAMPRÓBA: VÉLETLENSÉGTESZT A MÁTRIX 1 . OSZLOPÁRA

A mérés száma: rhi3
forrásadat: 218

lépéstáv	mintaszám	R	ELSŐFAJÚ HIBA VALÓ- SZÍNŰSÉGE	VÉLETLEN?
1	218	-0.406	0.6845	95%: IGEN

Trend

Az U érték: 0.4002127
Elsőfajú hiba P: 0.68901

Nincs trend a mintában.

Normalitás

Khi-négyzet próba

	o	s	z	t	á	l	y	
szahatárjai								gyakoriságok
ma alsó felső mért várt %								relatív rajza
1	-1.5	-1.1	4	4	1.8			I*o
2	-1.1	-0.7	13	17	6.0			I***** o
3	-0.7	-0.3	51	42	23.4			I*****o***
4	-0.3	0.1	56	62	25.7			I***** o
5	0.1	0.5	59	54	27.1			I*****o**
6	0.5	0.9	23	28	10.6			I***** o
7	0.9	1.3	10	9	4.6			I****o
8	1.3	1.7	2	2	0.9			Io

khi-négyzet próba normális eloszlásra

khi-négyzetösszeg=	5.09479
szabadságfok khi-négyzet táblázathoz=	3
annak valószínűsége, hogy $\chi^2 > \text{mint } 5.09479 =$	0.1649742

A normalitás hipotézise 95%-os szinten elfogadható.

Kolmogorov próba

AZ ADATOK ÁTLAGA:	-1.137018E-02
SZORÁSA:	0.5286939
ELEMSZÁMA:	218
veszteség lenn:	0
fenn:	0
ELTÉRÉSENEK MAXIMUMA:	5.211309E-02
SQR(N)*DMAX:	0.7694405
AZ ELSŐFAJÚ HIBA VALÓSZÍNŰSÉGE P:	0.5945621

A normalitás hipotézise 95%-os szinten elfogadható.

4. A negyedrendű trend eliminálása után megmaradó *relatív hibák* tesztvizsgálatai

W A L D - W O L F O W I T Z PRÓBA

A mérés száma: rhi4

Nr./ltáv	R	ELSŐFAJÚ HIBA VALÓ- SZÍNŰSÉGE	mintaszám	VÉLETLEN?
1 1	1.3121	0.1895	218	95%: IGEN.

FUTAMPRÓBA: VÉLETLENSÉGTESZT

A mérés száma: rhi4

forrásadat: 218

lépéstáv	mintaszám	R	ELSŐFAJÚ HIBA VALÓ- SZÍNŰSÉGE	VÉLETLEN?
1	218	-0.135	0.8923	95%: IGEN

Trend-teszt

Az U érték: 0.1759262

Elsőfajú hiba P: 0.8603644

Nincs trend a mintában.

Normalitás

khi-négyzet próba

o	s	z	t	á	l	y	
1	-1.5	-1.1	3	4	1.4		I*o
2	-1.1	-0.7	13	16	6.0		I***** o
3	-0.7	-0.3	47	40	21.6		I*****o**
4	-0.3	0.1	62	61	28.4		I*****o
5	0.1	0.5	53	56	24.3		I***** o
6	0.5	0.9	27	30	12.4		I***** o
7	0.9	1.2	11	9	5.0		I****o
8	1.2	1.6	2	2	0.9		Io

khi-négyzet próba normális eloszlásra

khi-négyzetösszeg=	2.437892
szabadságfok khi-négyzet táblázathoz=	3
annak valószínűsége, hogy $\chi^2 > \text{mint } 2.437892 =$	0.4866126

A normalitás hipotézise 95%-os szinten elfogadható.

Kolmogorov próba

AZ ADATOK ÁTLAGA:	-9.220123E-03
SZORÁSA:	0.5278065
ELEMSZÁMA:	218
veszteség lenn:	0
fenn:	0
ELTÉRÉSENEK MAXIMUMA:	4.783285E-02
SQR(N)*DMAX:	0.7062435
AZ ELSŐFAJÚ HIBA VALÓSZÍNŰSÉGE P:	0.7008183

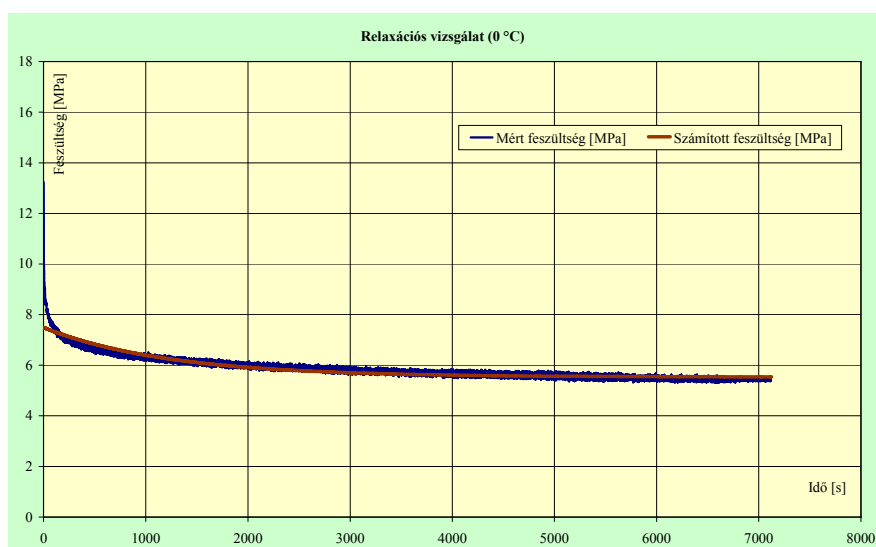
A normalitás hipotézise 95%-os szinten elfogadható.

Összefoglalva

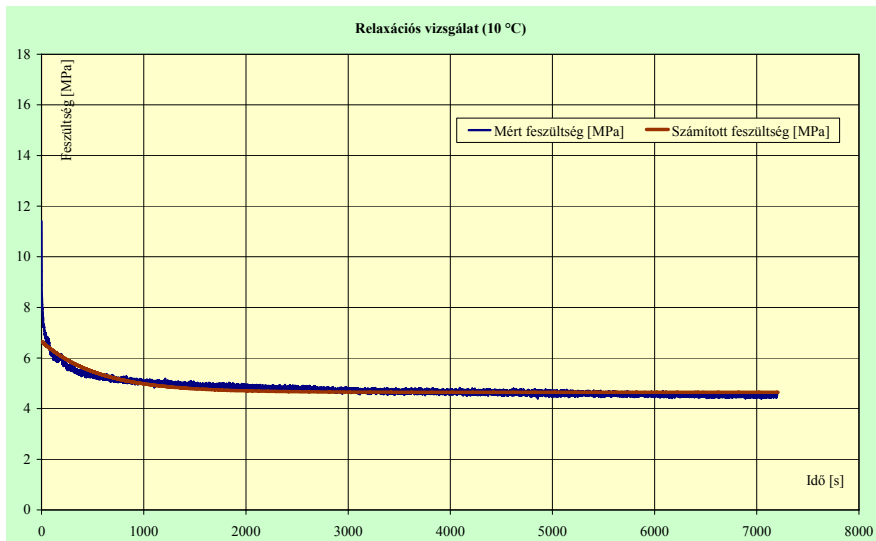
7.19. táblázat. A relatív hibák értékelése 20°C-on.

Eset	A mintaelemek függetlenek és azonos eloszlásúak P=95%?			A minta lehet normális eloszlású P=95%?	
	Wald	futam	trend	χ^2	Kolmogorov
eredeti hiba	Nem	Nem	Nem	Nem	Igen
2-rendű eliminálás maradék hibája	Nem	Nem	Igen	Igen	Igen
3-rendű eliminálás maradék hibája	Igen	Igen	Igen	Igen	Igen
4-rendű eliminálás maradék hibája	Igen	Igen	Igen	Igen	Igen

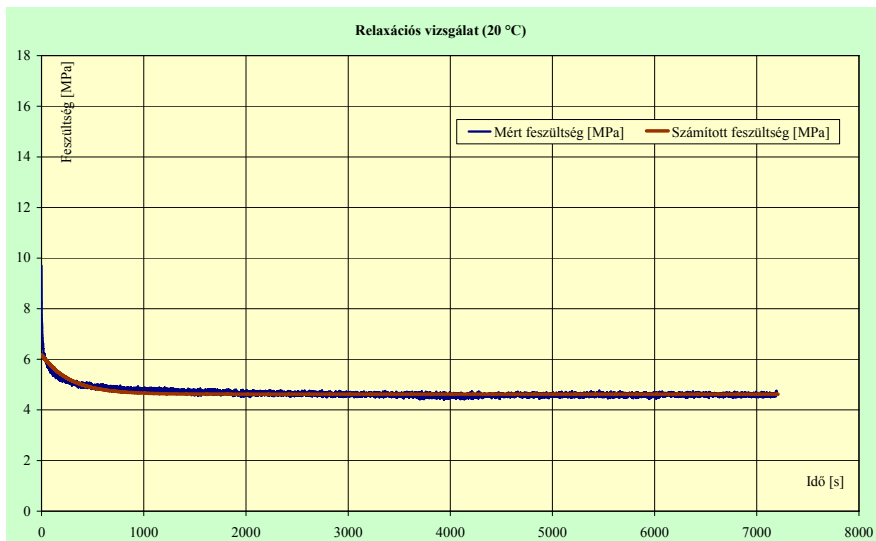
A harmadfokú parabolával végzett hibakiegyenlítés után megmaradó 'maradék' a jó hiba.



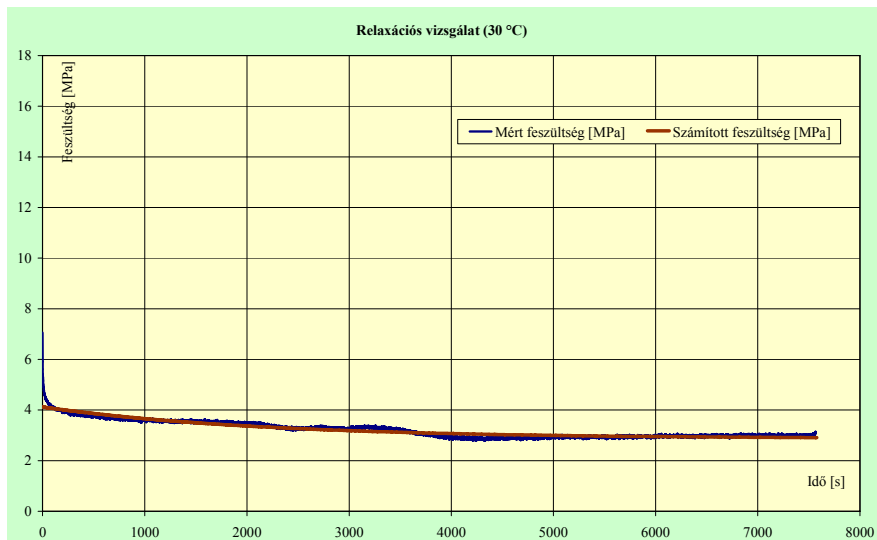
7.10. ábra. A 0°C-on mért és számított relaxációs görbék.



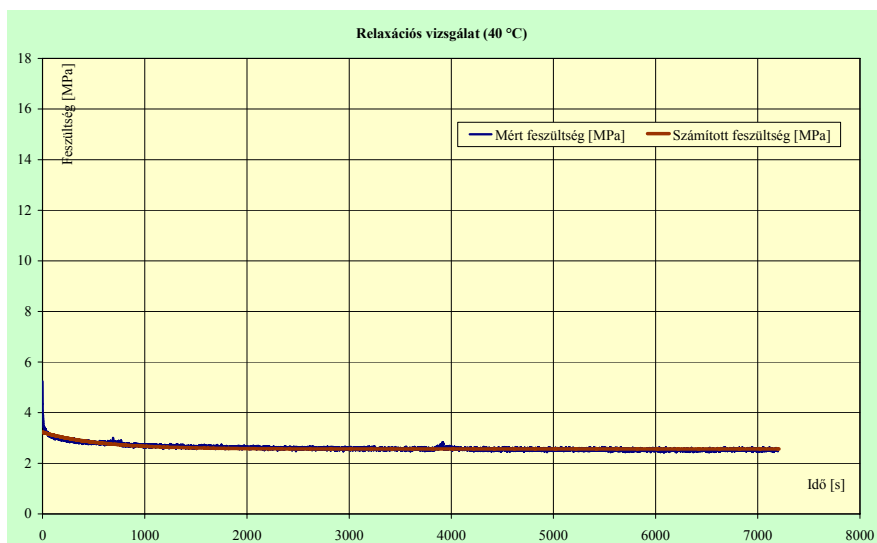
7.11. ábra. A 10°C-on mért és számított relaxációs görbék.



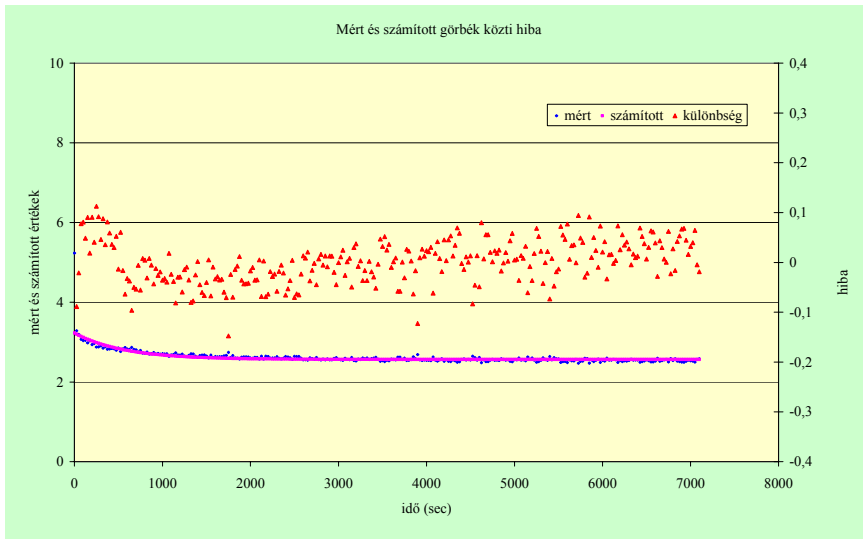
7.12. ábra. A 20°C-on mért és számított relaxációs görbék.



7.13. ábra. A 30°C-on mért és számított relaxációs görbék.



7.14. ábra. A 40°C-on mért és számított relaxációs görbék.



7.15. ábra. A 40°C-on mért és számított görbék közti hiba.

7.20. táblázat. A relatív hibák értékelése 40°C-on.

Eset	A mintaelemek függetlenek és azonos eloszlásúak P=95%, 99%?			A minta lehet normális eloszlású P=95%, 99%?	
	Wald	futam	trend	χ^2	Kolmogorov
Eredeti hiba	N/N	N/N	N/N	I/I	I/I
2-rendű eliminálás maradék hibája	N/I	I/I	I/I	N/N	I/I
3-rendű eliminálás maradék hibája	N/I	I/I	I/I	N/I	I/I
4-rendű eliminálás maradék hibája	N/I	I/I	I/I	N/I	I/I

A harmadfokú parabolával végzett hibakiegyenlítés után megmaradó 'maradék' a jó hiba.

M5. SES fájl a COSMOS futtatásához

```

C*
C* COSMOSM GeoStar 2.85 (64K Version)
C* Problem : hurka15          Date : 02-05-2004 Time : 12:15:23
C*
C*
C* COSMOSM GeoStar 2.85 (64K Version)
C* Problem : hurka15          Date : 02-05-2004 Time : 12:23:35
C*
C* FILE,C:\working\hurka\Hurka15.gfm,1,1,1,1
PTTOL,5E-005
CTTOL,0.0001
PT,1,0,0,0
PT,2,-2.75536E-016,-1.5,0
PT,3,-2.75904E-016,-1.502,0
...
PT,16,2,-1.505,0
PT,17,2,-2,0
CRGFORM,1,0,0,0,-2.75536E-016,-1.5,0,-2.75536E-016,-1.5,0,-2.75536E-016&,-1.5,0
CRGFORM,2,-2.75536E-016,-1.5,0,-2.75904E-016,-1.502,0,-3.67374E-019,-0&.001999997,0,-
3.67374E-019,-0.001999997,0
CRGFORM,3,0,0,0,1.06066,-1.06066,0,1.06066,-1.06066,0,1.06066,-1.06066&,0
CRGFORM,4,0,0,0,1.5,1.17077E-007,0,1.5,1.17077E-007,0,1.5,1.17077E-007&,0
CRGFORM,5,0,0,0,1.06066,1.06066,0,1.06066,1.06066,0,1.06066,1.06066,0
CRGFORM,6,0,0,0,-1.17077E-007,1.5,0,-1.17077E-007,1.5,0,-1.17077E-007,&1.5,0
CRGFORM,7,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
CRGFORM,8,-2.75536E-016,-1.5,0,1.06066,-1.06066,0,1.19347,0,0,0.843914&,0.843914,0
...
CRGFORM,25,1,-2,0,2,-2,0,1,0,0,1,0,0
CRGFORM,26,2,-1.505,0,2,-2,0,0,-0.495,0,0,-0.495,0
SFGFORM,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-2.75536E-016,-1.5,0,1.06066,-1.06066&
6,0,1.19347,0,0,0.843914,0.843914,0,-2.75536E-016,-1.5,0,1.06066,-1.06&
066,0,1.19347,0,0,0.843914,0.843914,0,-2.75536E-016,-1.5,0,1.06066,-1.&
06066,0,1.19347,0,0,0.843914,0.843914,0
SFGFORM,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1.06066,-1.06066,0,1.5,1.17077E-007,&
0,0.843914,0.843914,0,-2.28985E-007,1.19347,0,1.06066,-1.06066,0,1.5,1&
.17077E-007,0,0.843914,0.843914,0,-2.28985E-007,1.19347,0,1.06066,-1.0&
6066,0,1.5,1.17077E-007,0,0.843914,0.843914,0,-2.28985E-007,1.19347,0
...
SFGFORM,9,0,-1.505,0,1,-1.505,0,1,0,0,1,0,0,0,-2,0,1,-2,0,1,0,0,1,0,0,&
0,-0.495,0,0,-0.495,0,1E-016,0,0,1E-016,0,0,0,-0.495,0,0,-0.495,0,1E-0&
16,0,0,1E-016,0,0
SFGFORM,10,1,-1.505,0,2,-1.505,0,1,0,0,1,0,0,1,-2,0,2,-2,0,1,0,0,1,0,0&
,0,-0.495,0,0,-0.495,0,1E-016,0,0,1E-016,0,0,0,-0.495,0,0,-0.495,0,1E-&
016,0,0,1E-016,0,0
EGROUP,1,PLANE2D,1,0,2,0,0,0,0,0
EGROUP,2,PLANE2D,0,1,2,0,0,0,0,0
EGROUP,3,PLANE2D,0,1,2,0,0,0,0,0
EGROUP,4,GAP,1,0,0,1,2,0,0,0
MPROP,1,EX,1000000

```


MPROP,1,NUXY,0.30000001
MPROP,1,GXY,800
MPROP,1,DENS,2000
MPROP,1,MPERM_R,1
MPROP,2,EX,20000
MPROP,2,NUXY,0.30000001
MPROP,2,MPERM_R,1
MPROP,3,EX,1E+009
MPROP,3,NUXY,0.30000001
MPROP,3,MPERM_R,1
RCONST,1,1,1,2,0,0
RCONST,2,2,1,2,0,0
RCONST,3,3,1,2,0,0
RCONST,4,4,1,6,0,0,0,1E+008,0
RCONST,4,4,7,4,1,0,10,0
ACTSET,CS,0
ND,1,0,0,0,1,7,1,0,0,0
ND,2,-1.488153E-017,-0.08101394,0,0,1,1,0,0,0
ND,3,-3.0200361E-017,-0.16440853,0,0,1,1,0,0,0
ND,4,-4.5969352E-017,-0.25025374,0,0,1,1,0,0,0
ND,5,-6.2201706E-017,-0.3386215,0,0,1,1,0,0,0
ND,6,-7.8911039E-017,-0.42958587,0,0,1,1,0,0,0
...
ND,362,1.5999999,-1.505,0,0,24,10,0,0,0
ND,363,1.5999999,-1.7525001,0,0,0,10,0,0,0
ND,364,1.5999999,-2,0,0,25,10,0,0,0
ND,365,1.8,-1.505,0,0,24,10,0,0,0
ND,366,1.8,-1.7525001,0,0,0,10,0,0,0
ND,367,1.8,-2,0,0,25,10,0,0,0
ND,368,2,-1.505,0,16,26,10,0,0,0
ND,369,2,-1.7525001,0,0,26,10,0,0,0
ND,370,2,-2,0,17,25,10,0,0,0
ACTSET,EG,1
ACTSET,MP,1
ACTSET,RC,1
ACTSET,ECS,-1
EL,1,SF,1,4,1,2,17,1,1,0,0,7,1,0
EL,2,SF,1,4,2,3,18,17,1,0,0,0,1,0
EL,3,SF,1,4,3,4,19,18,1,0,0,0,1,0
EL,4,SF,1,4,4,5,20,19,1,0,0,0,1,0
EL,5,SF,1,4,5,6,21,20,1,0,0,0,1,0
EL,6,SF,1,4,6,7,22,21,1,0,0,0,1,0
EL,7,SF,1,4,7,8,23,22,1,0,0,0,1,0
EL,8,SF,1,4,8,9,24,23,1,0,0,0,1,0
EL,9,SF,1,4,9,10,25,24,1,0,0,0,1,0
...
EL,299,SF,4,4,299,300,315,314,0,0,6,0,4,0
EL,300,SF,4,4,300,301,316,315,0,11,6,0,4,0
ACTSET,EG,2
ACTSET,MP,2
ACTSET,RC,2
EL,301,SF,5,4,16,317,318,31,2,16,0,8,5,0

EL,302,SF,5,4,31,318,319,46,0,16,0,8,5,0
...
EL,318,SF,8,4,271,334,335,286,0,19,0,11,8,0
EL,319,SF,8,4,286,335,336,301,0,19,0,11,8,0
EL,320,SF,8,4,301,336,337,316,0,19,15,11,8,0
ACTSET,EG,3
ACTSET,MP,3
ACTSET,RC,3
EL,321,SF,9,4,338,339,342,341,20,0,0,22,9,0
EL,322,SF,9,4,339,340,343,342,20,23,0,0,9,0
EL,323,SF,9,4,341,342,345,344,0,0,0,22,9,0
...
EL,338,SF,10,4,363,364,367,366,0,25,0,0,10,0
EL,339,SF,10,4,365,366,369,368,0,0,26,24,10,0
EL,340,SF,10,4,366,367,370,369,0,25,26,0,10,0
ACTSET,EG,4
ACTSET,RC,4
EL,341,PT,0,1,317,0,0,0,0,0,0
EL,342,PT,0,1,318,0,0,0,0,0,0
EL,343,PT,0,1,319,0,0,0,0,0,0
EL,344,PT,0,1,320,0,0,0,0,0,0
EL,345,PT,0,1,321,0,0,0,0,0,0
EL,346,PT,0,1,322,0,0,0,0,0,0
DND,1,UX,0,1,1,
DND,2,UX,0,2,1,
...
DND,355,UY,0,355,1,
DND,358,UY,0,358,1,
DND,361,UY,0,361,1,
DND,364,UY,0,364,1,
DND,367,UY,0,367,1,
DND,370,UY,0,370,1,
ACTSET,LC,1
ACTSET,TC,1
ACEL,0,-9.8100004,0
NL_GS,1,338,341,0
NL_GS,2,341,344,0
NL_GS,3,344,347,0
NL_GS,4,347,350,0
NL_GS,5,350,353,0
NL_GS,6,353,356,0
NL_GS,7,356,359,0
NL_GS,8,359,362,0
NL_GS,9,362,365,0
NL_GS,10,365,368,0
CURDEF,TIME,1,1,0,0,2,1,5,1
TOFFSET,0
TREF,0
C*
C* COSMOSM GeoStar 2.85 (64K Version)
C* Problem : hurka15 Date : 11-15-2004 Time : 15:48:49
C*

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Legelőször szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Gelencsér Endrének azért a sok fáradságos munkájáért, amellyel dolgozatom elkészítését irányította és segítette.

Külön köszönettel tartozom Dr. Csorba Lászlónak, aki bevezetett a reológia tudományának rejtelseibe, valamint dolgozatom elkészítése során rengeteg szakmai észrevétellel és tanáccsal látott el, illetve Dr. Bellus Zoltánnak, aki nemcsak témaválasztásomban, hanem szakmai munkám számos fázisában is segítségemre volt. Dr. Borsa Bélának, aki a statisztikai elemzéseknél segítségemre volt.

Köszönettel tartozom még munkahelyem, a Földművelésügyi- és Vidékfejlesztési Minisztérium Mezőgazdasági Gépesítési Intézete főigazgatójának Dr. Fenyvesi Lászlónak, nélkülözhetetlen szakmai és anyagi támogatásáért. Segítsége nélkül nem tudtam volna megvalósítani kitűzött céljaimat.

További köszönet illeti még azokat a munkahelyi kollégáimat is, akik a disszertáció megszületéséhez kisebb-nagyobb mértékben, de mind hozzájárultak.