



Szent István Egyetem

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

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

**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

- 4.23 Csermely J. – Herdovics M. – **Csatár A.**: (2007) A nedvességtartalom befolyása a szemes kukorica fizikai-mechanikai jellemzőire, 6. Magyar Szárítási Szimpózium, Nyíregyháza 2007. november 22-23. (ISBN 978-963-7336-79-9)

Nemzetközi konferencia abstract:

- 5.1 Z. Bellus – **A. Csatár**: (2004) Drying of alfalfa bales on ventilated floor. AgEng 2004 Conference, Engineering the Future, 12-16 September 2004, Leuven, Belgium. (ISBN 90-76019-258)
- 5.2 J. Csermely – M. Herdovics – **A. Csatár**: (2004) Connections among the heat-technical and physical characteristics of the maize drying processes. AgEng 2004 Conference, Engineering the Future, 12-16 September 2004, Leuven, Belgium. (ISBN 90-76019-258)

Nemzetközi konferencia proceedings:

- 6.1 J. Bak – I. Pazsiczki – **A. Csatár**: (2003) Changin in corn silage particle size according to set performance of Gonella D.S.F. 5-190 unloading cutter. The 4th International Conference for Conveying and handling of Particulate Solids, 2003. 27-30 May, Budapest.
- 6.2 Z. Bellus – **A. Csatár**: (2005) New composting technologies. Innovation and utility in the Visegrad fours, Nyíregyháza 2005. október 13-15. (ISBN 963 86918 0 8)
- 6.3 J. Csermely – M. Herdovics – **A. Csatár** – L. Fenyvesi: (2006) The physical and mechanical characteristics of the corn batches during drying, IDS 2006, 15th International Drying Symposium, 20-23 August 2006. Budapest. (ISBN 963 9483 591)
- 6.4 **A. Csatár** – J. Deákvári – L. Kovács: (2006) Diagnostic examinations in agricultural fruit and vegetables dryers, Inframation 2006, 20-27 October 2006. Las Vegas. (ITC 115A 20060522)

Magyar nyelvű könyv:

- 7.1 **Csatár A.** – Csorba L.: (2004) Műanyag csomagoló- és takarófóliák reológiai vizsgálata, Mezőgazdasági gépesítési tanulmányok, Gödöllő (2ív) (ISBN 963 611 422 6)

## Tartalomjegyzék

ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK .....	2
1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, KITŰZÖTT CÉLOK.....	3
2. ANYAG ÉS MÓDSZER .....	7
2.1 UV-transzmissziós vizsgálatok módszere.....	7
2.2 Szilárdsági jellemzők mérése.....	7
2.3 A környezeti hatások vizsgálata.....	8
2.4 A hőmérséklet-idő hasonlósági elv általános görbéinek felépítése .....	9
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS .....	11
3.1 A fóliák transzmissziós jellemzői és a kutatások eredményei .....	11
3.2 A fóliák reológiai jellemzőinek meghatározása.....	15
3.3 A fóliafeszültségek változásának meghatározása a hőmérséklet függvényében.....	19
3.4 A hőmérséklet-idő eltolási tényező állandóinak meghatározása .....	25
4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK .....	28
4.1 A kutatási tevékenység összefoglalása .....	28
4.2 Új tudományos eredmények.....	30
4.2.1 A fóliák transzmissziós tulajdonságainak elemzésénél .....	30
4.2.2 A fóliák reológiai tulajdonságait illetően.....	30
4.2.3 A fóliák feszültség változásának alakulása a hőmérséklet függvényében.....	31
4.2.4 A hőmérséklet-idő eltolási tényező meghatározása .....	31
4.3 A tudományos eredmények gyakorlati alkalmazhatósága .....	32
5. SZAKMAI PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE .....	33

## ALKALMAZOTT FŐBB JELÖLÉSEK

Jel	Megnevezés
$a_0$	differentiálegyenlet állandója, [N/m <sup>2</sup> ]
$a_1$	differentiálegyenlet állandója, [Ns/m <sup>2</sup> ]
$a_T$	a hőmérséklet-idő eltolási tényező, [-]
$b_1$	differentiálegyenlet állandója, [s]
$c_1, c_2$	empirikus állandó, [-]
$E$	rugalmassági modulus, [N/m <sup>2</sup> ]
$E_0, E_1, E_2, \dots$	reológiai modell rugalmas eleme, [N/m <sup>2</sup> ]
$G$	csúsztató rugalmassági modulus, [N/m <sup>2</sup> ]
$I(t)$	érzékenység, [mm <sup>2</sup> /N]
$K$	kompresszibilitási modulus, [N/m <sup>2</sup> ]
$q(t, \tau)$	intenzitásfüggvény, [-]
$t_K$	késleltetési idő, [s]
$T$	hőmérséklet, [°C]
$\Delta h$	a keresztirányú méretváltozás, [mm]
$\Delta l$	hosszirányú méretváltozás, [mm]

Görög betűk

Jel	Megnevezés
$\delta$	Dirac-delta, [1/s]
$\varepsilon$	hosszirányú fajlagos nyúlás, [m/m]
$\dot{\varepsilon}, \ddot{\varepsilon}$	hosszirányú fajlagos nyúlás időszerinti deriváltja, [1/s, 1/s <sup>2</sup> ]
$\varepsilon_\nu$	keresztirányú fajlagos nyúlás, $\varepsilon_\nu = -\nu\varepsilon$ , [m/m]
$\eta$	kúszási tényező, [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\eta_0, \eta_1, \eta_2, \dots$	reológiai modell viszkózus eleme, [N s/m <sup>2</sup> ]
$\vartheta$	relaxációs tényező, [s]
$\mu$	viszkózitási együttható, [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	Poisson tényező, [-]
$\rho$	anyagsűrűség, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	normálfeszültség, [N/m <sup>2</sup> ]
$\tau$	relaxációs idő, [s]

- AMB XXIX. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2005. január 18-19. p.148. (ISBN 963-611-429-3)
- 4.12 Bellus Z. – **Csatár A.** – Marton Cs.: (2006) A szemes termény-roppantás műszaki és technológiai jellemzőinek alakulása. MTA-AMB XXX. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2006. január 24. p.38. (ISBN 963-611-438-2)
- 4.13 Bellus Z. – **Csatár A.** – Marton Cs.: (2006) A komposztálás újabb lehetőségei a mezőgazdaságban. MTA-AMB XXX. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2006. január 24. p.77. (ISBN 963-611-438-2)
- 4.14 **Csatár A.** – Deákvári J. – Kovács L.: (2007) Zöldségszárítók ellenőrzése korszerű diagnosztikai módszerekkel. MTA-AMB XXXI. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2007. január 23. p.107. (ISBN 978-963-611-443-5)
- 4.15 Bellus Z. – **Csatár A.**: (2003) Lucernabálák szárítása padozaton. 5. Magyar Szárítási Szimpózium, Szeged 2003. október 21-22. (ISBN 963 482 647 4)
- 4.16 Bellus Z. – Orosz Sz. – **Csatár A.**: (2004) Gyepre alapozott korszerű szálastakarmány-tartósítási technológiák. Wellmann Oszkár Tudományos Tanácskozás, Hódmezővásárhely 2004. április 24.
- 4.17 Bellus Z. – **Csatár A.**: (2004) Bálázott szálastakarmányok tartósítása a korszerűség jegyében. VI. Nemzetközi Élelmiszertudományi Konferencia, Szeged 2004. május 20-21. (ISBN 963-482-677-6)
- 4.18 **Csatár A.** – Bellus Z.: (2004) Mezőgazdasági csomagolóanyagok és takarófóliák mechanikai jellemzőinek változása a környezeti hatásokra. VI. Nemzetközi Élelmiszertudományi Konferencia, Szeged 2004. május 20-21. (ISBN 963-482-677-6)
- 4.19 Bellus Z. – **Csatár A.** – Csorba L.: (2004) Mezőgazdasági csomagoló fóliák reológiai tulajdonságainak változása a hőmérséklet hatására, XXX. Óvári Tudományos Napok, Mosonmagyaróvár 2004. október 7. (ISSN 0237-9902)
- 4.20 Bellus Z. – **Csatár A.** – Orosz Sz.: (2004) Minőségi szénakészítés bálaszárítással, XXX. Óvári Tudományos Napok, Mosonmagyaróvár 2004. október 7. (ISSN 0237-9902)
- 4.21 Bellus Z. – **Csatár A.**: (2006) Új gépkonstrukciók a mezőgazdasági komposztálás terén, VII. Nemzetközi Élelmiszertudományi Konferencia, Szeged 2006. április 20. (ISBN 963-482-577)
- 4.22 Bellus Z. – **Csatár A.**: (2007) Magas nedvességtartalmú lucerna bálák szárítása, 6. Magyar Szárítási Szimpózium, Nyíregyháza 2007. november 22-23. (ISBN 978-963-7336-79-9)

## Magyar nyelvű proceedings:

- 4.1 Bak J. – **Csatár A.** – Kovács L.: (2003) A strukturált hatékonyság vizsgálata TMR technológiáknál. MTA-AMB XXVII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2003. január 21-22. p.55. (ISBN 963-611-397-1)
- 4.2 Bellus Z. – **Csatár A.** – Darányi J: (2003) Mezőgazdasági takarófoliák mechanikai vizsgálata. MTA-AMB XXVII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2003. január 21-22. p.81. (ISBN 963-611-397-1)
- 4.3 Bellus Z. – **Csatár A.:** (2003) Minőségi szénakészítés bálaszáritással. MTA-AMB XXVII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2003. január 21-22. p.68. (ISBN 963-611-397-1)
- 4.4 Bellus Z. – **Csatár A.:** (2004) Bálázott szénaszáritási technológiák. MTA-AMB XXVIII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2004. január 20-21. p.57. (ISBN 963-611-410)
- 4.5 **Csatár A.** – Bellus Z. – Csorba L.: (2004) Mezőgazdasági csomagoló fóliák mechanikai jellemzői. MTA-AMB XXVIII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2004. január 20-21. p.118. (ISBN 963-611-410)
- 4.6 **Csatár A.** – Bellus Z. – Kovács L.: (2004) Poisson-tényező meghatározása mezőgazdasági csomagoló fóliáknál. MTA-AMB XXVIII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2004. január 20-21. p.251. (ISBN 963-611-410)
- 4.7 Csermely J. – Herdovics M. – **Csatár A.:** (2005) A kukorica fizikai-mechanikai jellemzőinek változása a száritásnál. MTA-AMB XXIX. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2005. január 18-19. p.80. (ISBN 963-611-429-3)
- 4.8 **Csatár A.** – Bellus Z. – Csorba L.: (2005) Mezőgazdasági tároló fóliák reológiai jellemzőinek változása a hőmérséklet függvényében. MTA-AMB XXIX. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2005. január 18-19. p.228. (ISBN 963-611-429-3)
- 4.9 Ragoncza Á. – Bellus Z. – **Csatár A.** – Marton Cs.: (2005) Komposztálási eljárások vizsgálati eredményei. MTA-AMB XXIX. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2005. január 18-19. p.86. (ISBN 963-611-429-3)
- 4.10 Bellus Z – **Csatár A.** – Marton Cs.: (2005) Szemestermények roppantása kettős hengerpárral. MTA-AMB XXIX. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő 2005. január 18-19. p.94. (ISBN 963-611-429-3)
- 4.11 **Csatár A.** – Bellus Z. – Csorba L.: (2005) Fóliák transzmissziós és mechanikai tulajdonságainak alakulása az UV sugárzás hatására. MTA-

## 1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, KITŰZÖTT CÉLOK

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 veszteség-hányadú 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 vállalkozási 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 szalmas- 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

## 5. SZAKMAI PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

### Egyéb magyar nyelvű tudományos cikk:

- 1.1 Bellus Z. – **Csatár A.** – Marton Cs. – Mészáros Gy.: (2002) Wolagri FW 500/Z bálacsomagoló berendezés, Mezőgazdasági Technika, 11.szám p.21. (ISSN 0026 1890)
- 1.2 Bellus Z. – **Csatár A.** – Marton Cs. – Mészáros Gy.: (2002) Wolagri FW 15 J bálacsomagoló berendezés, Mezőgazdasági Technika, p.23. (ISSN 0026 1890)
- 1.3 Bellus Z. – **Csatár A.** – Marton Cs. – Mészáros Gy.: (2002) Gemelli 120/3 SI bálacsomagoló berendezés, Mezőgazdasági technika, p.25. (ISSN 0026 1890)
- 1.4 Bellus Z. – **Csatár A.**: (2003) Apiesse Roto-tube RO170/D fóliatömlőbe töltő gép, Mezőgazdasági Technika, p. 27 (ISSN 0026 1890)
- 1.5 Bellus Z. – **Csatár A.**: (2004) Tauros T-40 silófólia-töltő présberendezés, Mezőgazdasági Technika, p.19. (ISSN 0026 1890)
- 1.6 Bellus Z. – **Csatár A.**: (2004) Ag-Bagger G-6000 silófólia-töltő prés, Mezőgazdasági Technika, p.19. (ISSN 0026 1890)
- 1.7 Bellus Z. – **Csatár A.** – Ragoncza Á.: (2005) Apiesse Roto-Press TCR-300 K komposztáló prés, Mezőgazdasági Technika, p.29. (ISSN 0026 1890)

### Lektorált cikk magyar nyelven:

- 2.1 Bellus Z. – **Csatár A.** – Csorba L.: (2006) Többrétegű fóliatömlő reológiai tulajdonságainak változása a hőmérséklet függvényében, GÉP, 1.szám p.3. (ISSN 0016-8572)

### Lektorált cikk világnyelven:

- 3.1 **A. Csatár** – Z. Bellus – L. Csorba: (2004) Mechanical features of agricultural packaging folis. Hungarian Agricultural Engineering 17. p.44. (ISSN 0864-7410)
- 3.2 J. Csermely – M. Herdovics – **A. Csatár**: (2005) Effect of the drying process on the characteristics of the corn batches. Hungarian Agricultural Engineering 18. p.18. (ISSN 0864-7410)
- 3.3 J. Csermely – M. Herdovics – **A. Csatár**: (2006) Changes of the physical and mechanical characteristics of maize in the course of drying process. Hungarian Agricultural Engineering 19. p.30. (ISSN 0864-7410)

### 4.3 A tudományos eredmények gyakorlati alkalmazhatósága

A fóliák transzmissziós vizsgálatai rámutattak arra, hogy a gyártástechnológiában alkalmazott különböző szinkomponenseknek 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 viskoelasztikus 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.

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.

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

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

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

(20% UV-szűrőanyag tartalmú fehér fólia),

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

(20% UV-szűrőanyag tartalmú lila fólia).

#### 4.2.3 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.

#### 4.2.4 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 kiterjeszhető. A függvény alkalmazásához szükséges tapasztalati állandókat  $c_1 = -62,51$  és  $c_2 = -229,02$  értéken állapítottam meg.

## 4.2 Új tudományos eredmények

### 4.2.1 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<sup>2</sup> halmozott káros energiájú besugárzás első 14,5%-a alatt (800 J/cm<sup>2</sup>) zajlik le.
- A 286-320 nm-es rövidebb UV-B hullámhossz-tartományra jellemző magasabb UV-szűrőképesség 800 J/cm<sup>2</sup> halmozott energiadózis (nyári időszak megközelítőleg 14 napos természetes UV-sugárzása) után, átlagosan 50%-kal esik vissza. A fóliák ezt követően közel azonos mértékben szűrik 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<sup>2</sup> halmozott energiabesugárzás hatására (45 nap folyamatos és természetes UV-sugárzása) veszítik el UV-sugárzás elleni védőképességüket, azaz a védőképesség minimuma a halmozott teljes besugárzás 41,8%-ánál jelentkezik.
- Az 5% és 20% UV-szűrőanyagot tartalmazó lila fóliák a 286-363,5 nm-es spektrumon minimális UV-szűrőképesség esetén is jelentős védeltséget biztosítanak:  $tr_{L5\%} = 45\%$ ;  $tr_{L20\%} = 10\%$ .

### 4.2.2 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 keményednek:

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

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

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

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

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

## 2. ANYAG ÉS MÓDSZER

### 2.1 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 sugárzásáramok 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.

A vizsgálatok során egy Kipp-Zonen piranométerrel kiegészített napsugárzás-mérő rendszer 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.

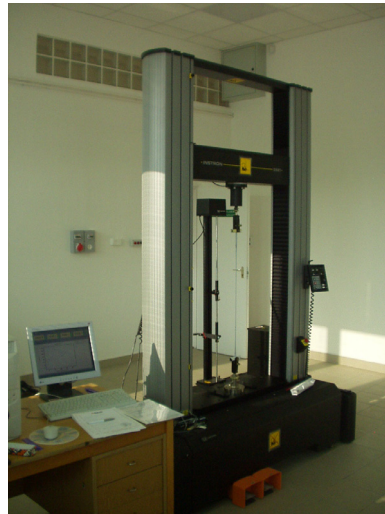
Ennek megfelelően kísérletsorozataimban először meghatároztam az exponátlan fóliák spektrális UV-transzmisszióját, majd ezt követően vizsgáltam ezek megváltozását. Minden transzmisszió-spektrumhoz meghatároztam a mérési tartományra vonatkozó átlagos transzmisszió értékét is.

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. A berendezés az UV-sugárzás intenzitását 0,5 nm-es felbontással a 286,5-363,5 nm értékű hullámhossz-tartományban határozza meg.

### 2.2 Szilárdsági jellemzők mérése

A mechanikai méréseket az FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet anyagvizsgáló laboratóriumában egy Instron 5581-es univerzális anyagvizsgáló berendezéssel hajtottam végre (2.1. 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.



2.1. 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, mely  $-70^{\circ}\text{C}$  és  $+350^{\circ}\text{C}$ -os tartományban,  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  pontossággal tartotta a beállított hőmérsékletet.

### 2.3 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 mérések alkalmával a környezeti hatások függvényében állapítottam meg a mechanikai viselkedést leíró jellemzőket. Minden mérésnél a korrekt

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 céltul 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 befejezésekor 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.

## 4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

### 4.1 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-elemtől 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 rendszerjellemezőit 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 terheléssel 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 többrétegű fóliák néhány vizsgálati

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 terheléssel követő kúszási vizsgálatok időtartama 18 óra volt.

A hőmérséklet és a fólia mechanikai jellemzőinek vizsgálata során a 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 ( $\epsilon_a = 0,05$ ) nyújtottam meg, majd a rendszert 120 percre magára hagytam.

A hőmérséklet és idő hasonlósági elvének vizsgálatok 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 feszültségintet hoztam létre.

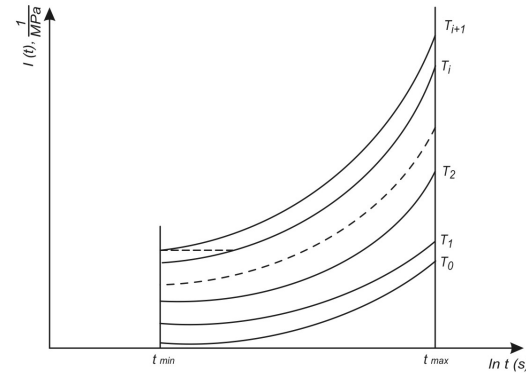
Az eltérő mérési beállításokra a fóliák szín- és szerkezeti különbözősége miatt volt szükség. Ezért minden mérési sorozat előtt próbaméréseket végeztem, amiből láthatóvá vált, hogy mennyi ideig, illetve mekkora terheléssel, vagy nyúlásértékkel kell dolgozni.

### 2.4 A hőmérséklet-idő hasonlósági elv általános görbéinek felépítése

A viszkoelasztikus érzékenységet az:

$$I(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma} \quad (2.1)$$

összefüggéssel számoljuk, ahol  $\epsilon(t)$  tartósfolyási alakváltozás középértékeiből készített görbe,  $\sigma$  a statikus feszültség. A kapott eredményeket az  $I-\ln a_t$  fél-logaritmikus koordináta rendszerben ábrázoljuk (2.2. ábra).



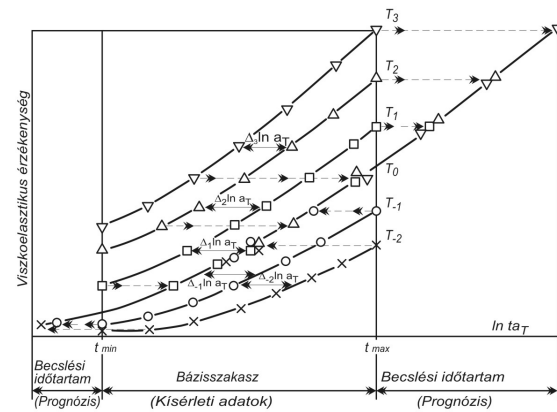
2.2. ábra. Az  $I - \ln t$  koordináta-rendszerben ábrázolt mérési eredmények.

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 (2.3. ábra). A kapott értékeket az  $\ln a_T - (T - T_0)$  koordináta-rendszerben ábrázoljuk. Az így kapott  $\ln a_T = f(T - T_0)$  függvényt lineáris törtfüggvény alakban keressük:

$$\ln a_T = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)} \quad (2.2)$$

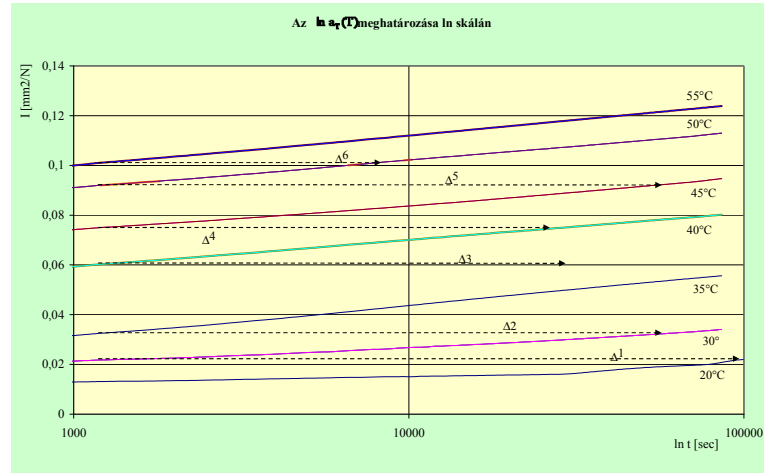
Az általános görbék felépítéséhez az  $\ln a_T$  analitikus értékeit használjuk fel. Ekkor a bázis időtartományban elhelyezkedő  $I(\ln t, T)$  kísérleti görbéket a megfelelő  $\ln a_T$  értékkel eltoljuk a logaritmusos időtengely mentén. Ezen görbék új ideje:

$$\ln(ta_t) = \ln t + \ln a_T \quad (2.3)$$



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

Ezt követően a Williams-Landell-Ferry által javasolt hőmérséklet-idő eltolási tényező összefüggésből a legkisebb négyzetek módszerének segítségével,  $\left[ \ln a_T = \frac{c_1(T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)} \right]$  határoztam meg a  $c_1$  és  $c_2$  értékét. A vonatkoztatási hőmérséklet ekkor  $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  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  $c_2 = -129,45$  (Ursumcev et al. 1982) értékek.

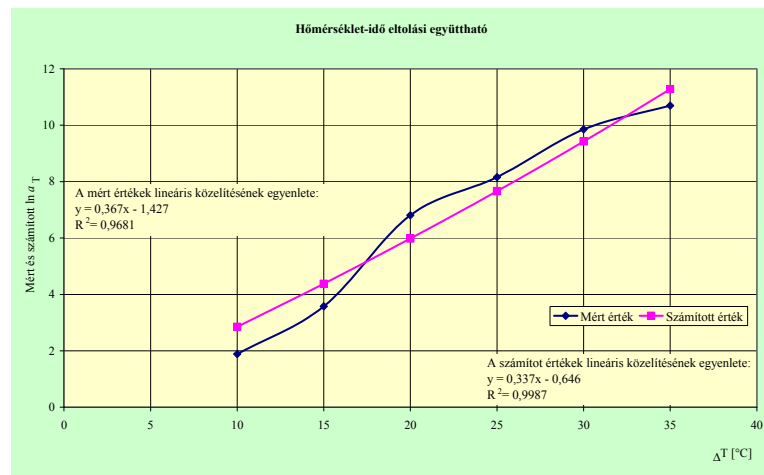


3.14. ábra. Az  $\ln a_T(T)$  meghatározása.

A 3.14. ábra adatait a 3.8. táblázatban foglaltam össze.

3.8. 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

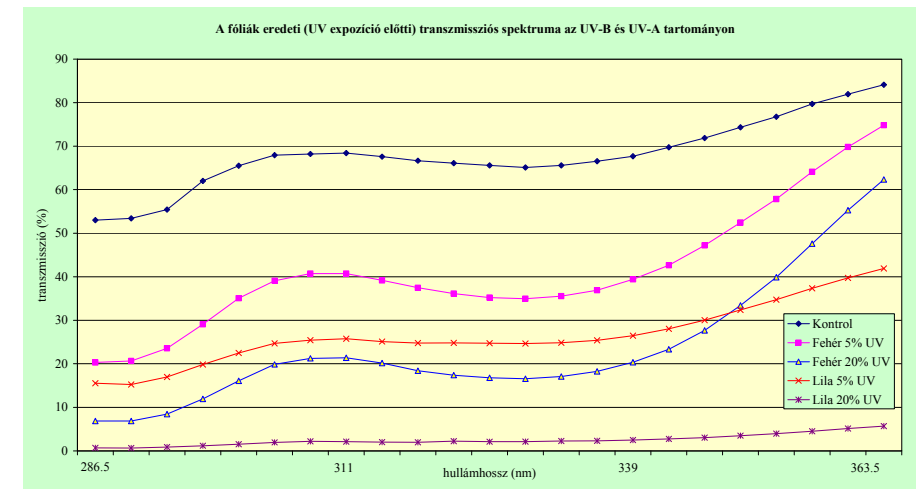


3.15. ábra. A hőmérséklet-idő eltolási együttható alakulása.

### 3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

#### 3.1 A fóliák transzmissziós jellemzői és a kutatások eredményei

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 3.1. ábrán mutatom be, a mérési eredményeket pedig, a 3.1. táblázatban foglaltam össze.



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

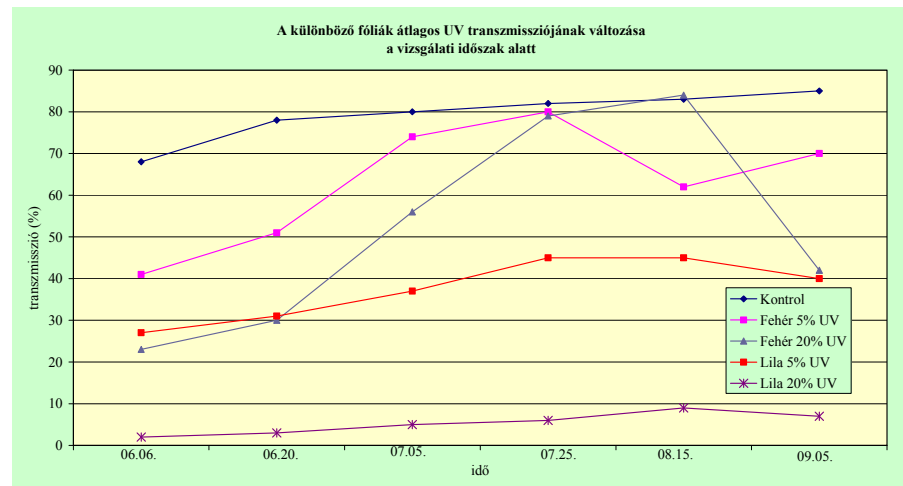
3.1. táblázat. A különböző fóliák transzmissziós spektrumának alakulása.

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
<b>Átlag</b>	<b>67,96</b>	<b>41,43</b>	<b>23,79</b>	<b>26,56</b>	<b>2,49</b>

A következőkben a különböző minták átlagos transzmisszió-változását mutatom be az idő függvényében (3.2. ábra és 3.2. táblázat).

## 3.2. 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



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

A 3.3. ábrán és 3.3. táblázatban 2002.09.05-i mintavételi időpontokhoz tartozó, adott összetételű fóliák transzmisszió-spektrumait szerepeltettem.

## 3.3. 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
<b>Átlag</b>	<b>84,62</b>	<b>69,99</b>	<b>42,14</b>	<b>39,86</b>	<b>6,61</b>

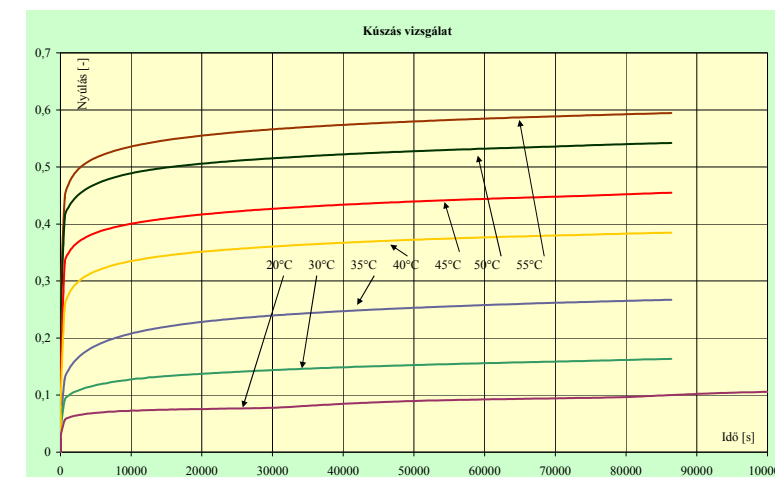
Az ábrából azt láthatjuk, hogy a fóliában a 305-ös csomópontban ébred a legnagyobb feszültség. Minden vizsgált hőmérsékleten ez volt a veszélyes hely (deformálatlan alakban bejelölve), csak a feszültség nagysága változott. Az ábrán a nyilak nagysága az adott csomópontban a feszültség nagyságával arányos,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

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

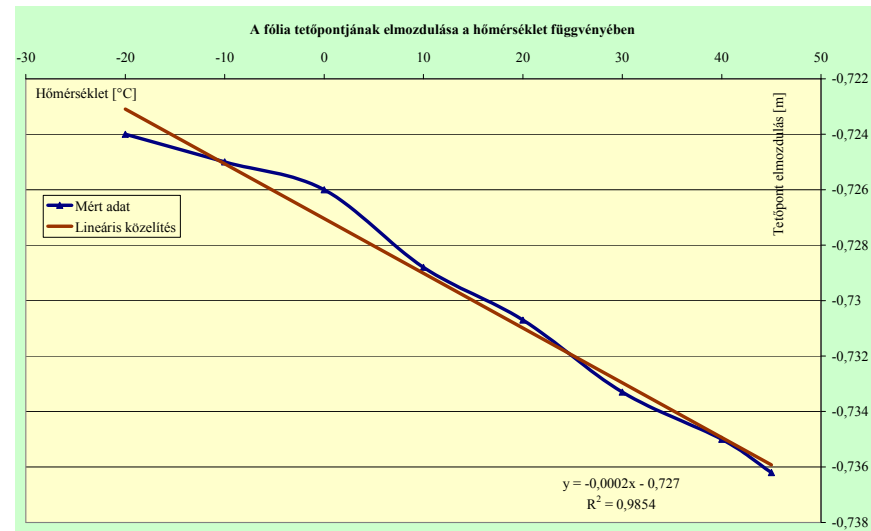
Amennyiben eltekintünk a töltelék hőmérséklet okozta feszültségállapot-változásától kijelenthető, hogy a meleg időszakban betöltött fóliák esetén a megfelelő nyomás beállításakor figyelembe kell venni azt a megállapítást, hogy a téli időszakban a fólia kisebb feszültség hatására is kiszakadhat. Mindezek 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.

## 3.4 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 3.13. 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 (3.14. ábra). Az  $\ln a_T$  értékeit a 2.4 pontban leírtak alapján határoztam meg.

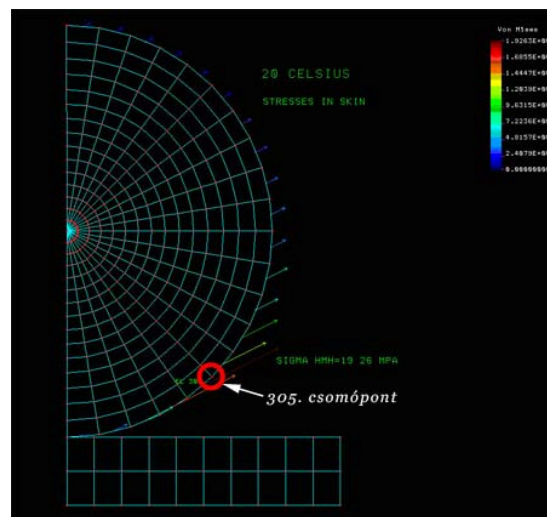


3.13. ábra. A különböző hőmérsékleten mért kúszási görbék.

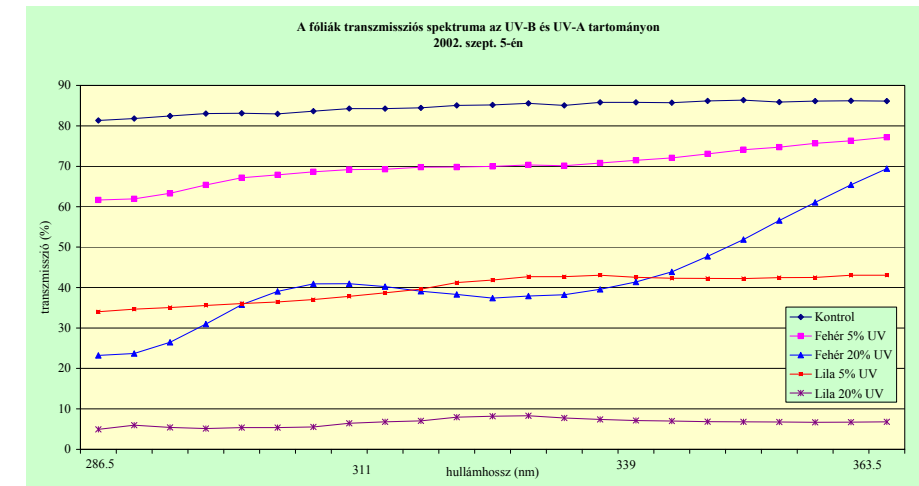


3.11. ábra. A fóliatömlő tetőpontjának elmozdulása a hőmérséklet függvényében.

A 3.7. 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 „ $\sigma$ ” 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, 3.12. ábrán azt mutatom be, hogy a fóliatömlőben hol alakul ki a legnagyobb feszültség.



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



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

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 színteleneknél nem csak a látható tartományban voltak áthatolhatatlanabbak, hanem az ultrabolya tartományban is. Míg a színtelenek 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 exponálatlan állapotban „hullámzóbb” spektrum már az első 14 nap után jelentősen „kismult”, 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*

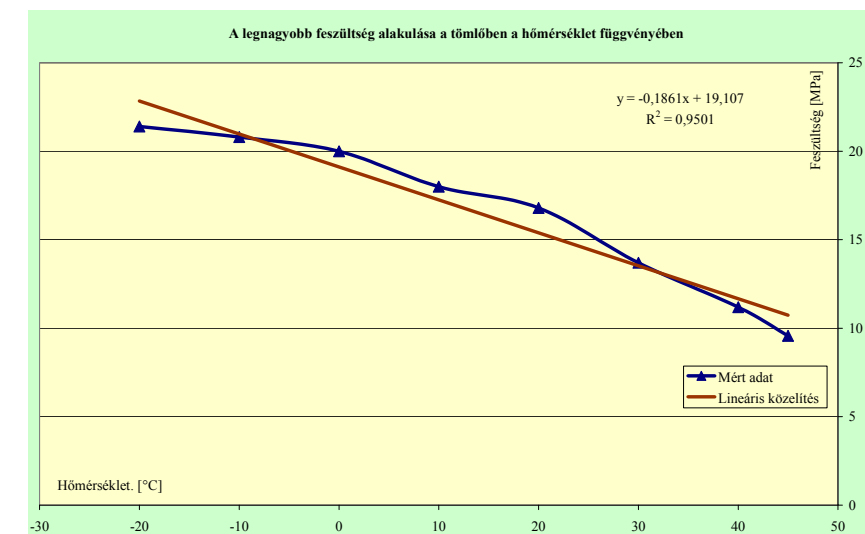
Hasonlóan a fehér (5% UV) fóliához ennek is augusztus 15-ig növekedett a transzmissziója, majd ezt követően a szeptember 5-ei mintavételkor számottevően alacsonyabb értéket mutatott, melyet valahová a június 20.-ai, és a júl. 5.-i értékek közé illeszthetünk. Azt a feltételezést, hogy az előérzékelő-réteg 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.

A fóliatömlő tetőpontjának elmozdulásait és a legnagyobb redukált feszültséget (Huber-Mises-Hencky), a 3.7. táblázatban foglaltam össze.

3.7. 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 3.10. és 3.11. ábrákon a 3.7. táblázat adataiból rajzolt diagramok láthatók.



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

A töltelék mechanikai tulajdonságait:

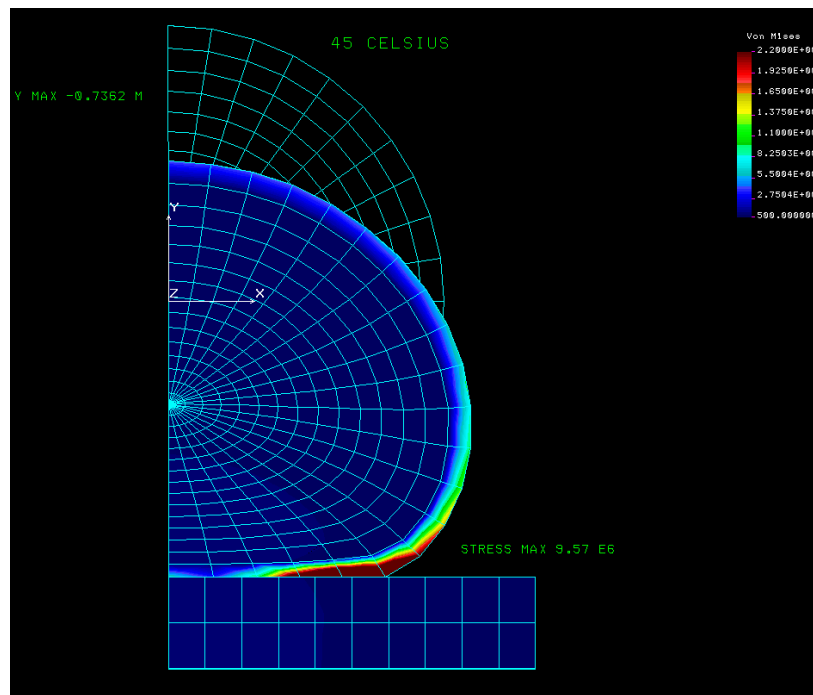
EX	1.000000e+005	(rugalmassági modulus $x$ -irányban, MPa)
NUXY	3.000000e-001	(Poisson-szám, -)
GXY	1.000000e+003	(csúszató rugalmassági modulus, MPa)
DENS	1.500000e+003	(sűrűség, kg/m <sup>3</sup> )

alapján vettem figyelembe és minden hőmérsékleten változatlanoknak tekintetem. Ezzel biztosítottam, hogy a gravitáció okozta terhelés a kiválasztott hőmérsékleteken azonos nagyságú legyen. A végeelem modell létrehozásakor feltételeztem, hogy a keresztmetszet az  $y$  tengelyre szimmetrikus, a fóliatömlőt végtelen hosszúnak tekintetem, így a probléma síkfeladatként kezelhető. A számításokhoz PLANE2D elem típust használtam. A töltelék 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 présgép a töltelék nagy nyomáson (a tömlőben kialakuló nyomást a présgép mozgásának fékezésével lehet szabályozni [Csermely et al. 2002]) préseli a fóliatömlőbe és elméletileg körhenger alakú „hurkát” állít elő.

A számítások eredményeiből az alakváltozási mezőt és feszültségeloszlást 3.9. ábrán mutatom be 45°C hőmérsékleten.



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

*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.

### 3.2 A fóliák reológiai jellemzőinek meghatározása

A szakítógépen végzett méréseim során meghatároztam a  $t_i$  időpontokhoz tartozó  $\varepsilon_i$  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 négyzetek módszerének felhasználásával kapjuk a keresett paramétereket. A 2003.06.06. és 2003.10.14-e között kihelyezett különböző összetételű fóliák reológiai vizsgálatát követően, a 3.4. táblázatban látható paramétereket határoztam meg.

## 3.4. táblázat. A különböző fóliatípusok reológiai paramétereinek változása.

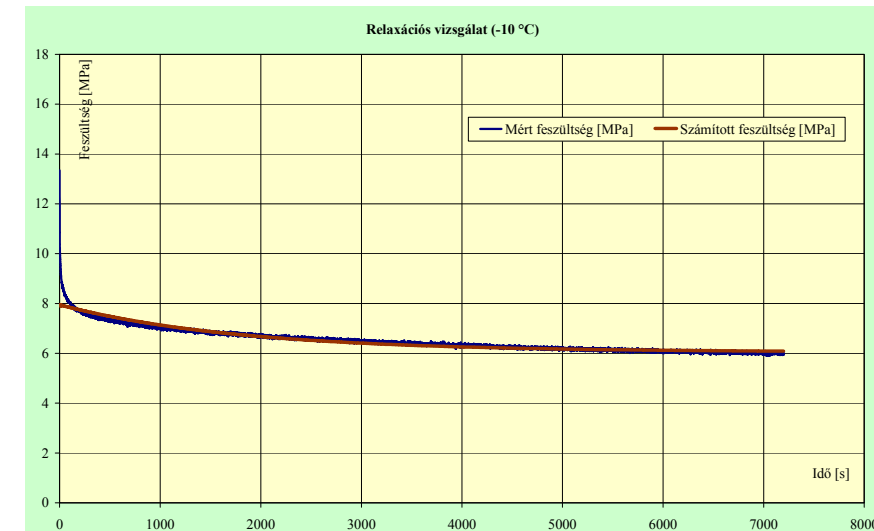
Jellemző	Mintavételezés időpontja				
	2003.06.06.	2003.07.10.	2003.08.15.	2003.09.18.	2003.10.14.
Fehér (5% UV-stabil adalékanyag)					
$E_1$ [MPa]	46,32	99,29	125,02	146,69	140,87
$E_3$ [MPa]	60,08	25,59	129,86	120,25	108,13
$T_3$ [sec]	1952	5782	3492	7620	5319
Fehér (20% UV-stabil adalékanyag)					
$E_1$ [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 következő, 3.4. - 3.6. ábrák grafikonjainak segítségével a 3.4. táblázat eredményei szerinti környezeti hatások okozta tendenciákat szemléltetem a lila 5% UV fólia esetében.

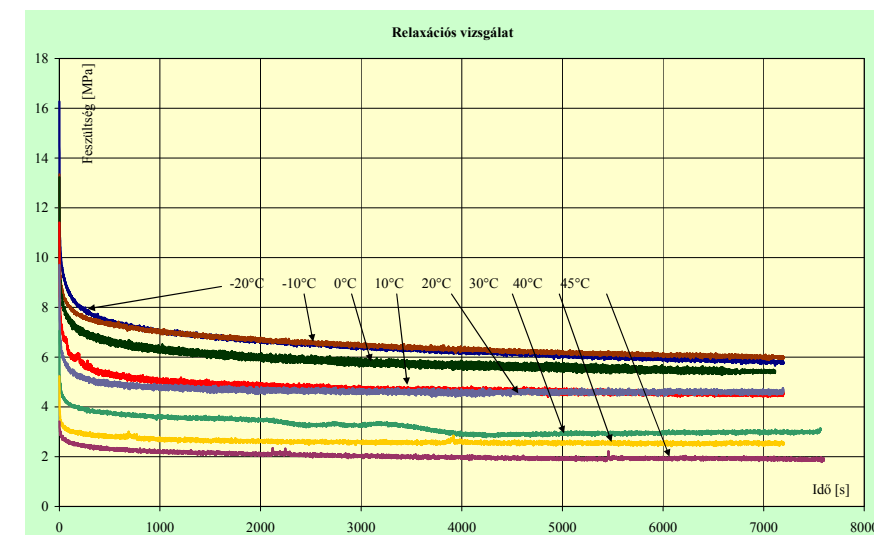
Ezek alapján már meghatározhatók a kritikus szilárdságtani értékek is. A

3.4. táblázat, a kihelyezési idő függvényében a  $\varepsilon(t) = \sigma_a \left[ \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) - \frac{1}{E_3} e^{-\frac{t}{T_3}} \right]$  kúszási

görbe egyenletben szereplő, rugókból ( $E_1$ ,  $E_3$ ), illetve csillapításból ( $T_3$ ) összeállított mechanikai modell paramétereinek változását mutatja. (3.4. - 3.6. ábrák). Az értékek változásának trendjét lineáris közelítéssel szemléltetik az egyenes vonalak, melyek egyenleteit az egyes ábrákon szintén feltüntettem.



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



3.8. ábra. A különböző hőmérsékleten mért relaxációs görbék.

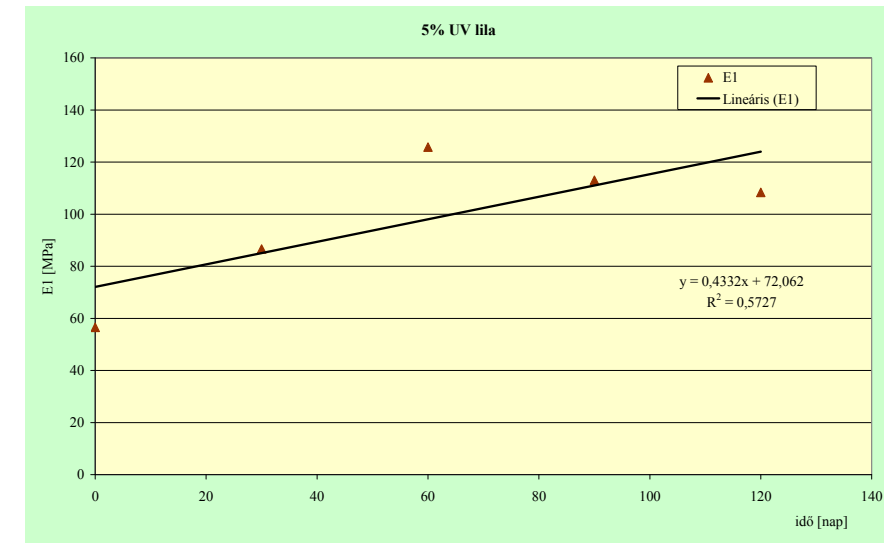
A megállapított paraméterek segítségével és különböző hőmérsékleteken a COSMOS/M végelemprogram-csomag felhasználásával számításokat végeztem a fóliatömlőben kialakuló (a tömlőben lévő anyagalmaz tulajdonságait a cukorrépa-szelet anyagjellemzőivel modelleztem) deformációk és feszültségek meghatározása 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.

Thomson modell relaxációs görbéjének  $\sigma(t) = \epsilon_a (E_1 + E_3 e^{-T_3(t)})$  egyenletét használtam. A mérési eredmények kiértékeléséhez az Excel programcsomag Solver eljárását használtam. A mérési és számítási eredményeket a 3.6. táblázatban foglaltam össze.

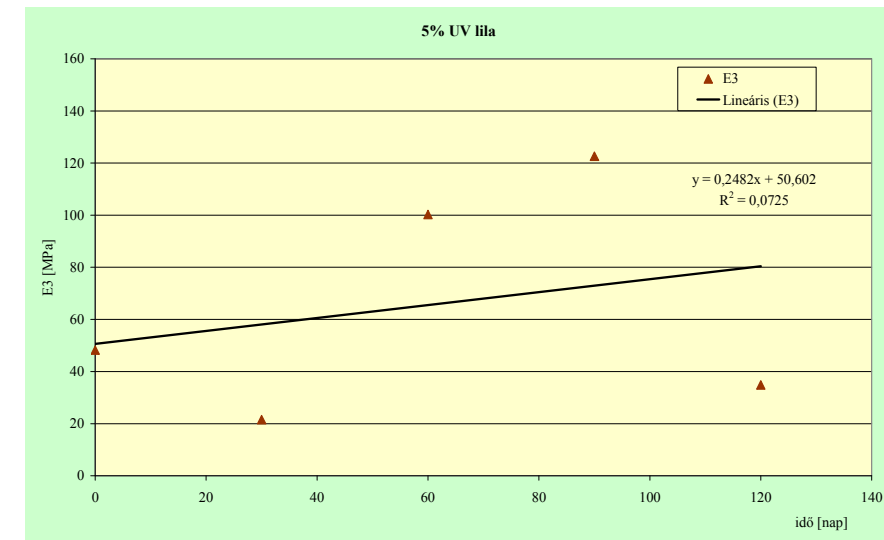
3.6. táblázat. A mérési és számítási eredmények.

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 paraméterei:</i>									
$E_x$	MPa	51,07	64,57	82,43	123,28	133,06	149,73	158,92	168,84
$\mu$	-	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
$t_R^\vartheta$	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

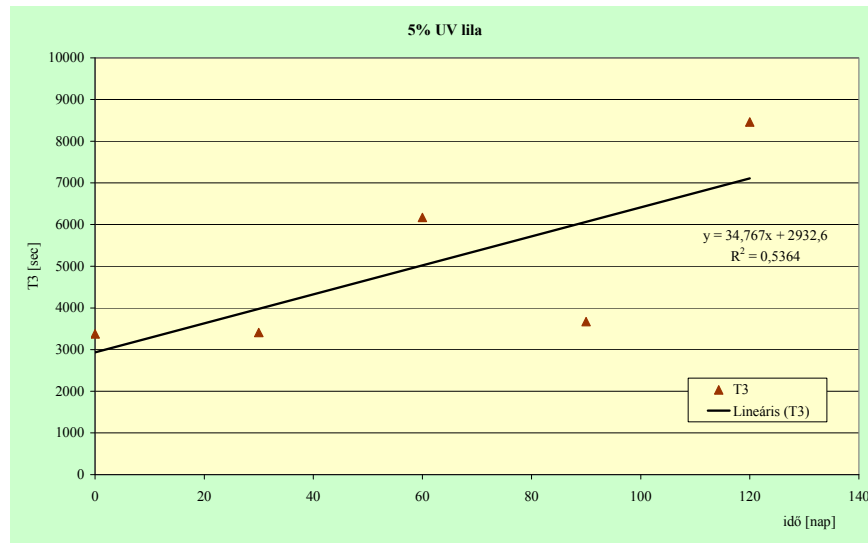
A 3.7. ábrán a -10°C hőmérsékleten mért és számított relaxációs görbék ábrázoltam. A 3.8. ábrán a különböző hőmérsékleten mért relaxációs görbék láthatóak.



3.4. ábra. Lila fólia  $E_1$  paraméterének változása az idő függvényében (5% UV-stabilizációs adalék).



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



3.6. ábra. Lila fólia  $T_3$  paraméterének változása az idő függvényében (5% UV-stabilizációs adalék).

A különböző összetételű fóliatípusok esetében a modell-paraméterek segítségével meghatároztam a „ $E$ ” rugalmassági modulus változását (3.5. táblázat). A szakirodalomban szokásos rugalmassági modulus meghatározásához az  $E = \frac{E_1 E_3}{E_1 + E_3}$

összefüggés szolgál. 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, 3.4. 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  $\sigma + \vartheta \dot{\sigma} = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}$  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.

3.5. 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  $\tau$  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.

### 3.3 A fóliafeszültségek változásának meghatározása a hőmérséklet függvényében

A fóliatömlőkben a feszültségek változásának meghatározásához, relaxációs vizsgálatokat végeztem a hőmérséklet függvényében. Ehhez a választott Poynting-