



**SZENT ISTVÁN EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR**

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**MEZŐGAZDASÁGI FÓLIÁK SZILÁRDSÁGÁNAK ÉS
TARTÓSSÁGÁNAK MEGHATÁROZÁSA**

Készítette: **Varga Attila**
MSc.I. évfolyam

Témavezető: **Dr. Csatár Attila**
egyetemi adjunktus



**Gödöllő
2011**



TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	3
1.SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
1.1. Sugárzás hatása a környezetre	4
1.2. Reológiai modellek	8
1.2.1. Elemi lineáris anyagmodellek	8
1.2.2. Többeleemes lineáris modellek:	11
1.3. A lineárisan viszkoelasztikus modellek jellemzői	16
1.4. A Poynting-Thomson modell	18
1.4.1. A Poynting-Thomson modell vizsgálata egytengelyű állapot esetén	20
2. REOLÓGIAI VIZSGÁLATOK	22
2.1. Többrétegű fóliák szerkezeti felépítése	22
2.2. Kísérleti terv, a laboratóriumi mérések ismertetése	25
2.2.1. Az Instron 5581-es anyagvizsgáló gép	25
2.2.2. Szakító és kúszás vizsgálatok	27
2.3. A reológiai mérések kiértékelése	29
Kúszás mérés kiértékelése	29
Relaxáció (ernyedés) mérés	30
3. EREDMÉNYEK, ÉRTÉKELÉS	31
3.1. A szakítószilárdság és a terhelési sebesség vizsgálata	31
3.2. A kúszás vizsgálatok eredményei	34
3.3. A fólia anyagállandóinak meghatározása a Poynting-Thomson modell alapján	37
3.4. A szakítószilárdság változása az ibolyántúli sugárzás hatására	41
4. ÖSSZEFOGLALÁS	43
5. FELHASZNÁLT IRODALOM	44



BEVEZETÉS

A munkám célja a mezőgazdasági tárolástechnikában alkalmazott többretegű csomagolófóliák szilárdsági jellemzőinek és azok változásainak meghatározása. Ezeket a fóliákat a mezőgazdaságban a szálas és tömegtakarmányok tárolására használják. Ezen fóliák alakváltozási- és feszültségállapota állandó terhelés mellett is az idő függvényében változik. Az ilyen jelenséget a reológia tárgyalja. Többek között a deformációsebességek és a feszültségek kapcsolatát írja le, különböző külső körülmények (nyomás, hőmérséklet) között. A dolgozat részletesen bemutatja a reológiai modellrendszereket, csoportokat, osztályozási módokat.

A vizsgálatok során összefüggéseket keresek a fent említett fóliák szakítószilárdsága és a terhelési sebessége között. Elemzem a szakítószilárdság alakulását a légkörből érkező káros UV sugárzás hatására. Ezzel párhuzamosan reológiai méréseket is végeztem, amely célja egyrészt a jelenséget leíró megfelelő viszkoelasztikus anyagmodell kiválasztása, másrészt a kiválasztott modellhez tartozó anyagállandók meghatározása.

A vizsgálatokhoz szükséges mintákat az Országos Meteorológiai Szolgálat budapesti telephelyén, egy globál sugárzás mérő berendezés mellé helyezték ki, ahonnan 2011. júniusa és szeptembere között két hetenként mintákat vettek.

A mechanikai vizsgálatok a VM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet Anyagvizsgáló Laboratóriumában készültek, az INSTRON 5581-es anyagvizsgáló gépen.

Célkitűzések:

- A szakítóvizsgálatok által kapott maximális feszültég értékek vizsgálata különböző terhelési sebességek függvényében.
- A reológiai vizsgálatokhoz szükséges viszkoelasztikus anyagmodell választása (mérések alapján).
- A kiválasztott anyagmodellhez tartozó anyagállandók meghatározása.
- A szakítószilárdság és kúszás görbék alakulásának vizsgálata az UV sugárzás hatására.

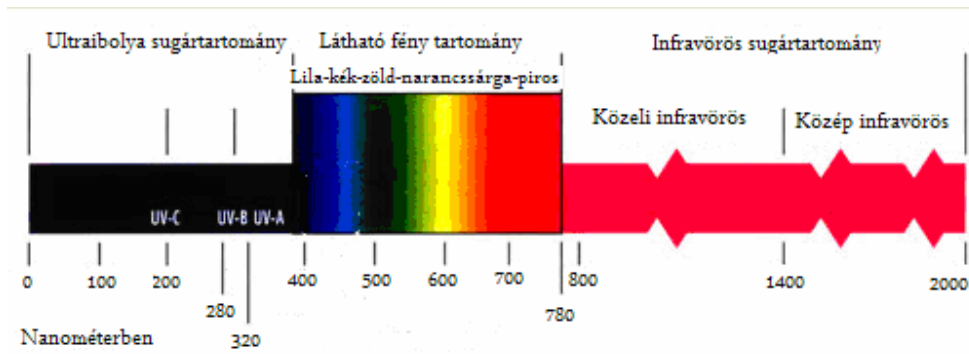


1.SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

1.1. Sugárzás hatása a környezetre

Az ultraibolya-sugárzás (ibolyántúli sugárzás, UV sugárzás) jelenségével, kérdéseivel foglalkozó kutatók közül először Johann Wilhelm Ritter, német fizikus kísérletei bizonyultak eredményesnek. Az ezüst-kloriddal átitatott papírt az ibolyántúli sugarak befeketítették. Megkülönböztetve a hősugaraktól "deoxidáló sugaraknak" nevezte el őket, kihangsúlyozva kémiai reakcióképességüket. Az UV sugárzás látható fénynél rövidebb, de a röntgensugárzásnál hosszabb hullámhosszú elektromágneses sugárzást takar. Hullámhossz-tartománya 0–400 nm.

Szokásos felosztása:



1.1. ábra. Hullámhossz tartományok

A vizsgált műanyagokra, fóliákra, akárcsak az emberre, a legnagyobb veszélyt az optikai sugárzás ultraibolya látható és közeli színek tartománya jelenti.

A Tudományos Diákköri Dolgozatomban ezen sugárzásnak a fóliák mechanikai jellemzőire gyakorolt hatását vizsgálom.

Optikai sugárzás alatt az elektromágneses színek 1 nm-től 1 mm-ig terjedő hullámhossz tartományát értjük. Ezen a tartományon belüli sugárzás egy részét nem kell figyelembe venni, mert nincs közvetlen élettani és mechanikai hatása.



A távoli (FUV vagy VUV) és az extrém UV (EUV vagy XUV) sugárzás:

A 200 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú sugárzást a levegő nagy intenzitással elnyeli.

Közeli UV sugárzás tartományok:

Az UV-A sugárzás (blacklight):

A látható sugárzáshoz legközelebb a 320-400 nm-es tartomány esik. 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.

Bár a hagyományos felosztás nem tükrözi a különböző élettani hatások ma ismert határait, általános elterjedtsége miatt nemzetközileg ma is e felosztást használjuk. Az UV-A sugárzás tovább bontható két résztartományra (UV-A1 és UV-A2), ha finomabb felosztásra van szükségünk. Ennek a határvonalaként a 320 nm-s hullámhosszt állapították meg. [3],[4]

Az UV-B sugárzás:

A legfontosabb az UV-B sugárzás, mivel ez okozza az élő és élettelen szervezetek káros átalakulását. A Föld 18-25 km magasságban lévő ózonrétege, ami a 280-320 nm-es UV-B hullámokat normális körülmények között elnyeli. Ismeretes azonban, hogy a légkör ózon tartalmának egy százalékos csökkenése az UV-B sugárzás két százalékos növekedéséhez vezethet. Az ózonpajzs évmilliók alatt alakult ki a magas-légköri gázokból az ultraibolya sugárzás hatására. 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.



Az UV-C sugárzás (germicid)

A Napból 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 tapasztalható, hogy az ibolyántúli sugárzás hatására az anyag kémiai és villamos tulajdonságai megváltoznak (aktintikus hatás). Ezért a hullámhossz-határok rögzítésén kívül a második legfontosabb fogalom az aktinikus hatásspektrum. Ennek a színeképnek a segítségével meghatározható, 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.

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 időt kell számításba venni, az elnyelt foton energiája közömbös. Lényeges viszont a szervezet hőelvezető-képessége, ezért az élő szervezeteknél a besugárzott terület nagysága és az adott sejtek spektrális abszorpciók tulajdonsága alapvetően meghatározó. Fontos fogalom még a fotokémiai reakció, melyről akkor beszélünk, ha az optikai sugárzás fotonjainak elég nagy az energiája ahhoz, hogy egyes molekulákban kémiai változást hozzon létre. A kémiai rendszerekben a sugárzás hatását az elnyelt dózis nagysága, azaz a besugárzás ideje alatt elnyelt összenergia mennyisége szabja meg. 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 színeképi 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 színeképét.

A Nap ultraibolya sugárzásának káros hatásairól az ICNIRP 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. [5],[9]

A fólia mechanikai tulajdonságainak változását a Napból érkező káros ibolyántúli sugárzás függvényében vizsgáltuk, ezért a fóliákat közvetlenül egy UV sugárzásmérő berendezés mellé helyeztük ki az OMSZ budapesti telephelyén.

A következő ábrán láthatóak az UV sugárzás hatásainak kitett fóliák, valamint az OMSZ sugárzásmérő berendezése.



1.2. ábra. A vizsgált fóliák



1.3. ábra. A sugárzás mérőberendezés



1.2. Reológiai modellek

A reológia a deformációk és a deformáció-sebességek, valamint az őket előidéző erők, vagy terhelések, különböző külső körülmények (nyomás, hőmérséklet) közötti törvényszerűségekkel foglalkozik. Reológia alatt általában az erő hatásának kitett anyagok deformációjával és folyásával foglalkozó tudományágat értjük. Szilárd testeknél a feszültség hatására bekövetkező időbeli nyúlást vizsgálja.

A reológiához kapcsolódó fogalmak:

Kúszásnak nevezzük azt a jelenséget, amikor a terhelés és ezzel együtt az anyagban keletkező feszültség állandó értéken tartása mellett, a terhelés ráadásakor létrejött alakváltozás az időben tovább növekszik.

Ernyedésnek (relaxációnak) nevezzük azt a jelenséget, amikor a terhelést egy kényszerített elmozdulással hozzuk létre, és az így létrejött alakváltozási állapot állandó értéken tartása mellett a feszültségek csökkennek.

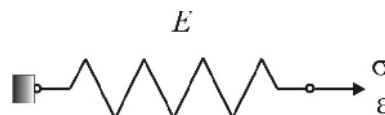
A vizsgálatok célja a folyamatok időfüggésének a vizsgálata.

Feltételezték, hogy az anyag viselkedése homogén, lineáris és izotrop. [7]

1.2.1. Elemi lineáris anyagmodellek

Egyelemes modellek:

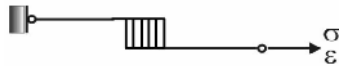
- **Rugalmas anyag modell:** Az alakváltozás során energiaveszteség nem lép fel, az anyag a terhelés megszűnése után tökéletesen visszanyeri az alakját. Egytengelyű feszültségállapotnál a lineáris kapcsolatot az egyszerű Hooke-törvény azaz, $\sigma = E\varepsilon$ írja le, homogén és izotrop anyag esetében. Ezt az anyagmodellt Hooke-testnek is szokták nevezni (1.4. ábra.)



1.4. ábra. A Hooke-test modellje



- **Ideálisan képlékeny anyagmodell:** Az alakváltozás nagysága változatlan marad a feszültség megszűnésekor. Az alakváltozás nagysága nem függ az időtől. Az ideálisan képlékeny anyagmodellt De Saint-Venant-testnek nevezzük (1.5. ábra.)

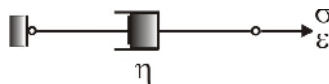


1.5. ábra De Saint-Venant-test modellje

- **Viszkózus anyagmodell:** Ennél az anyagmodellnél a feszültség és az alakváltozás közötti kapcsolat az időtől is függ. A viszkózus anyagmodelleknél a feszültséget vizsgáljuk az alakváltozás sebességének a függvényében. Ha ez előbb említett kapcsolat lineáris akkor az a anyagmodellt lineárisan viszkózusnak, ha nem akkor nem lineárisan viszkózusnak nevezzük. Egytengelyű feszültség állapotnál a kapcsolatot a $\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}$ összefüggés írja le. A lineárisan viszkózus anyagmodellt Newton testnek nevezzük (1.6. ábra).

η - viszkozitási tényező

$\dot{\epsilon}$ - egységnyi alakváltozási sebességhez tartozó feszültség



1.6. ábra. A Newton-test mechanikai modellje.

- **Összetett anyagmodellek:** A valóságos anyagok viselkedését az ideálisan rugalmas, képlékeny és viszkózus elemekből álló modellrendszerrel közelítjük. A külső körülmények (feszültség, alakváltozás, alakváltozási sebesség, hőmérséklet stb...) határozzák meg, hogy az előbb említett tulajdonságok közül, melyik érvényesül jobban.

Az általános anyagmodellt elasztovizkoplasztikus modellnek nevezzük, melyben mindhárom tulajdonság megtalálható.

A Hooke és Newton testekből felállított (sorosan, párhuzamosan, vegyesen) modelleket viszkoelasztikus modelleknek nevezzük.

Az ezeknél a modelleknél összetettebb modelleket az elemi lineáris anyagmodellek soros vagy párhuzamos kapcsolásával kapjuk. Az elemi modellekből akármennyit felhasználhatunk, azaz



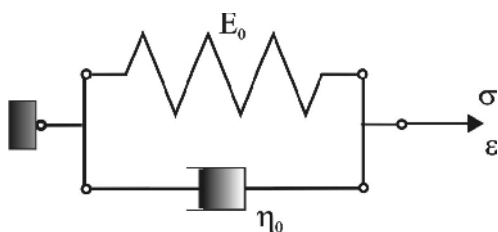
végtelen sok modellt elő tudunk állítani. A kúszás jelenség modellezésekor a mérés alapján meghatározott kúszási görbére illesztjük a végtelen sok modell közül egy alkalmasan megválasztott modell görbéjét. A problémát az jelenti, hogy a lehető legegyszerűbb modellt kell kiválasztani, amely az adott célnak megfelelő pontossággal leírja a modellt. [7]



1.2.2. Többelemes lineáris modellek:

Kételemes modellek:

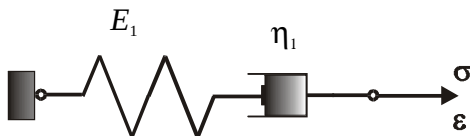
Kelvin-test modellje:



1.7. 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 modellje:



1.8. 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:

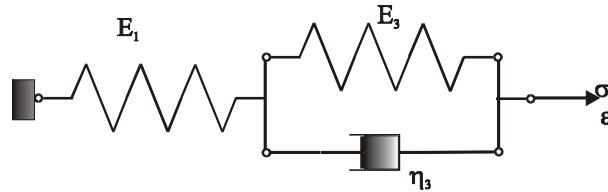
$$\sigma = \eta_1 \cdot \dot{\varepsilon} - \frac{\eta_1}{E_1} \dot{\sigma}, \text{ illetve } \sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_1 \dot{\varepsilon}$$



Háromelemes modellek:

A Poynting-Thomson test modelljei:

„Kúszási” modell:



1.9. 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

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

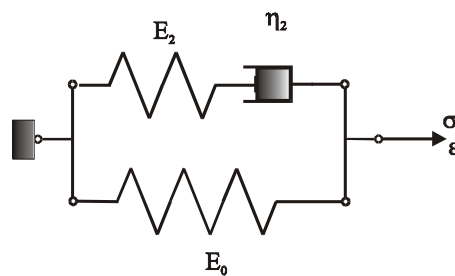
és

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

A differenciálegyenlet állandói és a modellállandók között a kapcsolat:

$$b_1 = \mathcal{G} = \frac{\eta_3}{E_1 + E_3} \quad a_0 = E = \frac{E_1 \cdot E_3}{E_1 + E_3} \quad a_1 = \eta = \frac{E_1 \cdot \eta_3}{E_1 + E_3} \quad (1.0)$$

„Relaxációs” modell (1.10. ábra.)



1.10. 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

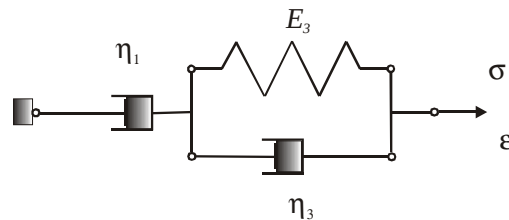
$$\sigma_0 = E_0 \cdot \varepsilon_0 \quad \sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_{2E} \quad \sigma_2 = \eta_2 \cdot \dot{\varepsilon}_{2\eta}$$

A differenciálegyenlet állandói és a modellállandók között a kapcsolat:

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

Jeffrey-test modellek

„Kúszási” modell (1.11. ábra.):



1.11. 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:

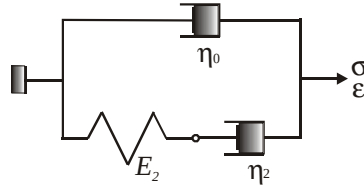
$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_1 \dot{\varepsilon} + a_2 \ddot{\varepsilon}$$

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 (1.12. ábra.):



1.12. ábra. A Jeffrey-test relaxációs modellje.

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

illetve:

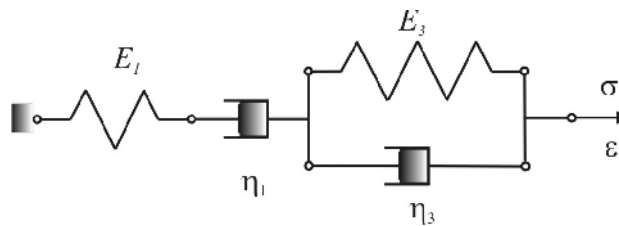
$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_1 \dot{\epsilon} + a_2 \ddot{\epsilon}$$

A differenciálegyenlet állandói és a modellállandók között a kapcsolat:

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

Burger-test

„Kúszási” modell (1.13. ábra.):



1.13. ábra. A Burger-test kúszási modellje.

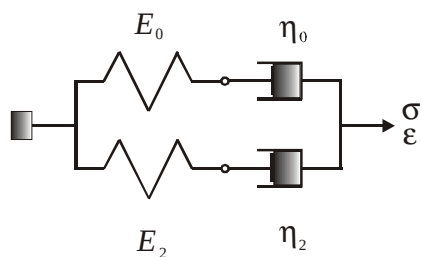
$$\sigma + \left(\frac{\eta_1 + \eta_3}{E_3} + \frac{\eta_1}{E_1} \right) \dot{\sigma} + \frac{\eta_1 \eta_3}{E_1 E_3} \ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + \frac{\eta_1 \eta_3}{E_3} \ddot{\epsilon}$$

illetve:

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



„Relaxációs” modell (1.14. ábra.)



1.14. 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:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} + b_2 \ddot{\sigma} = a_1 \dot{\varepsilon} + a_2 \ddot{\varepsilon} \quad [1], [2]$$



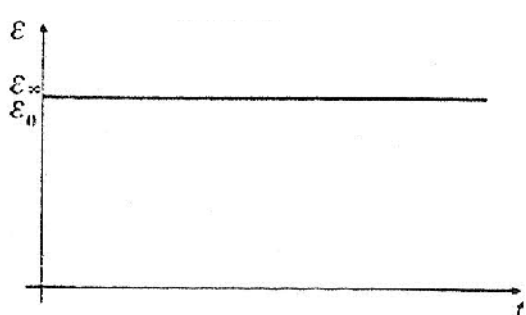
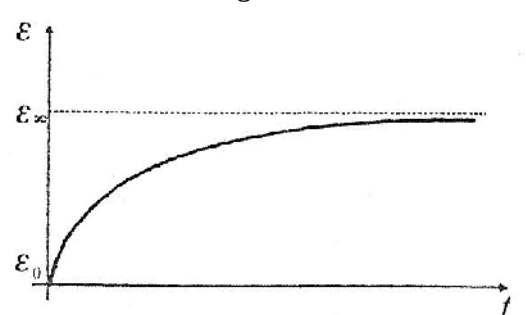
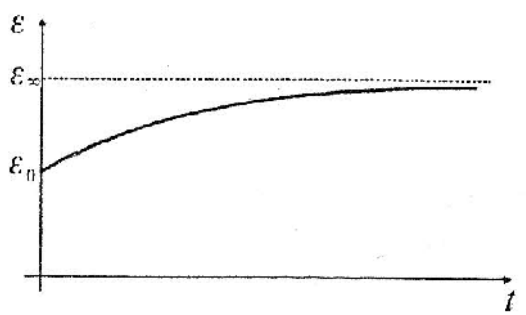
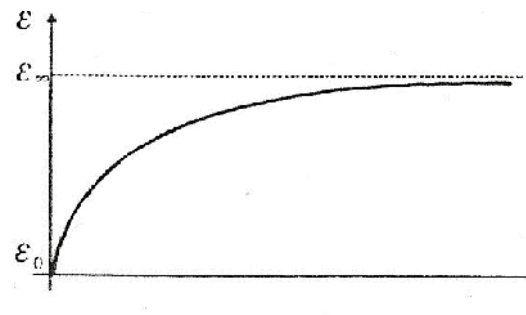
1.3. A lineárisan viszkoelasztikus modellek jellemzői

Az elemi modellekből felállított modellek minden esetben lineáris rendszert képeznek, vagyis lineáris differenciálegyenlettel jellemezhetők. Ezeknek a tetszőleges számú elemi lineáris modellt tartalmazó viszkoelasztikus reológiai modell általánosított anyagegyenlete:

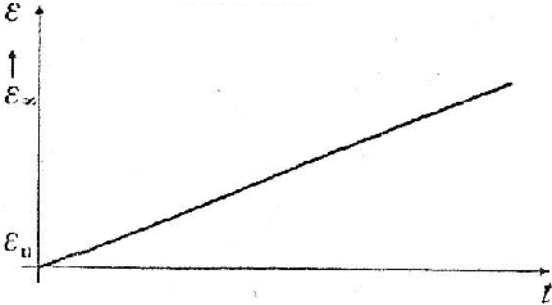
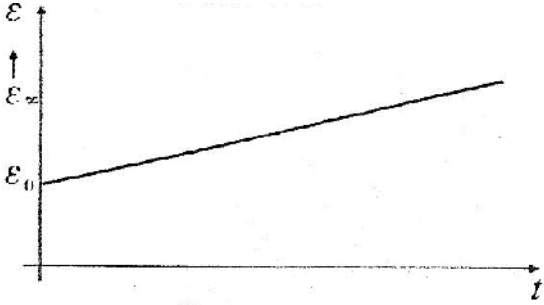
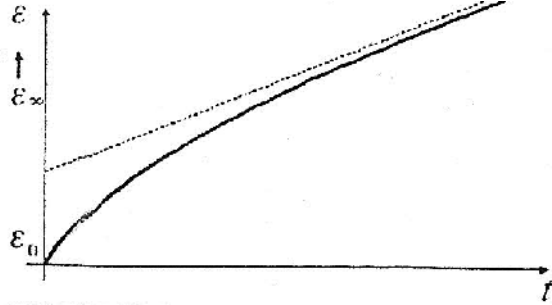
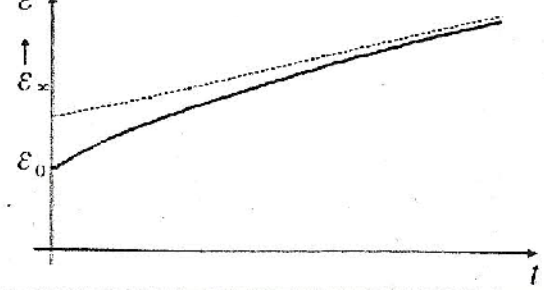
$$\sigma + \sum_{k=1}^n b_k \frac{d^k \sigma}{dt^k} = a_0 \varepsilon + \sum_{k=1}^m a_k \frac{d^k \varepsilon}{dt^k}, \quad (1.1)$$

A lineáris viszkoelasztikus modelleket 4 csoportba sorolhatjuk. Ez a Müller-féle osztályozás (1.táblázat). A modellek osztályba sorolási rendszerét valamint a feszültségugrás hatására a modellek válaszfüggvényeit a 1. táblázat mutatja.

1. Táblázat

Kúszási jelenség	
I. osztály	II. osztály
Hooke 	Voigt-Kelvin 
Poynting-Thomson 	Bővített Voigt-Kelvin 



Kúszás jelenség	
III. osztály	IV. osztály
Newton 	Maxwell 
Jeffrey 	Burger 

A mérési eredmények alapján választjuk ki a legmegfelelőbb osztályt és ezen belül meghatározzuk a valós jelenséget kívánt pontossággal leíró modellt. [7]

Méréseim tapasztalatai alapján a jelenség az I. osztályba tartozik. Ebben az osztályban pedig a legegyszerűbb viszkoelasztikus anyagmodell a Poynting-Thomson modell. A vizsgálatok további részének a feladata, hogy eldöntsük, hogy ez a modell megfelelő pontosságú-e.



1.4. A Poynting-Thomson modell

A műanyagok terhelés hatására az idő függvényében kúszási és relaxációs tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezen tulajdonságok leírására a viszkoelasztikus anyagmodellek alkalmasak. Az anyagmodellek a mechanikai feszültség és a fajlagos nyúlás közötti kapcsolatot írják le.

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

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

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

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

$\dot{\mathbf{D}}, \ddot{\mathbf{D}}, \dots$ a $\mathbf{D}$ idő szerinti deriváltjai. $[1/\text{s}, 1/\text{s}^2, \dots]$

Az előzőekben vázolt végtelen sok lineáris anyagmodell közül azt kell kiválasztani, amely a lehető legegyszerűbben és kívánt pontossággal leírja a jelenséget. Ezen anyagmodellek közül a legegyszerűbb Poynting-Thomson modell.

Differenciálegyenlete, felhasználva az

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

felbontásokat:

$$\mathbf{T} = 2G\mathbf{E} + 2\mu\dot{\mathbf{E}} - \tau\ddot{\mathbf{T}}, \quad (1.2)$$

ahol: $\mathbf{T}(t)$ feszültségdeviátor tenzor, $[\text{N/m}^2]$

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

$\dot{\mathbf{T}}$ és $\dot{\mathbf{E}}$ a fentiek idő szerinti első deriváltjai, $[\text{N/m}^2\text{s}]$ ill. $[1/\text{s}]$

G csúsztató rugalmassági modulus, $[\text{N/m}^2]$

μ viszkozitási együttható, $[\text{Ns/m}^2]$

τ relaxációs idő, $[\text{s}]$



továbbá:

$$\mathbf{T}_0 = 3K\mathbf{E}_0 \text{ és } \dot{\mathbf{T}}_0 = 3K\dot{\mathbf{E}}_0. \quad (1.3)$$

Itt: $\mathbf{T}_0$ feszültségi gömbtenzor, $[\text{N}/\text{m}^2]$
 $\mathbf{E}_0$ deformációs gömbtenzor, $[\text{m}/\text{m}]$
 $\dot{\mathbf{T}}_0$ és $\dot{\mathbf{E}}_0$ a fentiek időszerinti deriváltjai, $[\text{N}/\text{m}^2\text{s}]$ ill. $[1/\text{s}]$
 K kompresszibilitási modulus, $[\text{N}/\text{m}^2]$

Az (1.2) és (1.3) tartalmazza a lineárisan rugalmas *Hooke* test anyagegyenletét:

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

és a lineárisan viszkózus *Newton* test anyagegyenletét:

$$\mathbf{T} = 2\mu\dot{\mathbf{E}}. \quad [1], [2]$$



1.4.1. A Poynting-Thomson modell vizsgálata egytengelyű állapot esetén

Egytengelyű állapotban a feszültség és deformációs tenzorok egyszerűsödnek:

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

A deviátoros összetevők:

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

A gömbi összetevők:

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

És

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} \sigma, \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{3} (\varepsilon + 2\varepsilon_\nu), \quad (1.4)$$

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



ahol: σ normálfeszültség, $[\text{N/m}^2]$
 ε hosszirányú fajlagos nyúlás, $[\text{m/m}]$
 ε_ν keresztirányú fajlagos nyúlás, $\varepsilon_\nu = \nu \varepsilon$, $[\text{m/m}]$
 ν Poisson tényező. $[-]$

Egytengelyű állapotban az (1.2) és (1.3) egyenletek az alábbi alakot veszik fel:

$$\sigma - \sigma_0 = 2G(\varepsilon - \varepsilon_0) + 2\mu(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_0) - \tau(\dot{\sigma} - \dot{\sigma}_0), \quad (1.5)$$

$$\sigma_0 = 3K\varepsilon_0, \quad \dot{\sigma}_0 = 3K\dot{\varepsilon}_0.$$

A (1.5) egyenletek egyesítése és (1.4) 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:

$$E = \frac{9GK}{3K+G} [N/m^2], \quad \eta = \frac{9\mu K}{3K+G} [Ns/m^2], \quad \vartheta = \frac{3K\tau + \mu}{3K+G} [s], \quad (1.6)$$

az anyagegyenlet egytengelyű állapotban

$$\sigma + \vartheta \dot{\sigma} = E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}. \quad (1.7)$$

Az (1.7) 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 [1],[2]:

$$\sigma + b_1 \dot{\sigma} = a_0 \varepsilon + a_1 \dot{\varepsilon}. \quad (1.8)$$



2. REOLÓGIAI VIZSGÁLATOK

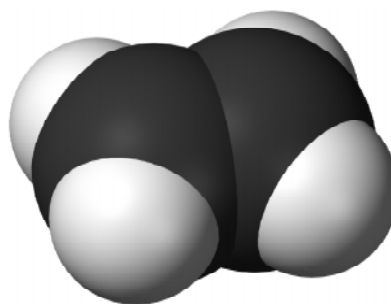
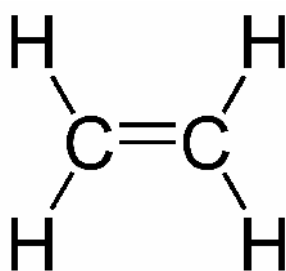
2.1. Többrétegű fóliák szerkezeti felépítése

A vizsgált fóliák három rétegűek. A különféle rétegek más-más feladatot látnak el:

- A belső réteg: általában fekete, ami a fényzárást biztosítja,
- A középső réteg: a megkívánt mechanikai tulajdonságokat hivatott garantálni,
- A külső réteg elsősorban az UV védelmet és a fényvisszaverődést biztosítja.

A legmagasabb színvonalat a polietilén anyagú fóliák adják, amelyeknél alapanyagként metallocént alkalmaznak.

A polietilén (PE) molekula etilén egységek hosszú láncolata. Az etilénben 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. [6]



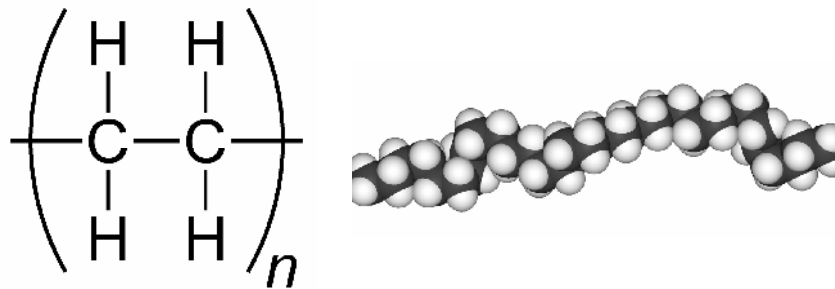
2.1. ábra. Az etén szerkezete és térkitöltő modellje.

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.

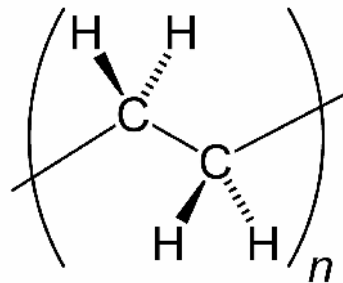


A PE molekula ismétlődő egysége szerkezetileg az etilén, ezt mutatja egyszerűsített összegképlete: $(C_2H_4)_n$

ahol: n a polimerizáció foka.



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



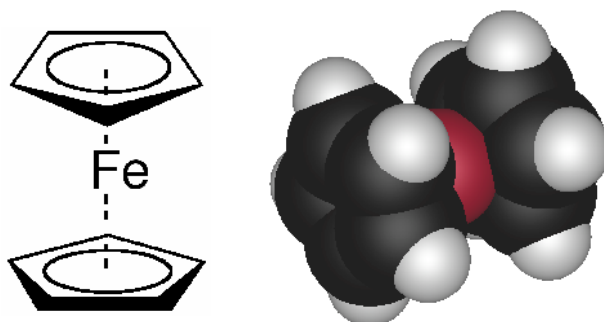
2.3. ábra. A PE lánc ismétlődő egységének térbeli elrendeződése (a C–C kötés a lap síkjába esik, a vastagítottak elé, a szaggatottak pedig mögé)

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 HDPE (high density polyethylene) sűrűsége legalább $0,941 \text{ g/cm}^3$. Kiszámú 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 szendvicsszerűen kötődik, valamely átmeneti fémhez (pl. $M = Fe, Co, Ni, Ru, Os, Mn, Zn, Zr$). A két gyűrű ellentétes oldalról közrefogja a központi fématomot, így kialakítva a jellegzetes térbeli szerkezetet. A metallocént fém-halogenidek és a ciklopentadién nátriumsójának reakciójából állíthatók elő. Színes, szilárd anyagok. Katalizátorként (olefin polimerizáció), stabilizálószerként, gyökfogóként használatosak. A metallocének valójában egy nagyobb csoport, a fémorganikus szendvics vegyületek egy alosztályát jelentik. Legismertebb és legkorábban felfedezett képviselőjük a ferrocén, melynek központi fémionja a vas. [1]



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



2.2. Kísérleti terv, a laboratóriumi mérések ismertetése

2.2.1. Az Instron 5581-es anyagvizsgáló gép

Első lépésként a fóliák alapvető szilárdsági jellemzőit határoztam meg, melyhez az MSz EN ISO 527-1, 527-3 [8] szabványok előírásait vettem figyelembe. A szilárdsági és kúszás vizsgálatokat a Mezőgazdasági és Gépesítési Intézet anyagvizsgáló laboratóriumában, az INSTRON 5581-es univerzális anyagvizsgáló géppel végeztem (2.5. ábra).



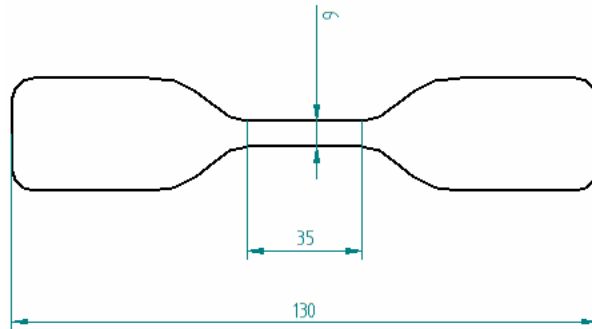
2.5. ábra. INSTRON 5581-es anyagvizsgáló gép

A gép terhelhetősége egy tengelyű húzásra és nyomásra 50 kN a hozzá tartozó maximális keresztfej-elmozdulás 2 méter. A keresztfej sebességét 0,001mm/min-től 1000mm/min-es tartományban lehet változtatni. A sebesség pontossága 1%, a helyzet-pontossága, +/- 0,02 mm. A berendezéshez három erőmérő cella tartozik, melyek terhelhetősége 0,025-0,5 N, 0,5-500N és 500-50.000N. Pontosságuk 0,5 % a mért értékre vonatkoztatva. Ezek közül a szakító és kúszásvizsgálatokhoz az 500 N-os cellát használtam. A berendezést számítógép vezérli, a mérési adatok gyűjtése és tárolása automatikusan történik. Az elektronikai mintavételi frekvencia 50Hz, az A/D átalakító 32 bites. A vezérlő program lehetővé teszi, hogy a gép a



különböző paramétereit figyelve akkor álljon le, hogy ha valamelyik paraméter elérte az előre beállított értéket. Ilyen paraméterek a megnyúlás, az erő, az erősesítés, az idő stb.. [10]

A próbatest méretei:

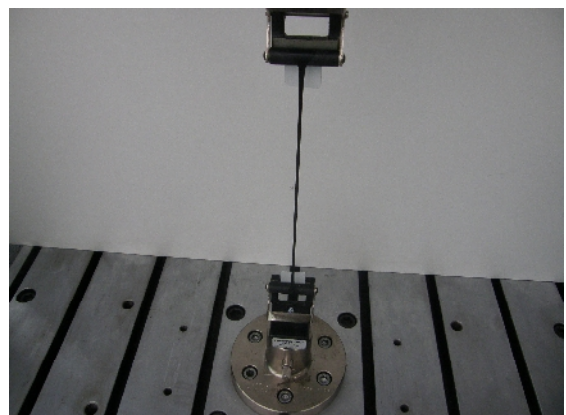
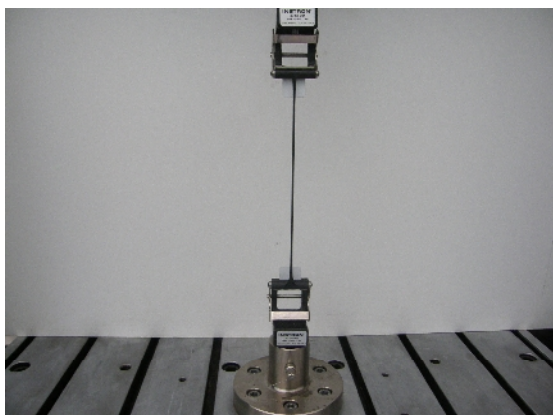
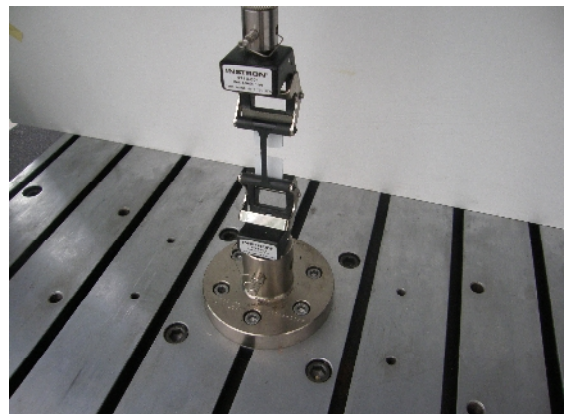
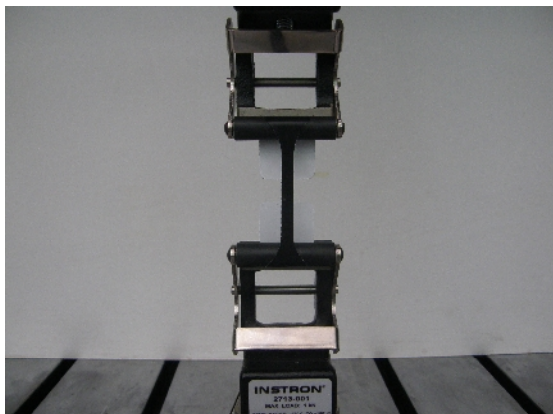


2.6. ábra méretek

A vastagság 3 különböző helyen mérve 20 ismétléssel: 0,222 mm

A fólia keresztmetszete: $0,222 \times 6 = 1,332 \text{ mm}^2$

A következő ábrákon a próbatestek befogása, valamint szakítása látható

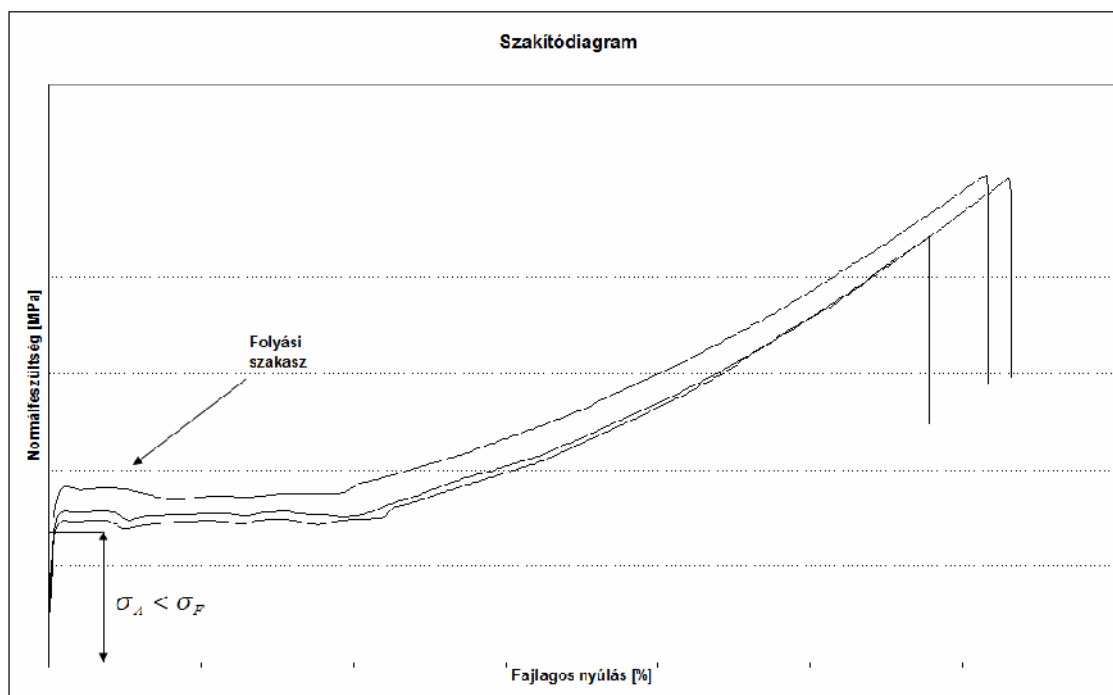


2.7. ábra. A fólia szakítóvizsgálata



2.2.2. Szakító és kúszás vizsgálatok

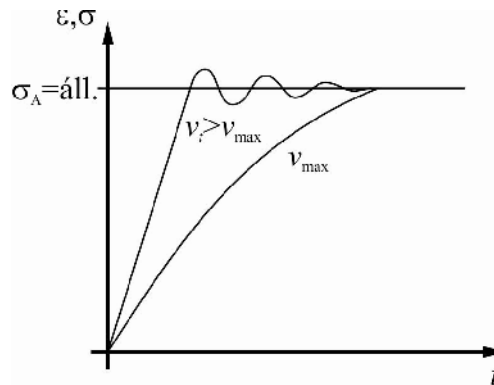
A fóliák terhelés hatására az idő függvényében deformációt és feszültség változást szenvednek. A kúszásvizsgálat lényege, hogy a fólia próbatest gyors felterhelését követően az állandó értéken tartott terhelés mellett mérni kell az időben elhúzódó deformációt. Azonban, hogy ezt a deformációt meg tudjuk határozni, ismerni kell a felterhelés nagyságát és sebességét. A felterhelés nagyságának meghatározására a szakítóvizsgálatok alkalmasak. Meg kell vizsgálni a próbatestekben keletkező maximális normálfeszültségek alakulását különböző sebességszinteken, valamint a folyáshatárhoz tartozó feszültségeket is. A kúszás vizsgálatok során a fóliát a folyáshatár alá terheltem. A mérések alapján ki kell választani egy a folyáshatárénál kisebb normálfeszültséget, ami majd a kúszás vizsgálatok beállításához kell.



2.8. A folyáshatárhoz tartozó feszültségek meghatározása



A kúszás vizsgálatoknál a terhelést a lehető leggyorsabban kell felvinni. Azonban ha a sebesség meghalad egy bizonyos értéket a gép tehetetlensége miatt a meghatározott feszültség túllendülhet, ami maradó alakváltozást okozhat (2.9. ábra.).



2.9. ábra. Túllendülés

A mechanikai és reológiai mérések korrekt összehasonlíthatósága érdekében minden mérésnél a választott terhelési sebességet kell beállítani. A fóliák mechanikai viselkedésének leírásához a Poynting-Thomson modellt választottam. A kúszás mérések alapján számítással igazolni kell a P-T modell helyességét. A kezdeti vizsgálatokat az UV sugárzásnak még nem közvetlen kitett (exponálatlan) fóliákkal kell végezni.

A következő lépésben az UV sugárzás hatásainak kitett fóliákkal kell hasonlóképpen eljárni, azaz meghatározni „t” mintavételi idők elteltével a szakítóvizsgálatokhoz tartozó maximális feszültségek alakulását. Ezen összehasonlítás alapján meg lehet határozni, hogy hogyan befolyásolják az ibolyántúli sugarak a fólia mechanikai jellemzőit.



2.3. A reológiai mérések kiértékelése

Az egytengelyű reológiai mérések célja a mechanikai viselkedést leíró E_i, η_i paraméterek becslése, amelyekből a differenciálegyenlet állandói (anyagjellemzők) meghatározhatók.

Kúszás mérés kiértékelése

A kúszás vizsgálatok során kapott adatokat tároló és feldolgozó elektronika táblázatba foglalja. (nyúlás-idő értékpárok). A keresett paraméterek közelítő értékei a legkisebb négyzetek elvének felhasználásával nyerhetők.

A kúszásgörbe egyenlete:

$$\varepsilon(t) = \sigma_a \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) - \frac{1}{E_3} e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t} \right] \quad (2.1)$$

A háromelemes Poynting-Thomson modell alkalmazásakor a (2.1) felhasználásával

$$\Delta(E_1, E_3, \eta_3) = \sum_{i=1}^n \left\{ \varepsilon_i - \sigma_a \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t_i} \right) \right] \right\}^2 \quad (2.2)$$

eltérés-négyzetösszeg minimumát adó E_1, E_3 és η_3 értékeket kell megkeresni.

Az egyenletben ε_i a t_i időponthoz tartozó **mért** fajlagosnyúlást, a szögletes zárójelben lévő mennyiség pedig a t_i időpontban **számított** fajlagosnyúlást jelenti.

A (2.2) minimumának keresésére alkalmas az EXCEL Solver eljárása, vagy képezni kell a

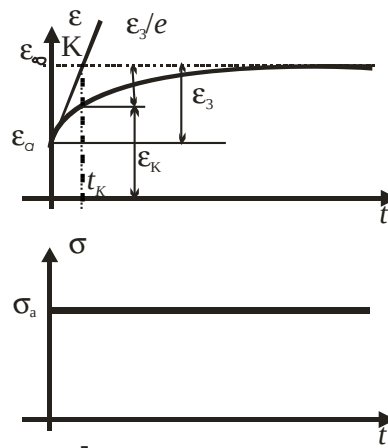
$$\frac{\partial \Delta}{\partial E_1} = 0, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial E_3} = 0, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial \eta_3} = 0$$

egyenletrendszert.



A minimalizálás első lépésekor a keresett paraméterek becsült értékével célszerű számolni. Erre a célra alkalmasak a szakítógép által felrajzolt $\varepsilon = \varepsilon(t)$ görbéről leolvasható értékek (2.8. ábra):

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



2.8. ábra. A mért görbéről leolvasható értékek

A modell állandókból a Poynting-Thomson modell differenciálegyenletében feltüntetett állandói számolhatók.

Relaxáció (ernyedés) mérés

A kúszásméréshez hasonlóan kell eljárni. A relaxációs görbe egyenlete:

$$\sigma(t) = \varepsilon_a (E_0 + E_2 e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}) \quad (2.3)$$

és a keresett paraméterek a (2.3) felhasználásával a

$$\Delta(E_0, E_2, \eta_2) = \sum_{i=1}^n \{ \sigma_i - [E_0 \varepsilon_a + E_2 \varepsilon_a] \cdot e^{-\frac{E_2 t_i}{\eta_2}} \}^2 \quad (2.4)$$

egyenlet minimalizálásával nyerhetők. A Poynting-Thomson modell differenciálegyenletében látható állandói számíthatók. [1],[2]

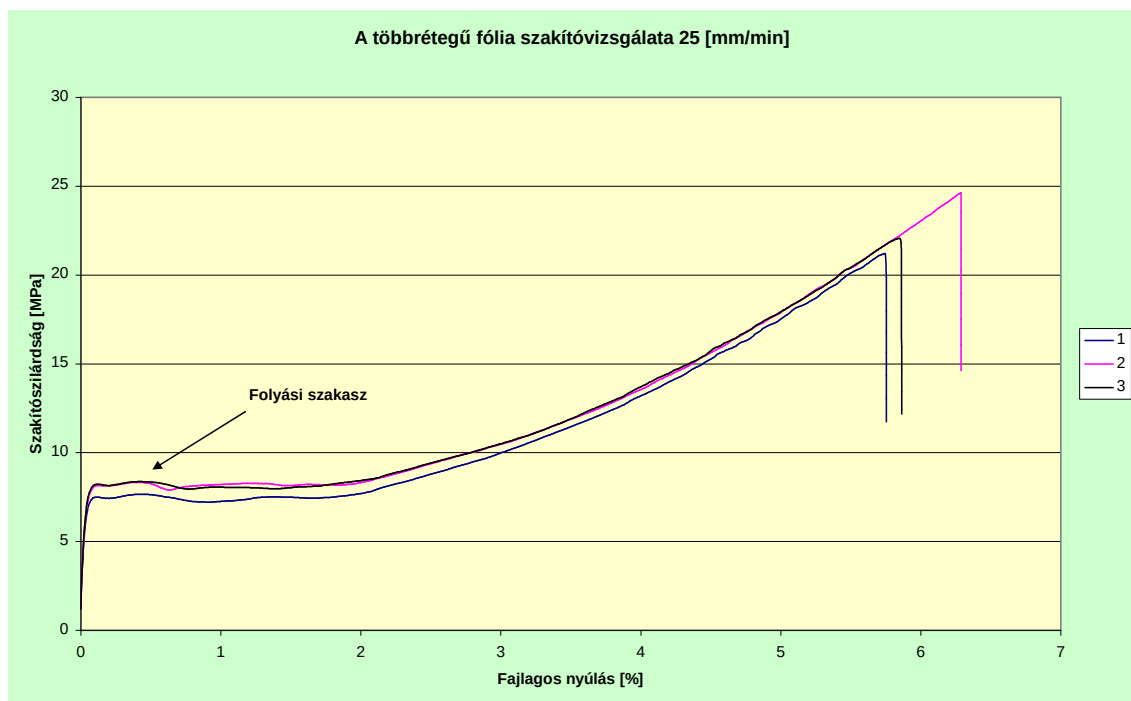


3. EREDMÉNYEK, ÉRTÉKELÉS

3.1. A szakítószilárdság és a terhelési sebesség vizsgálata

A szakítóvizsgálatokat 1, 3, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 250, 500 mm/min terhelési sebességgel végeztem 3-szoros ismétléssel.

A feszültség-fajlagos nyúlás diagramokról meghatározhatóvá váltak a fólia folyáshatárához tartozó feszültségek (3.1. ábra).



3.1. ábra. Az exponátlan többrétegű fólia szakítódigramja 25 [mm/min] terhelés mellett

A folyáshatárhoz tartozó feszültség (az összes sebességszinten) 7,5-8 MPa közé esett, ezért a kúszásvizsgálatokhoz használt legmagasabb feszültséget 7MPa-ra választottam.

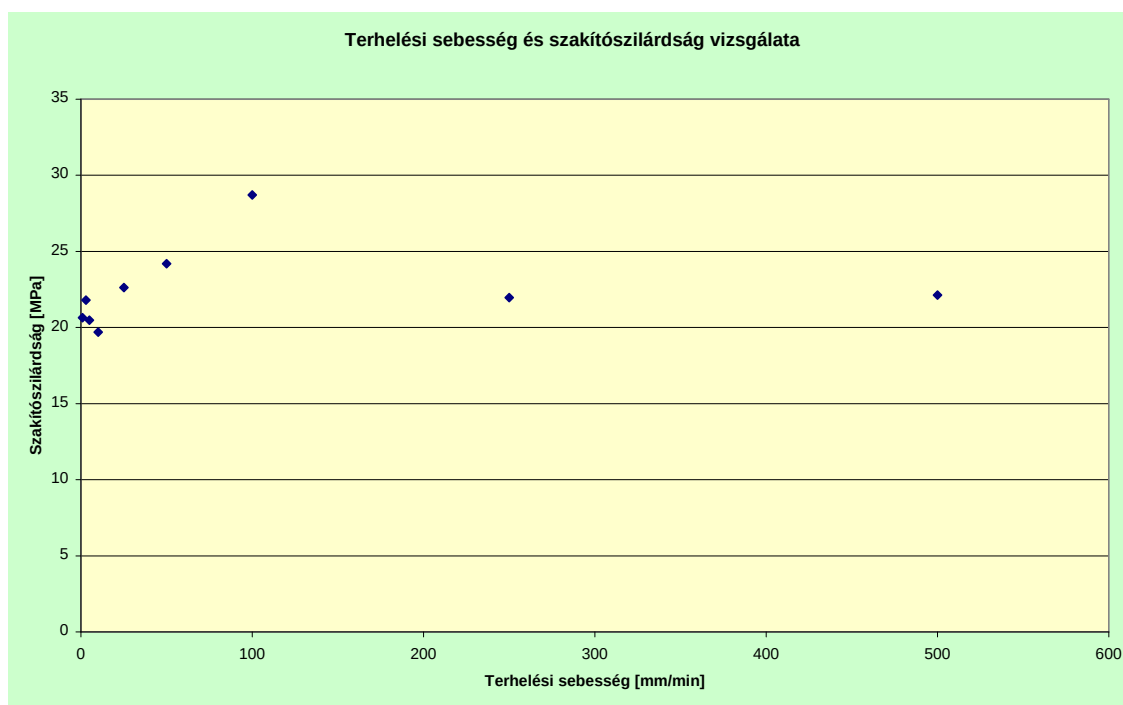


A különböző terhelési sebességekhez tartozó maximális szakító értékeket a 1. táblázat mutatja.

1. Táblázat

	Terhelési sebesség [mm/min]								
	1	3	5	10	25	50	100	250	500
	Feszültség [MPa]								
1. mérés	20,61	22,23	17,44	19,21	21,20	25,29	28,70	18,00	20,99
2. mérés	20,49	20,43	20,20	19,07	24,62	22,10	29,56	25,67	19,69
3. mérés	20,87	22,76	23,85	20,80	22,06	25,19	27,85	22,23	25,73
átlagok:	20,66	21,80	20,49	19,45	22,62	24,19	28,70	21,96	22,14

A kapott átlagokat $\sigma - t$ koordináta rendszerben ábrázoltam és a kapott pontsorra egyenest illesztettem



3.2. ábra. A maximális feszültségek a terhelési sebesség függvényében

A szakítóvizsgálatok során kapott maximális normál feszültségek nagyjából azonosak, azonban a 100 [mm/min] terhelési sebességen végzett mérések értékei 28%-kal nagyobbak. A szakirodalomban különböző sebességek mellett mérték a szakítószilárdságot, de csak három különböző vizsgálati sebességen. Így nem lehetett összefüggést találni a fenti paraméterek

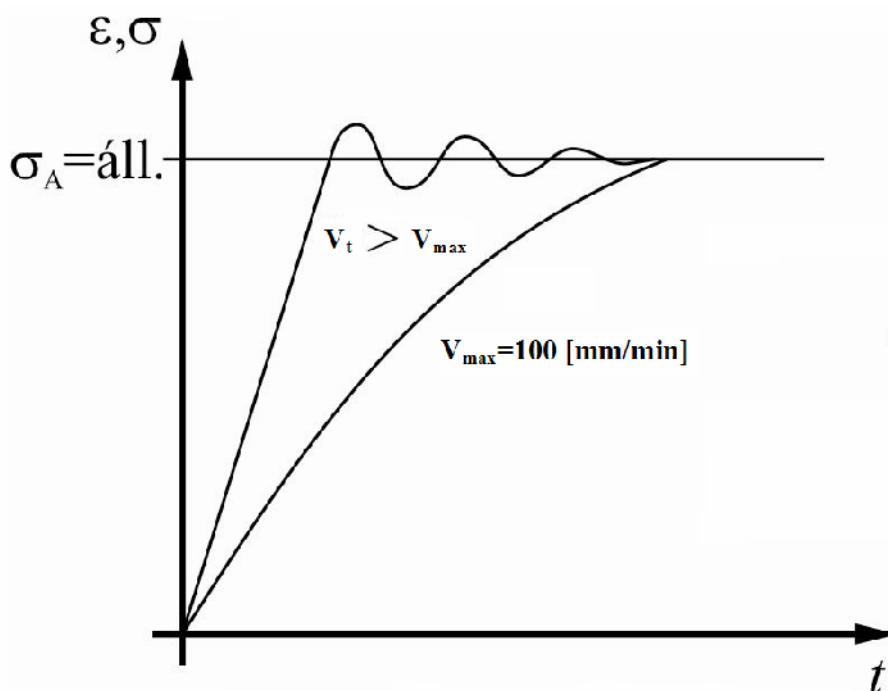


között. Ezért az idei évben az Európába legnagyobb számban forgalmazott fóliákat vizsgáltam egy szélesebb 1-500 [mm/min] sebességtartományban. Az eredmények azt mutatják, hogy a gyakorlatban alkalmazott (nem kísérleti) fóliák szakítószilárdsága nem függ a terhelési sebességtől.



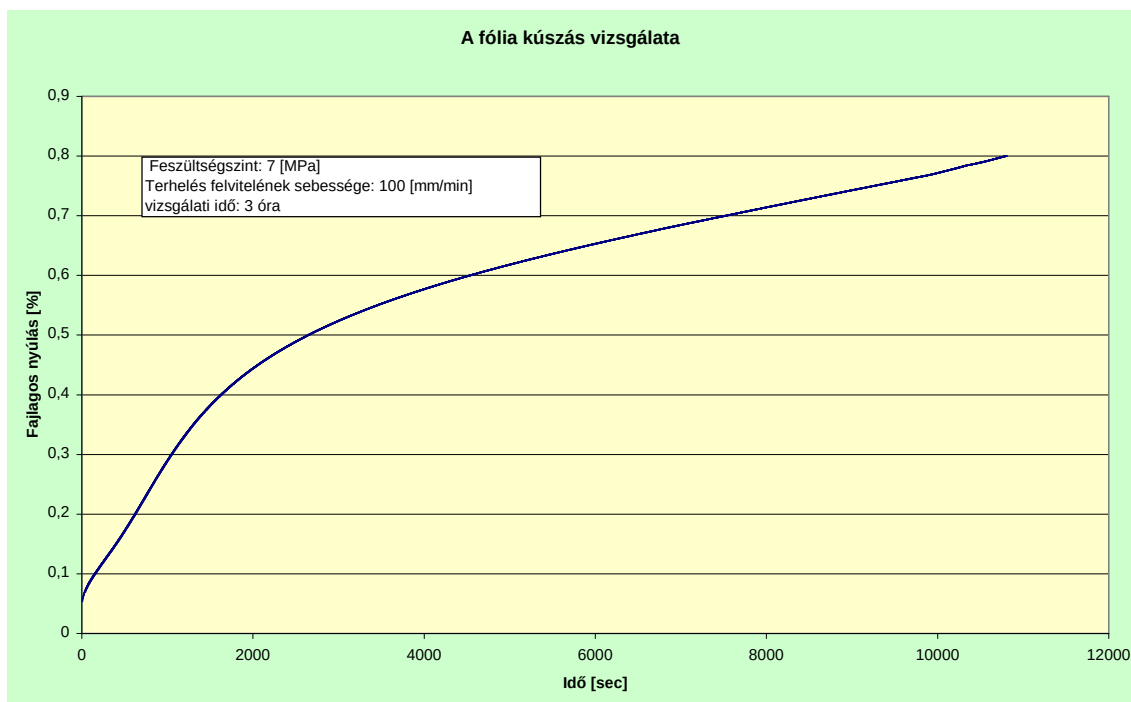
3.2. A kúszás vizsgálatok eredményei

A kúszás vizsgálatoknál a legfontosabb paraméterek a terhelés felvitelének sebessége, terhelés nagysága és a terhelési idő. A terhelés nagysága a szakítódiagramok alapján 7MPa. A sebesség meghatározásához először próbavizsgálatokat kellett végezni. Ennek a célja annak a maximális sebességértéknek a meghatározása, amelynél a túllendülés még nem jelentkezik. Az elvégzett mérések alapján ez az érték 100 mm/min, ha ennél nagyobb sebességre állítjuk a szakítógépet keresztfejét, akkor a túllendülés bekövetkezik (3.3. ábra). A terhelésfelvitelt követő kúszási vizsgálatok időtartama 3 óra volt.

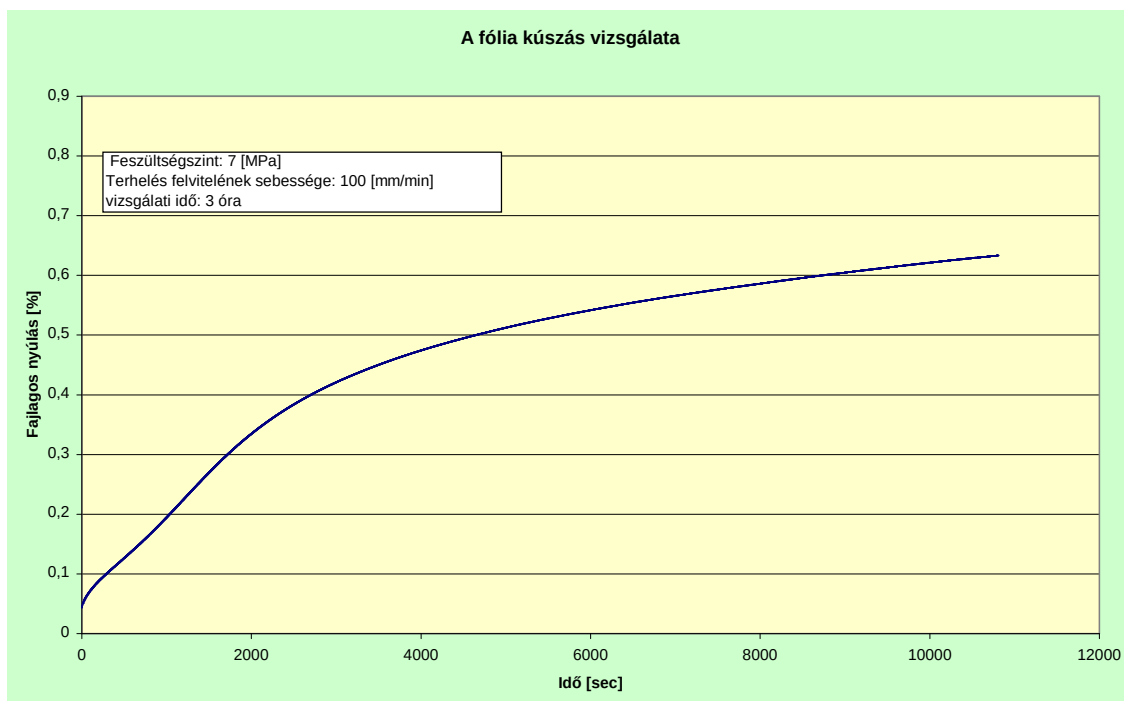


3.3. ábra. A túllendülés a 100 [mm/min] terhelés felvitelnél nagyobb sebességeknél keletkezik

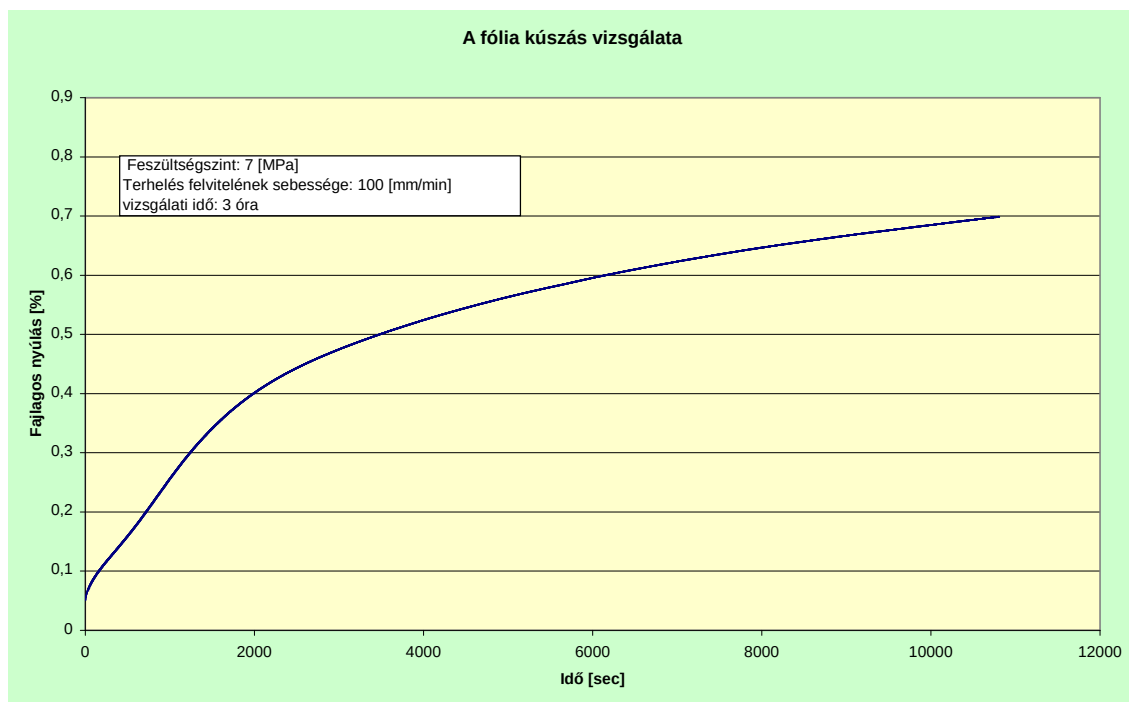
A következő diagramok kúszás vizsgálat által kapott görbék mutatják. A vizsgálatokat a gyártótól kézhez kapott exponáltatlan fóliákkal végeztem.



3.3. ábra. Az 1. mérés karakterisztikája



3.3. ábra. A 2. mérés karakterisztikája



3.4. ábra. A 3. mérés karakterisztikája



3.3. A fólia anyagállandóinak meghatározása a Poynting-Thomson modell alapján

A Poynting-Thomson modell egyenletei:

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

Ezekből:

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

A Solver program számításai, a mérések eredményei és a következő egyenletek alapján a fólia anyagállandói:

Az 1. mérés által kapott értékek:

2. Táblázat

Anyagállandók értékei	
σ_a [MPa]	7
ε_a [MPa]	0,053452
a_1 [MPa*s]	0,500266
a_0 [MPa]	0,000669
b [sec]	0,0000027

A 2. mérés által kapott értékek

3. Táblázat

Anyagállandók értékei	
σ_a [MPa]	7
ε_a [MPa]	0,043079
a_1 [MPa*s]	0,541889
a_0 [MPa]	0,00039
b [sec]	0,00000866



A 3. mérés által kapott értékek:

4. Táblázat

Anyagállandók értékei	
σ_a [MPa]	7
ε_a [MPa]	0,050792
a_1 [MPa*s]	0,505382
a_0 [MPa]	0,000555
b [sec]	0,0000179

A mért és a számított görbék összehasonlítása a kúszás egyenletek és a fent meghatározott anyagállandók segítségével történtek. A kúszás egyenlet

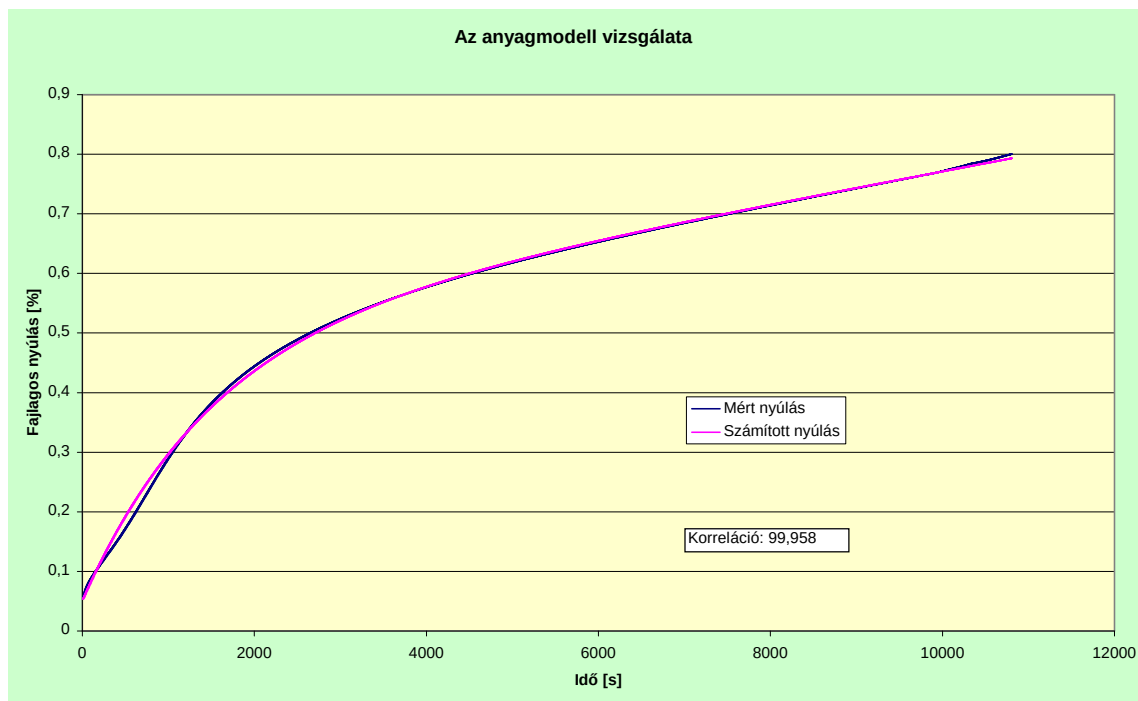
$$\varepsilon(t) = \sigma_a \left[\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \right) - \frac{1}{E_3} e^{-\frac{E_3 t}{\eta_3}} \right]$$

A Poynting-Thomson egyenlet:

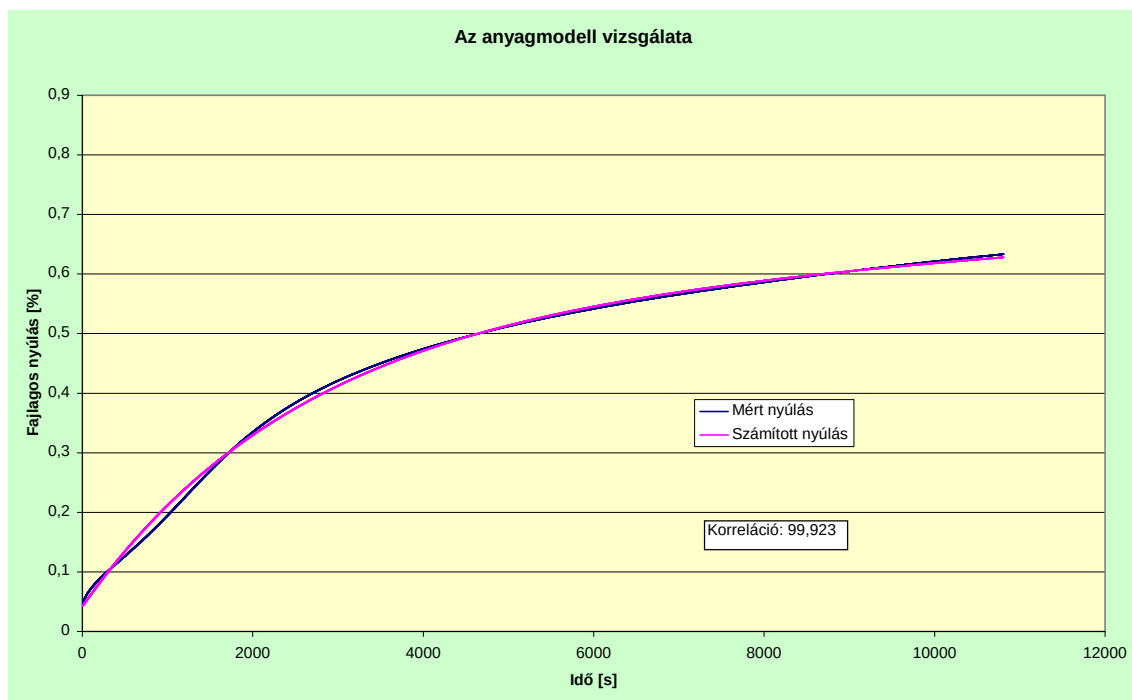
$$\Delta(E_1, E_3, \eta_3) = \sum_{i=1}^n \left\{ \varepsilon_i - \sigma_a \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_3} \left(1 - e^{-\frac{E_3 t_i}{\eta_3}} \right) \right] \right\}^2$$



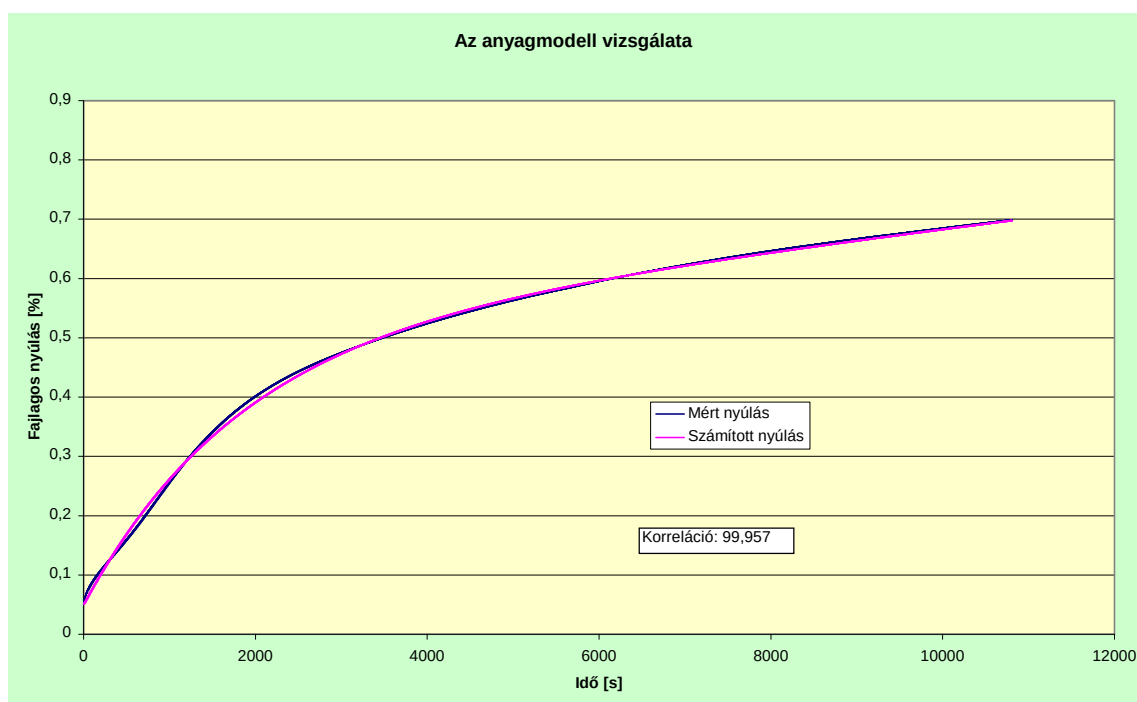
A számított és a mért görbék összehasonlítása:



3.5. ábra. 1. mérés



3.6. ábra. 2. mérés



3.7. ábra. A 3. mérés

A görbeillesztés szorosságát a korrelációs együttható értéke jellemezi. A szükséges számításokat és a grafikonok megrajzolását is EXCEL program segítségével hajtottam végre. A fenti görbék illeszkedése és a korrelációs értékei azt mutatják, hogy a Poynting-Thomson modell alkalmas az általam vizsgált fóliák mechanikai viselkedésének leírására.



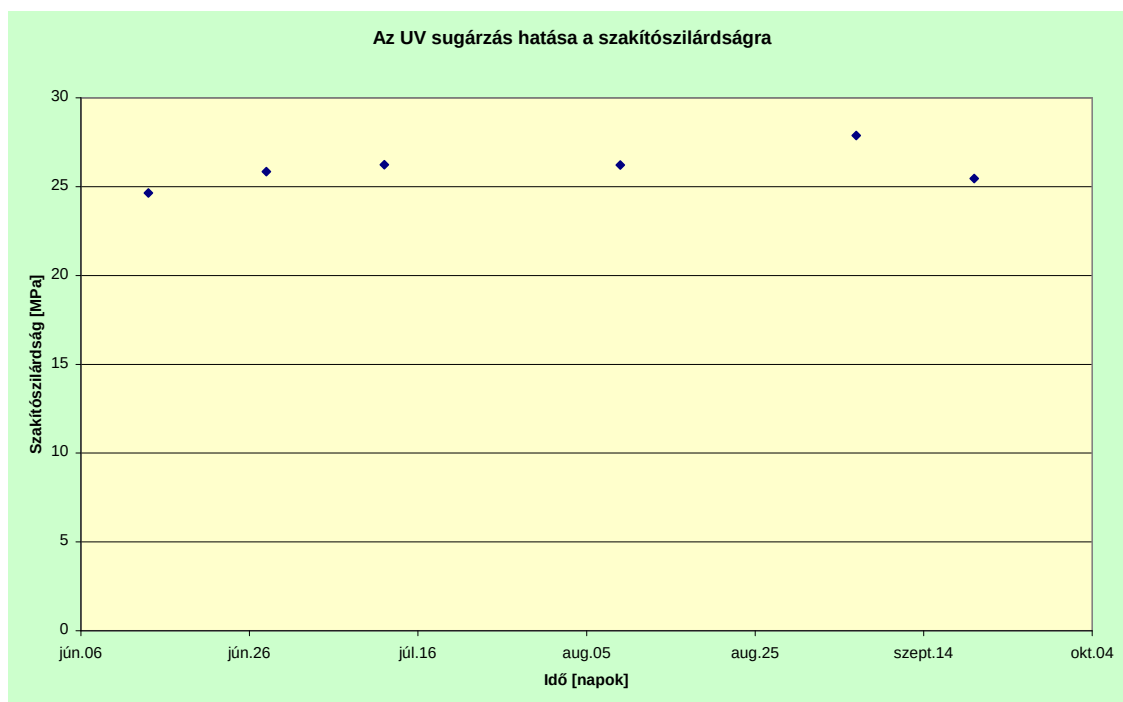
3.4.A szakítószilárdság változása az ibolyántúli sugárzás hatására

A próbatestek mintavételezése 14 napos időközönként történt 2011. júniusa és szeptembere között. A mintavételezést követően háromszoros ismétléssel végeztem a szakítóvizsgálatokat. A diagramokról leolvastam a maximális normálfeszültségeket, melyeket táblázatba rendeztem.

5. Táblázat

Dátum						
	Jún.14	Jún.28	Júl.12.	Aug.9.	Szept.06.	Szept.20.
Feszültségek [MPa]						
1. mérés	25,12	24,50	25,73	25,72	26,57	24,29
2. mérés	24,56	27,07	26,91	26,72	27,19	24,77
3. mérés	24,23	25,94	26,06	26,22	29,84	27,32
átlagok:	24,65	25,84	26,23	26,22	27,87	25,46

Majd a feszültségértékeket ábrázoltam az eltelt napok függvényében (3.8. ábra.).



3.8. ábra. A szakítószilárdság alakulása az eltelt napok függvényében



A szakirodalomban amikor az UV sugárzás függvényében vizsgálták a reológiai paraméterek, jelentős különbségek mutatkoztak az eredményekben, ezért azt feltételeztem, hogy a szakítószilárdság értékei is különbözni fognak egymástól. A feltételezést a fenti diagram nem igazolta, mivel a gyakorlatban alkalmazott fóliák maximális feszültségértékei nem változnak az idő függvényében.



4. ÖSSZEFOGLALÁS

A munkám célja a mezőgazdasági tárolástechnikában alkalmazott többretegű csomagolófóliák szilárdsági jellemzőinek és azok változásainak meghatározása volt. Ezen fóliák alakváltozási- és feszültségállapota állandó terhelés mellett is az idő függvényében változik. Az ilyen jelenséget a reológia tárgyalja. Dolgozatomban részletesen elemeztem a reológiai modellrendszereket, csoportokat, osztályozási módokat.

Eredmények:

- A mért és a számított görbék illeszkedése és a korrelációs értékei azt mutatják, hogy a Poynting-Thomson modell alkalmas az általam vizsgált fóliák mechanikai viselkedésének leírására.
- A választott viszkoelasztikus modellnek az adott anyaghoz tartozó anyagállandóit meghatároztam.
- Megállapítottam, hogy a gyakorlatban alkalmazott (nem kísérleti) fóliák szakítószilárdsága nem függ a terhelési sebességtől.
- A vizsgálatok igazolták, hogy a gyakorlatban alkalmazott fóliák maximális feszültségértékei nem változnak az idő függvényében.

A későbbiekben további vizsgálatokat fogok végezni az alábbi témakörökben:

- További vizsgálatok a szakítószilárdság és az ultraibolya sugárzás összefüggésére
- Az adott fóliákat reológiai jellemzőinek meghatározása több feszültség szinten
- A felvett görbék ábrázolása az OMSZ-nél mért sugárzási értékek függvényében



5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Csatár A.: Globális sugárzás és az időjárás hatása a többretegű mezőgazdasági csomagoló fóliák mechanikai jellemzőire, doktori értekezés
- [2] Csatár A., Csorba L.: *Műanyag csomagoló- és takarófóliák reológiai vizsgálata*, Mezőgazdasági Gépesítési Tanulmányok, Gödöllő, 2004.
- [3] Commission Internationale de l'Éclairage: *International Lighting Vocabulary*, 1987, CIE 17.4
- [4] Commission Internationale de l'Éclairage: *Standardization of the terms UV-A1, UV-A2 and UV-B*, 1999, CIE 134/1
- [5] Commission Internationale de l'Éclairage: *A proposed global UV index*, 2000, CIE 138/4
- [6] 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
- [7] M. Csizmadia B., Nádori E.: *Mechanika mérnököknek Modellalkotás*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999 (190-191. old.)
- [8] MSZ EN ISO 527-1, 527-3.: *Műanyagok. A húzási jellemzők meghatározása*, Magyar Szabványügyi Testület, Budapest, 2001.
- [9] Schanda, J.: *Az optikai sugárzás élettani hatásai*, Magyar Tudomány, Budapest, 2002./8.



[10] Varga A.: Nyírókészülék tervezése a nemzetközi előírások figyelembevételével, szakdolgozat, 2011