



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

TATÁR NIKOLETTA

DIPLOMATERV

SZÓTT ERŐSÍTŐSZERKEZETEK ÉS HAJLÉKONY
KOMPOZITJAİK HAJLÍTÓVIZSGÁLATA
KÉPFELDOLGOZÁSSAL

Témavezető:

Dr. Halász Marianna

egyetemi docens

Konzulensek:

Dr. Tamás Péter

egyetemi docens

Dr. Vas László Mihály

címzetes egyetemi tanár

BUDAPEST, 2014

Szerzői jog © Tatár Nikoletta, 2014.

Ide kell befűzni az eredeti feladatkiírási lapot!

A feladatkiírás hátoldala!

NYILATKOZATOK

Elfogadási nyilatkozat

Ez a diplomaterv a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kara által a Diplomatervezési és Szakdolgozat feladatokra előírt tartalmi és formai követelménynek megfelelően készült. E diplomatervet a nyilvános bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2014.12.19.

témavezető

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Tatár Nikoletta* (J6ADKQ), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és *dolgozatomban* csak a megadott *forrásokat* használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2014.12.17.

szigorló hallgató

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Halász Mariannának a sok biztatásért, végtelen türelemért és szakmai útmutatásért. Továbbá köszönöm konzulenseimnek, Dr. Tamás Péternek és Dr. Vas László Mihálynak a dolgozatom megírásában nyújtott segítségüket.

A kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alap az OTKA K100949 számú, valamint a Kutatási és Technológiai Innovációs Alap a TÉT_12_DE-1-2013-0006 és a TÉT_12_MA-1-2013-0008 számú projektek során nyújtott támogatásával segítette. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

TARTALOMJEGYZÉK

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	VII
JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	X
1. BEVEZETÉS.....	2
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
2.1. Hajlékony kompozitok - ponyvák.....	4
2.2. A hajlító jellemzők meghatározása deformált alakból	7
2.3. Hajlító jellemzők meghatározása hajlítónyomaték vagy -erő mérésel 13	
3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK	17
3.1. Felhasznált alapanyagok.....	17
3.2. Alkalmazott berendezések és vizsgálati módszerek	18
4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ.....	27
4.1. Az alapszövet vizsgálata.....	27
4.2. Sylvie 3D Bending Tester.....	28
4.3. Mérések PT Flexometerrel	41
4.4. Szakítógépes kihajlászvizsgálat	43
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	56
5.1. Eredmények.....	56
5.2. További feladatok	57
6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK	58
7. SUMMARY.....	60
8. MELLÉKLET	I

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

A jegyzék a dolgozatban előforduló jelölések magyar és angol nyelvű elnevezését, valamint fizikai mennyiségek esetén azok mértékegységét tartalmazza. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik a hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A	a minta területe	m ²
b	próbasáv szélessége	m
C	hajlítóhossz	m
D	hajlítási merevség	Nm ²
E	rugalmassági modulus	Pa
F	nyomóerő	N
F _c	kritikus axiális nyomóerő	N
G	egységnyi területre eső kelmesúly	N/m ²
g	nehézségi gyorsulás	m/s ²
I	a keresztmetszet másodrendű nyomatéka	m ⁴
l	túlnyúló hossz	m
M _h	hajlítónyomaték	Nm
m	korrekciós tényező	-
N _x	horizontálisan ható erők	N
p	megoszló erő	$\left[\frac{N}{m}\right]$
Q	a súlypontba redukált erőrendszer	N
q	területi sűrűség	kg/m ²
S _p	adott lehajláshoz tartozó előtolt hossz	m
S	súlypont helye	
s	P pont távolsága a szabad végtől	m
v	próbasáv vastagsága	m
x _h	homogén x koordináta	-
y _h	homogén y koordináta	-
z _h	homogén z koordináta	-
x _k	Descartes-féle x koordináta	-
y _k	Descartes-féle y koordináta	-

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
δ	a szabad vég lehajlása	m
μ	a befogástól függő tényező	-
Ψ	a P pontbeli érintő szöge	°
θ	a lehajlás szöge	°

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
FEA	finite element analysis (végelelemes analízis)
FAST	Kelmetulajdonságokat vizsgáló egyszerűsített mérőrendszer (Fabric Assurance by Simple Testing)
KES	Kawabata Kelmeelemző Rendszert (Kawabata Evaluation System)
PVC	polivinilklorid (polyvinylchloride)
PTFE	politetrafluoretén (polytetrafluorethylene, TEFLON)
SHELL	héj típusú elem
TKI	Textilipari Kutató Intézet
VEM	végelelemes módszer

1. BEVEZETÉS

Hajlékony lapszerű anyagok alatt olyan termékeket értük, amelyek kiterjedése az egyik irányban nagyságrendekkel kisebb, mint a másik kettőben. Az ilyen típusú anyagok saját síkjukban terhelve már kismértékű nyomó igénybevétel hatására - akár saját súlyuk miatt is - jelentős alakváltozást szenvednek. Ebbe a kategóriába sorolhatóak többek között a humán textíliák, kompozit erősítő szövetek és paplanok, illetve a papír is.

A hajlító tulajdonságok meghatározzák a kelmék alakíthatósági képességét, esését és tartását. Minél kisebb egy szövet merevsége, annál jobb az esése, viszont minél merevebb, annál jobb a tartása. Ezek a tulajdonságok nagy jelentőséggel bírnak, mind feldolgozási, mind felhasználási szempontból [1]. A kis nyíró- és hajlítómerevség az oka, hogy ezeket az anyagokat könnyen térformára lehet alakítani. Hajlítási jellemzőiket azonban nem lehet az olyan klasszikus mérési módszerekkel meghatározni, amilyen például a hárompontos hajlítás.

A kis hajlítómerevségű lapszerű anyagok hajlításmérési módszerei két nagy csoportba sorolhatók. Az első csoportba azok a mérések tartoznak, amelyeknél a deformált minta alakjának elemzéséből számítják a hajlító jellemzőket. Ezen az elven alapul a Flexometer, amelynek kialakítása és a kiértékelési módszere egyszerű, pontossága a textilipari igényekhez igazodik [1,2-4]. Ez azonban az anyag megfelelő modellezéséhez nem mindig elegendő. A másik megközelítés a hajlítónyomaték közvetlen méréséből számítja a hajlítómerevséget. Erre példa a humán textíliák mechanikai tulajdonságairól átfogó képet adó, a kelmék fogási tulajdonságainak objektív meghatározására kifejlesztett Kawabata Kelmeelemző Rendszer (KES) hajlítóvizsgáló egysége. A KES rendszer azonban egyrészt meglehetősen drága, másrészt a műszaki szövetek mechanikai tulajdonságainak meghatározására a kis mérési tartományok miatt nem, vagy csak korlátozott mértékben alkalmas.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem két tanszéke, a Polimertechnika Tanszék és a Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék által közösen kifejlesztett Sylvie 3D Bending Tester berendezés, alkalmas a hajlékony, lapszerű anyagok hajlítási jellemzőinek meghatározására. Az új berendezés rögzíti a deformált minta alakját, amelyből képfeldolgozás után a mechanikai modell segítségével meghatározhatók a minta hajlítási jellemzői. Az új mérési módszerrel nem csak a humán textíliák vizsgálata végezhető el, hanem a hagyományosnál merevebb és vastagabb lapszerű anyagoké is; ilyenek például a műszaki és kompoziterősítő textíliák, ponyvák.

A hajlékony lapszerű anyagok hajlító jellemzőinek meghatározása igen fontos terület, amelynek eredményei ezen anyagok anyagmodelljeinek fejlesztésénél is felhasználhatóak. A lapszerű anyagok viselkedésének numerikus modellezése nagy

kihívást jelent mind az anyagmodell, mind a geometria oldaláról. Jelenleg az ilyen szoftverek ipari felhasználása még nem terjedt el, azonban más egyetemeken is komoly kutatások találhatók a tématerületre vonatkozóan [5].

A diplomaterv célja a Sylvie 3D Bending Tester berendezés kiértékelési módszerének továbbfejlesztése és a vizsgált ponyvaanyagok hajlító tulajdonságainak meghatározása. Továbbá megvizsgálom annak a lehetőségét, hogy a szakítógéppel elvégzett kihajlászvizsgálat alapján, hogyan validálhatók az egyéb mérésekkel kapott eredmények.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A következőkben rövid áttekintést adok a ponyvákrol és azok tulajdonságairól.

Továbbá bemutatom dolgozatom fő témáját, a lapszerű anyagok hajlítási tulajdonságainak vizsgálatára alkalmas berendezéseket és módszereket. Ezeket a módszereket két csoportba sorolom aszerint, hogy a hajlító jellemzőket a hajlítónyomaték hatására deformált minta alakjának elemzéséből vagy közvetlenül, a hajlítónyomaték méréseéből határozzák meg.

2.1. Hajlékony kompozitok - ponyvák

A kompozit olyan többfázisú műszaki célú szerkezeti anyag, amelyben nagy szilárdságú erősítőanyag alkalmazásával tervezett anizotrópiát hoznak létre a fő terhelési irányokban. Gyártástechnológiától és felhasználástól függően kompozit erősítésére többféle alapanyagú és struktúrájú erősítőanyagot használnak. A leggyakrabban alkalmazott erősítőanyagok az üveg, szén, aramid és bazalt.

Az ismert szálorientáció, ezáltal a kompozit termék könnyebben tervezhető deformációja miatt a leggyakrabban alkalmazott erősítőstruktúra a szövet.

A klasszikus, merev kompozit alkalmazások mellett nagy jelentősége van a hajlékony kompozit termékeknek is. Ezeket, az általában PVC-vel bevont poliészter vagy PTFE bevonatú üvegszálak kompozit ponyvákat elterjedten alkalmazzák az építőiparban könnyűszerkezetes, feszített membrán- és sátorszerkezetek (1. ábra) kialakításakor.



1. ábra Sportpálya ideiglenes téli fedése sátorral

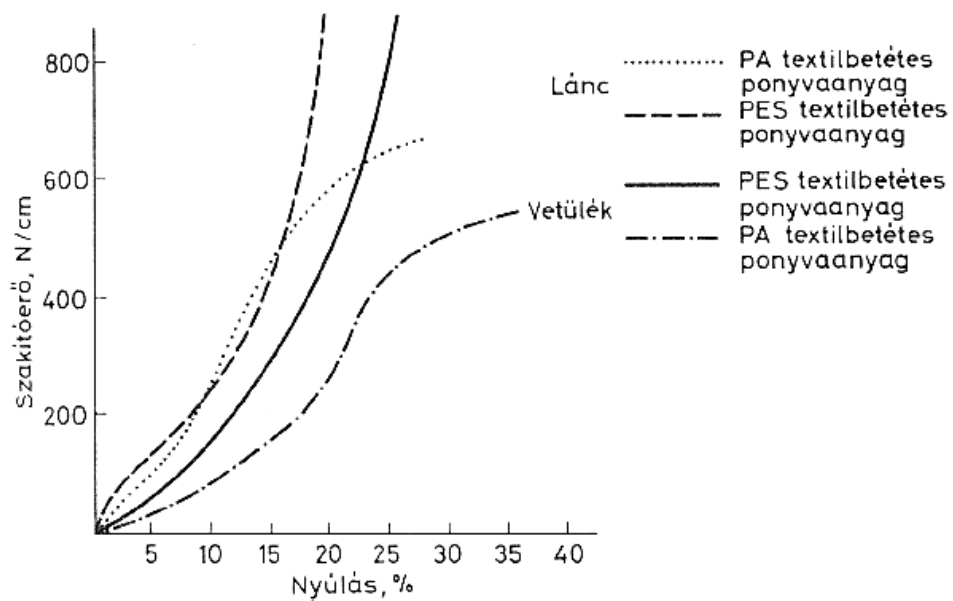
A sátrakat már az Ókorban is használta az ember, mert a kis tömegű és könnyen szállítható elemekből egyszerűen tudott ideiglenes szállást készíteni. Ilyen korai ponyvaszerkezetek voltak a honfoglaló magyarok jurtái vagy a Római Birodalom amfiteátrumainak fedése. Ahhoz, hogy méretezhető, megbízható és időtálló sátrakat lehessen tervezni, a műanyagok megjelenéséig kellett várni. Az első mérnöki ponyvaszerkezetet 1957-ben tervezte Otto Frei egy körhinta lefedésére. Virágkorát a '70-es évek jelentették, de azóta is szép számmal készülnek sportlétesítmények fedése, mellett olyan modern építészeti megoldásokra is, mint a Burzs al-Arab (9) átriumának vitorla alakú borítása, amely teflonbevonatú üvegszövetből készült [8].



2. ábra Burzs al-Arab (Dubai)

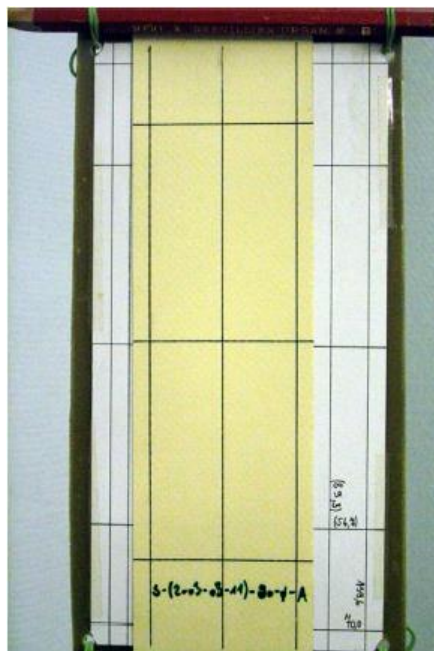
Hegyvi Dezső [8] disszertációjában a ponyvák nemlineáris viselkedését vizsgálta. Mivel a ponyvákat építészeti alkalmazásakor döntően húzóigénybevétel éri, ezért egy- és kéttengelyű húzóvizsgálatokat végzett láncc- és vetülékirányban.

A 3. ábra ponyvaanyagok tipikus erő-megnyúlás diagramjait mutatja. A ponyvaanyagok a szövetekhez hasonlóan eltérő viselkedést mutatnak láncc- és vetülékirányban. Igénybevétel hatására vetülékirányban először a szövés miatt hullámos szálak kiegyenesedése történik, amely a szakítógörbén egy kezdeti laposabb szakaszban jelenik meg [8].



3. ábra Ponyvaanyagok tipikus erő-megnyúlás diagramjai [8]

Hegyi vizsgálatait hangsúlyát a ponyvaanyagok időfüggő deformációjának feltárására helyezte, amelyeket 4 és 50 hétig vizsgált. A nyúlásértéket a 4. ábra szerint előkészített mintadarab és kalibráló keret segítségével képelemzéssel határozta meg.



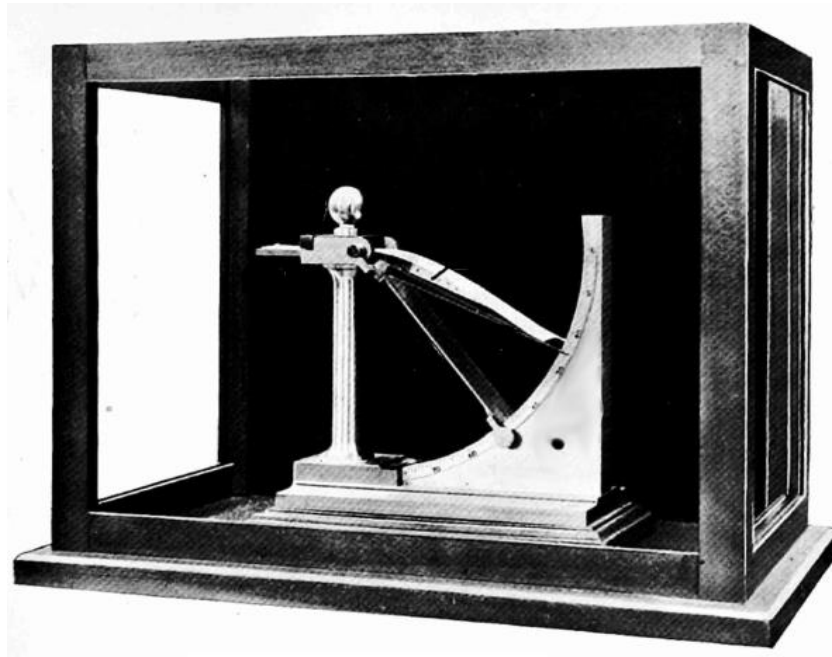
4. ábra Mérési elrendezés képelemzéses kúszásvizsgálathoz [8]

2.2. A hajlító jellemzők meghatározása deformált alakból

Gyimesi János [2] a hajlítási tulajdonságok meghatározására alkalmas módszereket két fő csoportba osztotta. Az első, ahol a próbasávra ható hajlítónyomatékot a nehézségi erő fejti ki, ide tartozik a Flexometer és a hurok módszer. A második, ahol ezt a nyomatékot külső erő hozza létre. Saját súlyától lehajló, különböző szögű lejtőket érintő textilsávokra dolgozott ki számítási eljárásokat több kutató. Flexometerrel meghatározható a lapszerű anyagok hajlítással szembeni ellenállása, vagyis a hajlítómerevség, amelyet a hajlítási hosszal jellemezhetünk. Ezek közül kiemelkedik Peirce Cantilever Test módszere, amelynek alkalmazása alapvetővé vált a textiliparban.

2.2.1. A Peirce-féle Cantilever Teszt

A textíliák fogási jellemzője, amelyre az angolszász irodalom a „handle of cloth” kifejezést használja, egy komplex és szubjektív jellemző, amely kapcsolatban áll a merevséggel, lágyassággal, keménységgel, puhasággal, érdességgel és simasággal. Peirce [2] azt a célt tűzte ki, hogy létrehoz egy olyan objektív módszert, amellyel a kelmék fogási tulajdonsága számszerűsíthető. Az 1930-ban publikált cikke a kelmék fogását befolyásoló tulajdonságok közül a keménységgel, a hajlítási tulajdonságokkal, a hajlítómerevség meghatározására alkalmas Cantilever Test módszerrel és az azt alkalmazó Flexometer berendezéssel (5. ábra) foglalkozik. Ezt a publikációt a jelentősége miatt a következőkben részletesen is bemutatok.



5. ábra Az eredeti Peirce-féle Flexometer [2]

A fémek merevségének meghatározására alkalmazott kis lehajlások mérése, és ezen infinitezimális elmozdulások matematikai elemzése textíliák esetében nem elégséges, a kelmékre jellemző lágy viselkedés és a nagyobb szórás miatt. Mivel a hajlítási merevség és a nagy lehajlás kapcsolatát leíró differenciálegyenletnek nincsen zárt alakú megoldása, ezért a kis lehajlásokkor érvényes egyenletet Peirce úgy módosítja a kapcsolat trigonometrikusan felírásával, elliptikus függvények és sorfejtés alkalmazásával, hogy az megfelelő legyen nagy lehajlások esetére is. A használt próbatestek vékony lemezek, amelyek görbülete arányos a hajlítási nyomatékkal. A vizsgálat célja, az (1)

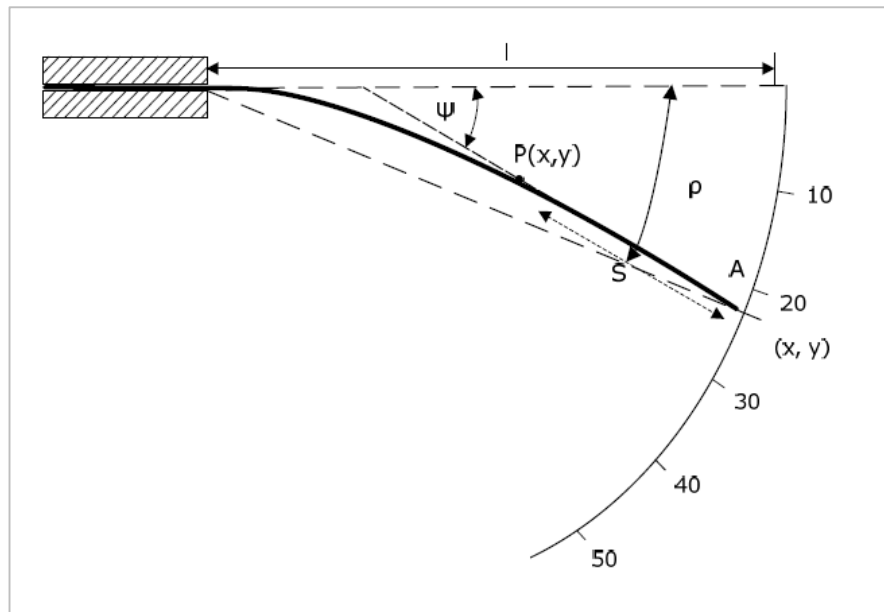
$$S_p = \frac{G}{q} \quad (1)$$

arány vizsgálata, ahol G a hajlítási merevség, a q pedig a területi sűrűség.

Amennyiben téglalap keresztmetszetű próbasávot vizsgálunk (6. ábra), nagyon kicsi lehajlás esetén igaz, hogy

$$S_p = \frac{l^4}{8\delta} \quad (2)$$

ahol l a próbasáv túlnyúló, lehajló hossza és δ a szabad vég lehajlása.



6. ábra Hajlítás kis lehajlások esetén [2,7]

Ahogy azonban a lehajlás mértéke nő, a (2) egyenlet a valósánál túl nagy S_p értéket eredményez, mert a minta súlyából származó nyomaték hatása nagyobb lehajlás esetén csökken. Ezért, a (2) egyenletet tovább kell finomítani, hogy nagyobb

tartományon adjon jó közelítő eredményt. Felhasználva a szabad vég lehalásának szögét (θ), S_p -re felírható a (3) egyenlet.

$$S_p = \frac{l^3}{8tg\theta} \quad (3)$$

Nagyobb lehajlás esetén szükséges egy olyan tényezőt bevezetni, amely $\theta = 0$ esetén egységnyi úgy, hogy θ növekedése esetén az értéke csökken. Peirce javaslatára ez a tényező a $\cos m\theta$. Ahol $m < 1$, általában 0,5 [2].

Amennyiben a 6. ábra szerint, s egy tetszőleges P pont távolsága a szabad végtől mérve, Ψ a P pontbeli érintő szöge a vízszintestől mérve és $\frac{d\Psi}{ds}$ a görbület, akkor a hajlítónyomaték $-G \frac{d\Psi}{ds}$. A hajlítónyomaték megváltozása megegyezik a lehajló próbasáv súlyából származó nyomatékkal, ami alapján a próbasávra felírható a (4) másodrendű differenciálegyenlet.

$$\frac{d^2\Psi}{ds^2} = -s \cdot \cos \frac{\Psi}{S_p} \quad (4)$$

A (4) egyenlet azonban nem integrálható zárt alakban, ezért Peirce egy empirikus úton előállított egyenlet használatát javasolja, ahol

$$S_p = l^3 \cdot \frac{\cos(0,5\theta)}{8 \cdot \tan\theta}. \quad (5)$$

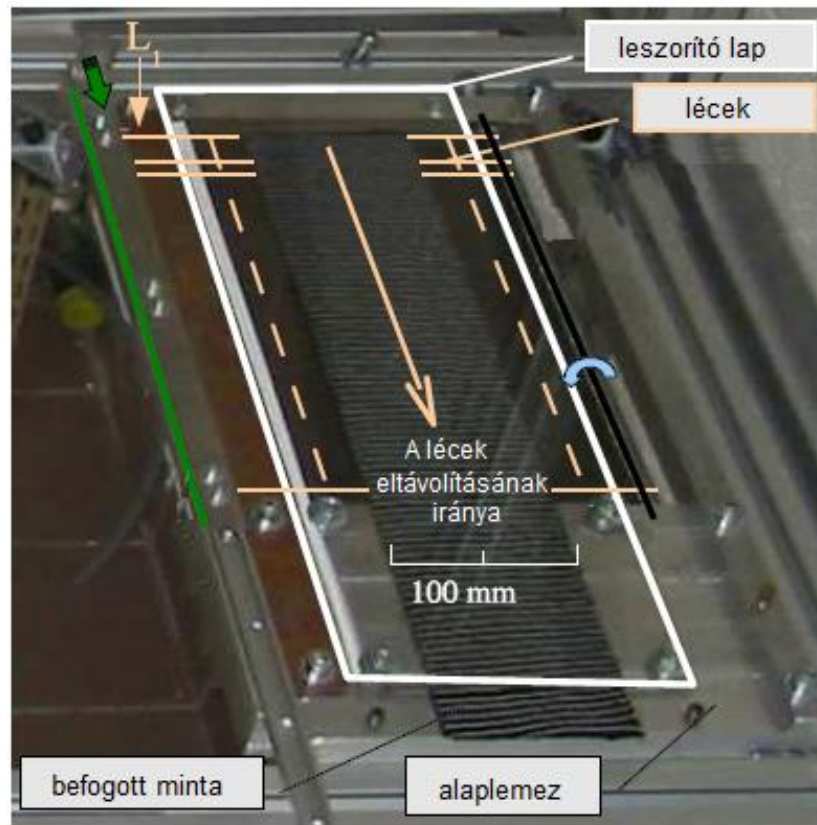
Az (5) egyenlet a Peirce-féle hajlítási egyenlet [2].

2.2.2. Bilbao-féle módosított Flexometer

Bilbao és társai cikkeikben [4, 10-11] bemutatnak egy képfeldolgozással kiegészített módosított Flexometert, annak érdekében, hogy azonosítani tudják a textíliák nem-lineáris viselkedését.

A Bilbao féle lécsorral kiegészített Flexometert mutatja a 7. ábra. A módosított berendezéssel különböző hajlítóhosszak esetén lehet mérni a hajlító tulajdonságokat. A mintát egy lécsorral kiegészített alaplemezre helyezik és egy átlátszó lemezzel leszorítják úgy, hogy ne tudjon megcsúszni.

A mérés során az előtolt minta hosszát 10 mm-ként 80 mm-ről 200 mm-ig növelik a lécek eltávolításával és mindenhol felvételt készítenek a lelógó minta alakjáról.



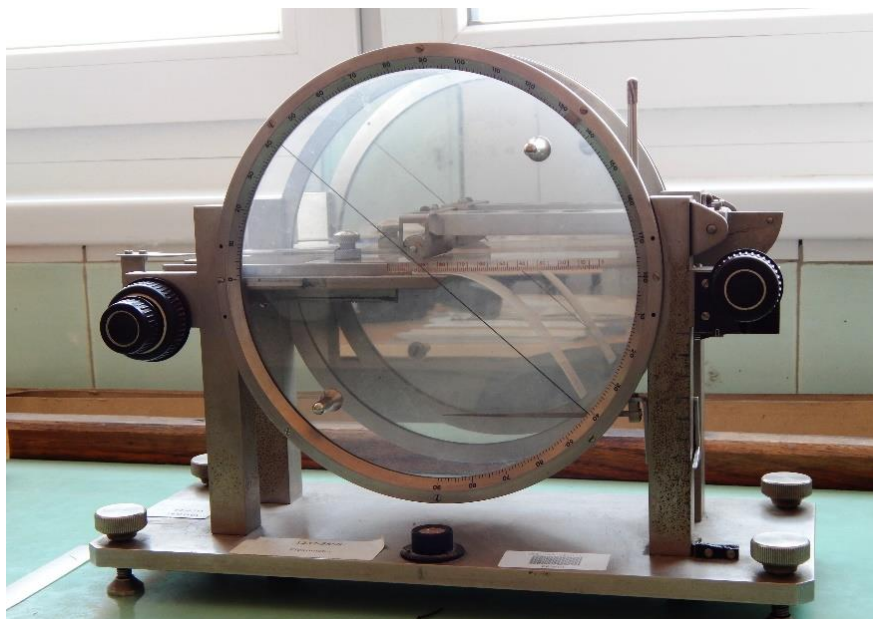
7. ábra Bilbao módosított Flexometer berendezése [10]

A mérés kiértékeléséhez nagy hajlítóhosszak esetén a Dahl-modellt alkalmazzák. Ez a modell azonban kis hajlítóhossznál nem illeszkedik a feltételezhetően lineárisan rugalmas viselkedés miatt. Bilbao kidolgozott egy inverz módszert a hajlító jellemzők meghatározására, ahol kis görbületek esetén, a lehajló minta alakját végeselemes módszer segítségével veti össze. A VEM modellben SHELL elemeket használ, amelyeknél beállítható a nyomaték a görbület függvényében. Az így modellezett lehajlást összeveti a mérési eredményekkel, a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazva [4].

A végeselemes modellel kapcsolatban a szerző nem indokolta, hogy miért alkalmazott SHELL elemet. Az ilyen típusú deformáció modellezésére elegendő a BEAM elemek használata, mert a deformáció síkban történik.

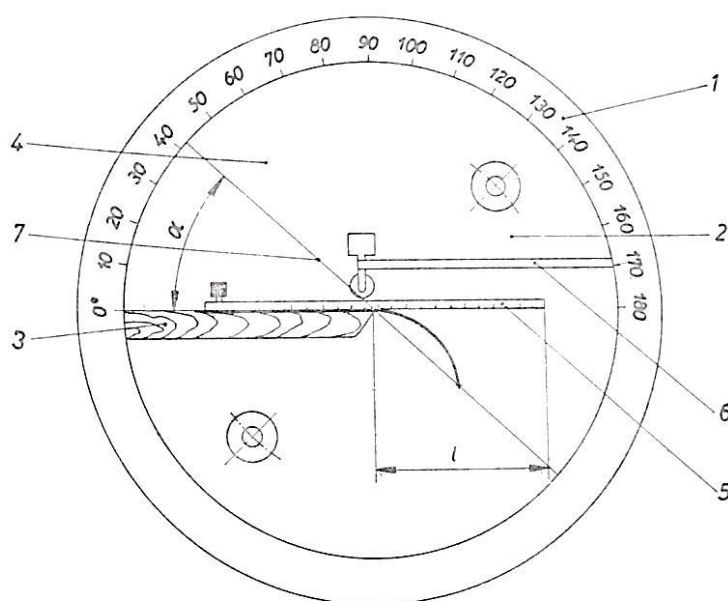
2.2.3. A TKI típusú Flexometer

Magyarországon a leggyakoribb Flexometer típus a Textilipari Kutatóintézetben (TKI) kialakított konstrukció. Az Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könnyűipari Főiskolai Kar Flexometer berendezését mutatja a 8. ábra.



8. ábra Egy TKI típusú Flexometer mérés közben

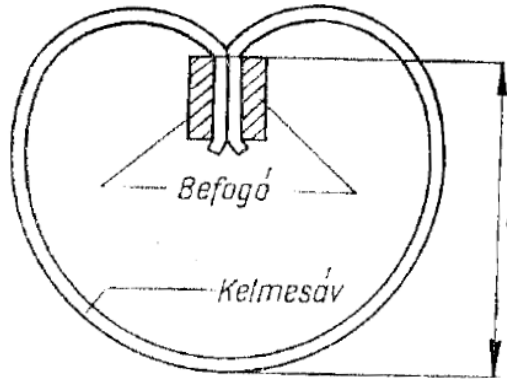
A berendezés egy virtuális lejtőt alkalmaz, amelyet az előlapon lévő átmérővonal és annak reflexiója hoz létre a hátlapon lévő tükrön. A berendezés elvi vázlatát mutatja a 9. ábra.



9. A TKI típusú Flexometer vázlata (1- gyűrű alakú szögmérő, 2- forgatható átlátszó lap, amin az átmérővonal van, 3- vízszintes asztallap, 4- tükrő, 5- mérce, 6- a próbasáv rögzítését biztosító terhelés, 7- átmérővonal)

2.2.4. Hurok módszer

A szív alakú (Heart Loop Test) hurok módszert szintén Peirce dolgozta ki és publikálta 1930-as cikkében. Ez a módszer lehetővé teszi olyan minták vizsgálatát is, amelyek a Cantilever Tesztel már nem vizsgálhatók túlságosan kis merevségük, elcsavarodásra vagy súrlódásra való hajlamuk miatt. A módszer lényege, hogy az 10. ábra szerint szív alakban összefogott kelmehurok függőleges l hosszából határozzák meg a hajlítómerevséget [2].



10. ábra A Pierce féle Heart Loop teszt mérési elrendezése [2]

A torzítatlan hossz (6):

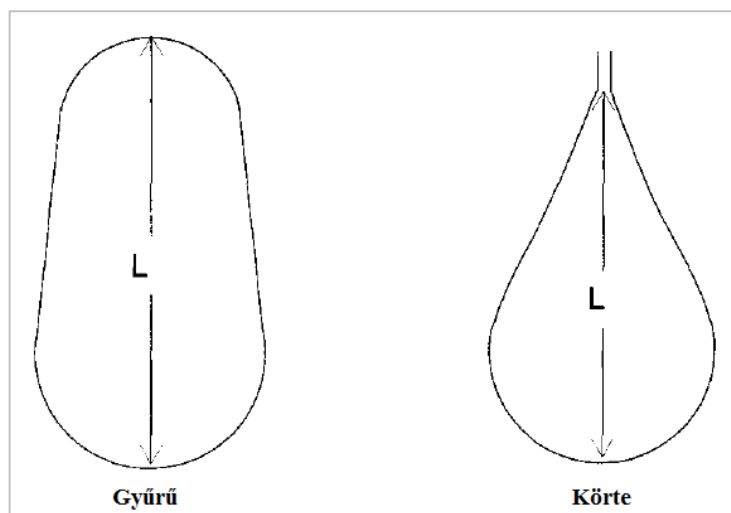
$$l_0 = 0,1337l \quad (6)$$

A hajlítóhossz (7):

$$C = l_0 \cdot f_2(\theta) \quad (7)$$

ahol $\theta = 32,85^\circ \cdot \frac{l-l_0}{l_0}$ és $f_2(\theta) = (\cos\theta/\tan\theta)^{\frac{1}{3}}$.

Speciális esetekre további hurok alakokat lehet használni, például gyűrű és körte alakú hurkokat (11. ábra).



11. ábra A gyűrű alakú és körte alakú hurok módszer mérési elrendezése [12]

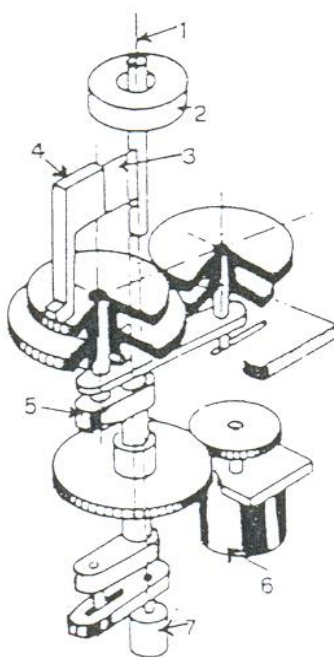
2.3. Hajlító jellemzők meghatározása hajlítónyomaték vagy -erő méréssel

A hajlító jellemzők meghatározásának egy másik módja, amikor a kelme hajlításához szükséges hajlítónyomatékot/hajlítóerőt közvetlenül mérik. Ebbe a csoportba tartozik a Kawabata Kelmeelemző Rendszer hajlítóvizsgáló egysége, a szakítógéppel végezhető nyomó- és kihajlásvizsgálat és a körkörös hajlító eljárás.

2.3.1. Kawabata Kelmeelemző Rendszer

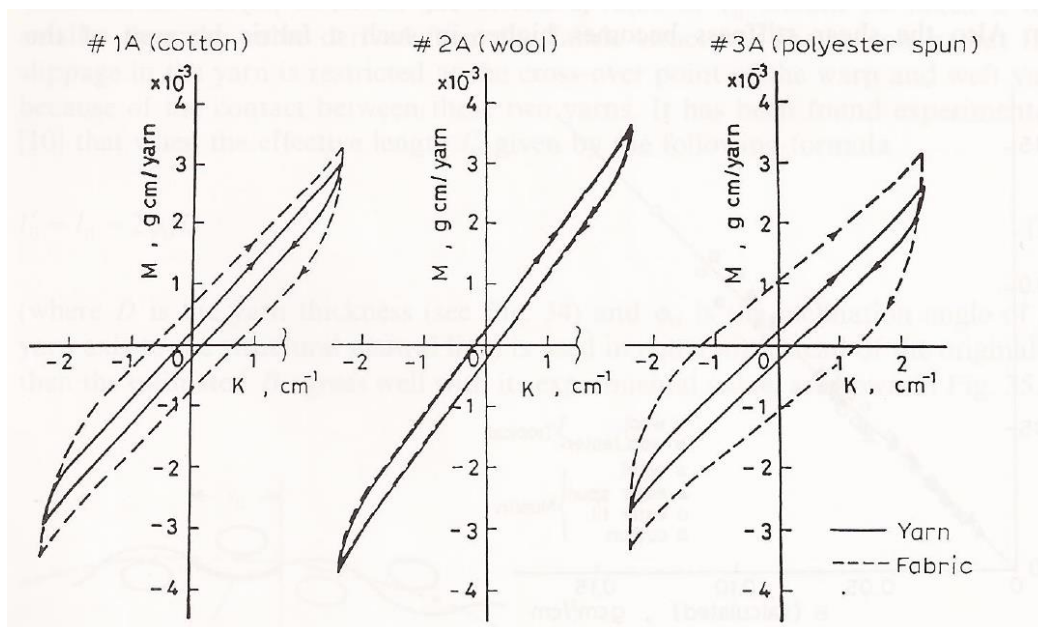
Sueo Kawabata professzor és munkatársai a textíliák „fogási” tulajdonságainak objektív meghatározására kifejlesztették a Kawabata Kelmeelemző rendszert (KES). A rendszer négy különböző berendezésből áll, amelyekkel húzó és nyíró (KES-FB1), hajlító (KES-FB2) és nyomó (KES-FB3) vizsgálatokat végeznek, valamint meghatározzák a kelme felületi tulajdonságait (KES-FB4) is. Minden mérés roncsolásmentes, ugyanazt a 200 mm x 200 mm-es próbadarabot vizsgálja minden egység. A mérés végeredménye a textíliát jellemző 16 paraméter [13].

A Kawabata Kelmeelemző Rendszer hajlítóvizsgáló egységét mutatja a 12. ábra. A hajlítóvizsgálónál a gép a mintát úgy fogja be, hogy 10 mm szabadon marad. Ezt egy körív mentén tisztán hajlítja, aminek következtében a görbület lineárisan változik. Az egyik befogón elhelyezett nyomatékmérő cella méri a hajlítónyomatékot [1]. A hajlítást mindkét irányban elvégzik, a minta szín és fonákoldalán egyaránt.



12. ábra KES-FB2, a hajlítóvizsgálatot végző berendezés elvi vázlata (1. acélhuzal, 2. nyomatékmérő cella, 3. mintadarab, 4. mozgó befogópofa, 5. áttétel, 6. hajtás, 7. görbületmérő cella) [13]

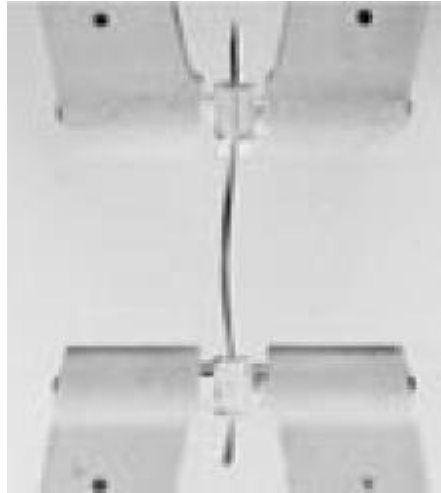
A felvett diagramból (13. ábra) a számítógép kiértékeli a B hajlítómerevséget és a 2HM hajlítási histerézis magasságot. Kawabata a kiértékeléshez a Grosberg modellt használta [14].



13. ábra KES-FB-vel végzett hajlításmérés diagramjai pamut (cotton), gyapjú (wool) és sodrott poliészter mintákra [13]

2.3.2. Szakítógépes kihajlásmérés

Kocik és munkatársai [15] a hajlítómerevséget úgy vizsgálták, hogy szakítógépen a szövetmintákat összenyomva mérték a kihajlásnál fellépő kritikus erőt.

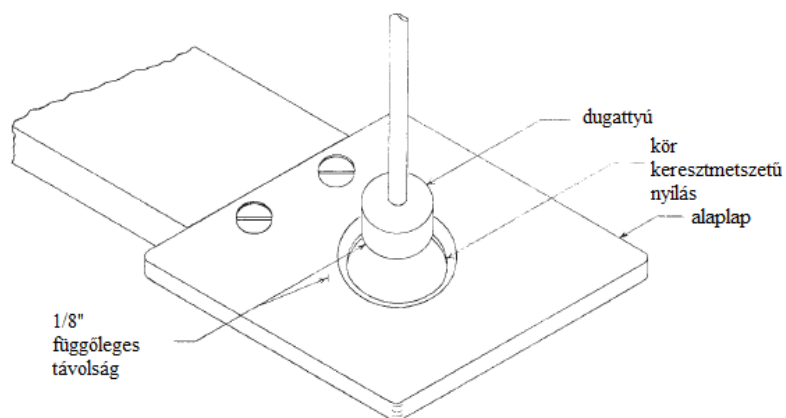


14. ábra Kocik féle szakítógépes kihajlásmérés közben a kihajlás pillanatában készített felvétel [15]

A hajlítási merevséget a kihajlás pillanatában fellépő erőből és görbületből határozzák meg, azzal a feltételezéssel, hogy a maximális erőnél történik a minta kihajlása. A kihajlás pillanatában rögzített alakból (14. ábra) képfeldolgozással határozzák meg a görbületet. Az így meghatározott hajlítómerevségek és a FAST (Fabric Assurance by Simple Testing) rendszer hajlítóvizsgálati egységével, azaz Flexometerrel meghatározott hajlítómerevségek lineáris korrelációt mutatnak. A szerzők cikkükben megemlítik, hogy a módszerükkel további vizsgálatokat kell végezni, pl. merevebb minták esetén.

2.3.3. Körkörös hajlító eljárás

Az ASTM D 4032 – 94 szabványban szereplő körkörös hajlító eljárást (Circular Bend Procedure) textilszállítmányok átvételi vizsgálatára használják. A módszer lényege, hogy félbehajtott téglalap alakú mintákat, a látható 1/2" átmérőjű gyűrűn átpréselnek (15. ábra) és közben mérik az átpréseléshez szükséges erőt, azaz a kelme merevségét.



15. ábra A Körkörös Hajlító Eljárás elvi vázlata és berendezése [16]

Ez a berendezés és a módszer ugyan nagyon egyszerű, viszont csak összehasonlításra alkalmas információt ad a hajlítómerevségről.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Ebben a fejezetben bemutatom a vizsgált alapanyagokat, az alkalmazott berendezéseket és mérési módszereket.

3.1. Felhasznált alapanyagok

A vizsgálatokat három különböző területi sűrűségű, vászonkötésű poliészter alapszövetű, PVC-vel bevont ponyva anyagon végeztem (16. ábra).



16. ábra A vizsgált ponyvák

A mintákon a bevonat területi sűrűsége is különböző. Mindhárom minta azonos gyártótól, a SIOEN Industries-től származik. A jó megkülönböztethetőség érdekében különböző színű mintákat választottam, és ezeket a színeket használom a dolgozatban a minták jelölésére (FEHÉR, SZÜRKE, BÉZS). A minták tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza.

	FEHÉR	SZÜRKE	BÉZS
Gyártó jelölése	B6000	B7119	C2357
Szálfínomság [dtex]	1100	1100	280
Területi sűrűség [g/m ²]	900	630	350
Alapszövet területi sűrűség [g/m ²]	260	160	85
Bevonat területi sűrűség [g/m ²]	640	470	265

1. Táblázat A vizsgált ponyvák névleges tulajdonságai

3.2. Alkalmazott berendezések és vizsgálati módszerek

A hajlító jellemzők meghatározásához három berendezést használtam. Az első a Sylvie 3D Bending Tester, amellyel a deformált próbasávok alakjának elemzéséből, mechanikai modell segítségével számíthatók a hajlító jellemzők. Második a Flexometer, amelynek eredményeit a Sylvie 3D Bending Tester validációjára használtam. A harmadik méréshez szakítógépet használtam. A ponyvák alapszövetének a vizsgálatához optikai mikroszkópot használtam.

3.2.1. Optikai mikroszkóp

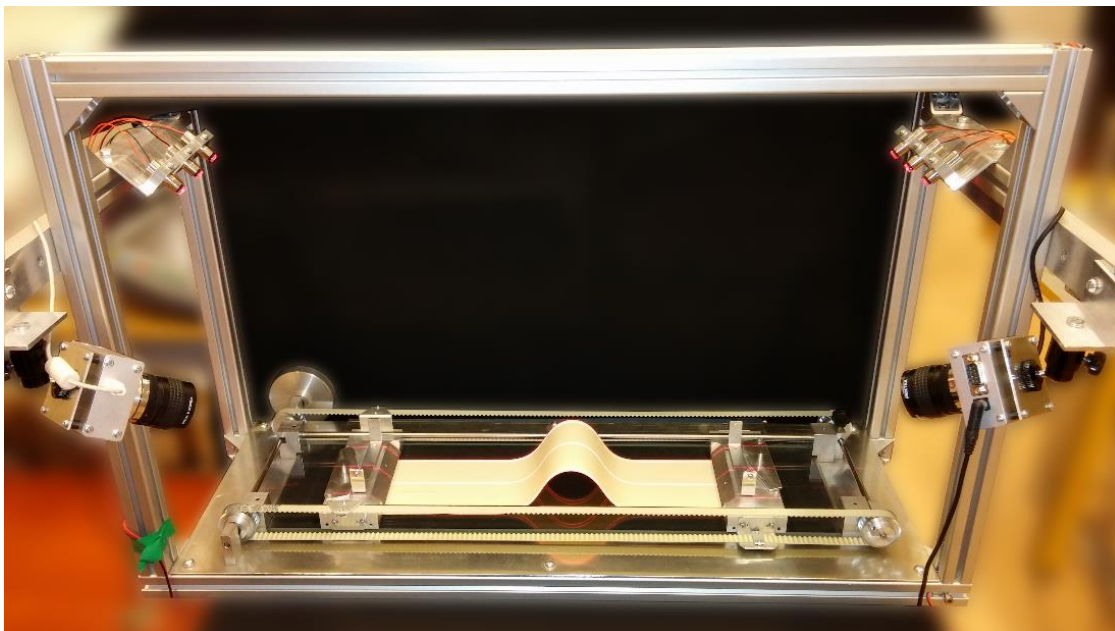
A kötésminta és szálmínőség megállapításához Olympus BX 51M típusú optikai mikroszkópot (17. ábra) használtam.



17. ábra Olympus BX 51M típusú optikai mikroszkóp [19]

3.2.2. Sylvie 3D Bending Tester

A Sylvie 3D Bending Tester a Polimertechnika Tanszék és MOGI Tanszék közös fejlesztése. A berendezés (18. ábra) hat darab vonallézer segítségével, két oldalról 3-3 lézervonalat vetít a befogott, harang alakban deformált próbasávra, amelyről két fényképezőgép felvételt készít. Az elkészített fényképekről a berendezéshez tartozó képelemző szoftver a pontok koordinátáit meghatározza.



18. ábra A Sylvie 3D Bending Tester

A befogók összetolásával kialakuló felgyűrődés bizonyos esetekben kitakarhatja a próbasáv és a lézervonalak egy részét „vakfoltot” létrehozva, ezért a lézervonalakat két oldalról kell vetíteni és a fényképeket is két oldalról szükséges elkészíteni.

A berendezéshez készített képelemző szoftver a két fényképezőgép felvételéről a lézervonalak pontjainak koordinátáit meghatározza. Ehhez kalibrálni szükséges a képfeldolgozó programot. A kalibráló idom egy 10 cm x 10 cm –es fém négyzet. Annak érdekében, hogy a fényképeken megfelelően kontrasztosak legyenek a lézervonalak, a mérést sötét szobában kell elvégezni. Ez különösen fontos a kalibráció pontos elvégzéséhez. A mérésnél lehetőség szerint a világos színű mintákat kell előnyben részesíteni.

Kalibráció és képfeldolgozás

Mivel a vonallézerek által létrehozott három párhuzamos lézervonal más síkban van, mint a felvételeket készítő fényképezőgépek, ezért a lézervonalak koordinátáinak meghatározásához képfeldolgozás szükséges. A C# nyelven írt képfeldolgozó programot konzulensem, a Mechatronika Optika és Gépészeti Informatika Tanszék oktatója, Dr. Tamás Péter készítette.

A síkból-síkba történő transzformáció kölcsönösen egyértelmű hozzárendelés. A tárgy és a kép közötti kapcsolat homogén koordinátákat alkalmazva egy mátrixszal való szorzással felírható. A tárgysíkon lévő P pont Descartes-féle koordinátáit jelöli az x és y , a P pont homogén koordinátáit pedig az x_h , y_h , z_h . A P pont képsíkon lévő

P_k képezének homogén koordinátáit jelölje x_k, y_k, z_k , ahol $z_k=1$, és ennek megfelelően Descartes-féle koordinátáit x_k és y_k (8):

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \bar{P}_h = \begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} \text{ és } \bar{P}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \end{bmatrix}, \bar{P}_{hk} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} \quad (8)$$

, ahol $z_k = 1$.

A P_k pont ismert homogén koordinátáit az M mátrixszal szorozva megkapjuk a tárgysík pontjainak keresett homogén koordinátáit (9):

$$\bar{P}_h = M \cdot \bar{P}_k \quad (9)$$

A transzformációt leíró 3×3 -as M mátrix kilenc eleméből a jobb alsó elemet 1-nek választjuk. A többi elem jelölése m_i ($i=1, \dots, 8$).

A mátrixszal való szorzást elvégezve a (10) összefüggést kapjuk:

$$\begin{bmatrix} x_h \\ y_h \\ z_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ m_7 & m_8 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 x_k + m_2 y_k + m_3 z_k \\ m_4 x_k + m_5 y_k + m_6 z_k \\ m_7 x_k + m_8 y_k + z_k \end{bmatrix} \quad (10)$$

Ezeket a homogén koordinátákat kell visszaszámolni Descartes-féle koordinátákra, úgy, hogy $z_k=1$.

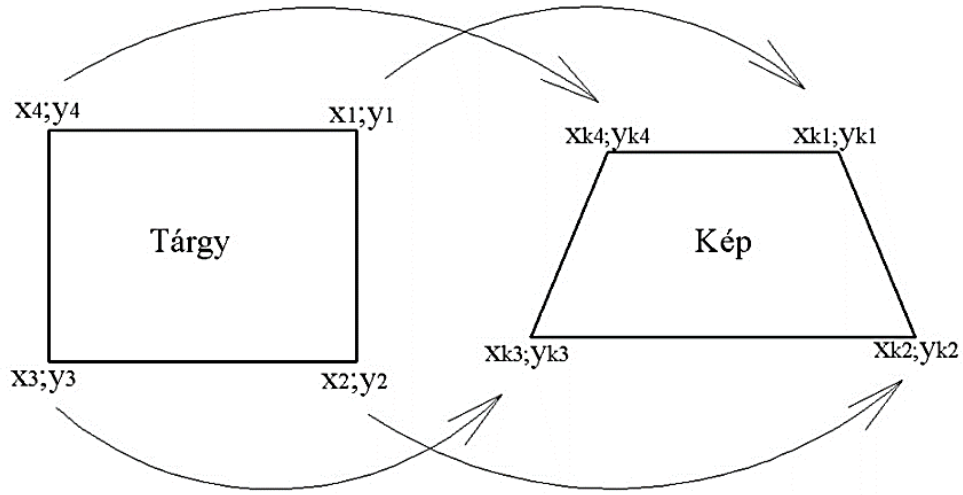
Az x koordináta (11):

$$x = \frac{x_h}{z_h} = \frac{m_1 x_k + m_2 y_k + m_3}{m_7 x_k + m_8 y_k + 1} \quad (11)$$

Az y koordináta (12):

$$y = \frac{y_h}{z_h} = \frac{m_4 x_k + m_5 y_k + m_6}{m_7 x_k + m_8 y_k + 1} \quad (12)$$

A transzformációs mátrix ismeretlen m_i elemeit a kalibráció alapján kell meghatározni (19. ábra). A kalibráláshoz egy $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ keresztmetszetű elemet használunk, amelynek a sarokpontjaival definiáljuk a transzformációs mátrix koordinátáit.



19. ábra A lineáris perspektivikus transzformáció

A (11) és (12) egyenleteket a nevezővel végig szorozva és rendezve a (13) és (14) összefüggés adódik.

$$x = x_k m_1 + y_k m_2 + m_3 + 0 \cdot m_5 + 0 \cdot m_6 - x \cdot x_k m_7 - x \cdot y_k m_8 \quad (13)$$

$$y = 0 \cdot m_1 + 0 \cdot m_2 + 0 \cdot m_3 + x_k m_4 + y_k m_5 + m_6 - y \cdot x_k m_7 - y \cdot y_k m_8 \quad (14)$$

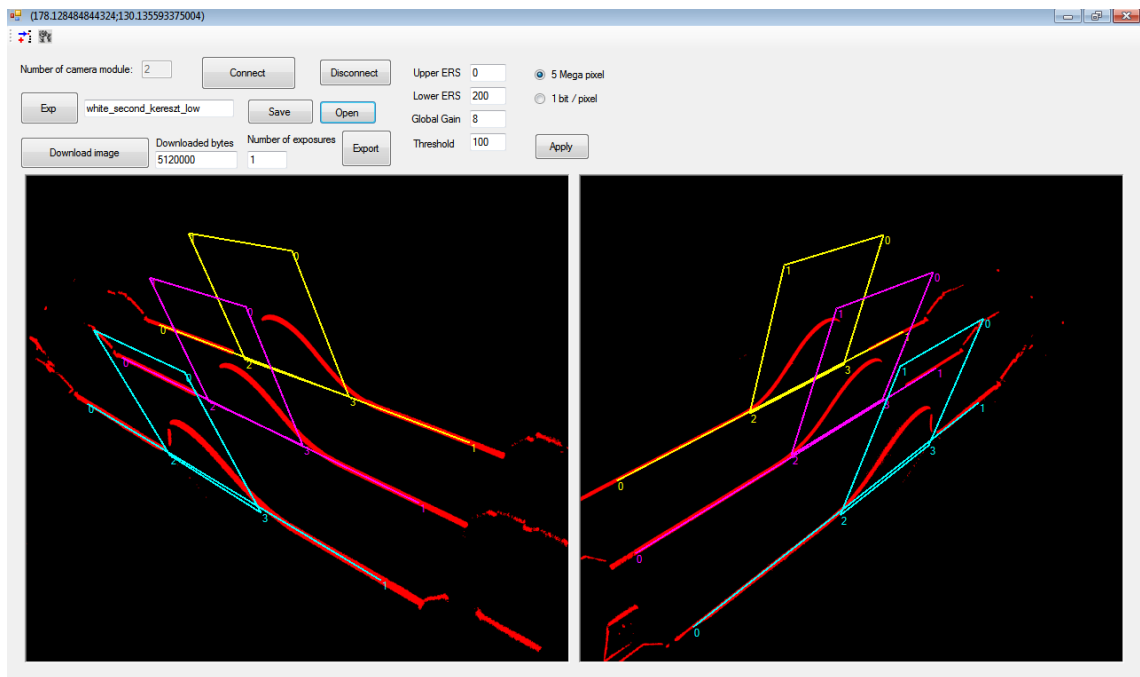
A (10) összefüggésbe helyettesítve (13)-at és (14)-et mátrixos alakú, lineáris egyenletrendszer írható fel (15):

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{k1} & y_{k1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 x_{k1} & -x_1 y_{k1} \\ 0 & 0 & 0 & x_{k1} & y_{k1} & 1 & -y_1 x_{k1} & -y_1 y_{k1} \\ x_{k2} & y_{k2} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 x_{k2} & -x_2 y_{k2} \\ 0 & 0 & 0 & x_{k2} & y_{k2} & 1 & -y_2 x_{k2} & -y_2 y_{k2} \\ x_{k3} & y_{k3} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3 x_{k3} & -x_3 y_{k3} \\ 0 & 0 & 0 & x_{k3} & y_{k3} & 1 & -y_3 x_{k3} & -y_3 y_{k3} \\ x_{k4} & y_{k4} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_4 x_{k4} & -x_4 y_{k4} \\ 0 & 0 & 0 & x_{k4} & y_{k4} & 1 & -y_4 x_{k4} & -y_4 y_{k4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \\ m_6 \\ m_7 \\ m_8 \end{bmatrix} \quad (15)$$

A lineáris egyenletrendszer megoldása az M mátrix m_i elemei.

A (4.57) lineáris egyenletrendszer megoldásával megkapjuk az $\underline{M}$ mátrix m_i ($i=1,\dots,8$) elemeit. Az eredményeket helyettesítve a (13) és (14) egyenletekbe a képpontok képsíkbeli Descartes-féle koordinátáiból közvetlenül megkapjuk a tárgypontok tárgysíkbeli Descartes-féle koordinátáit.

A kalibrációt, vagyis a sarokpontok kiválasztását a fényképeken (20. ábra), mindhárom lézervonal esetén, mindkét képen el kell végezni.



20. ábra A képfeldolgozó program grafikus interfésze és a felgyűrődést követő lézervonalakról készült felvételek

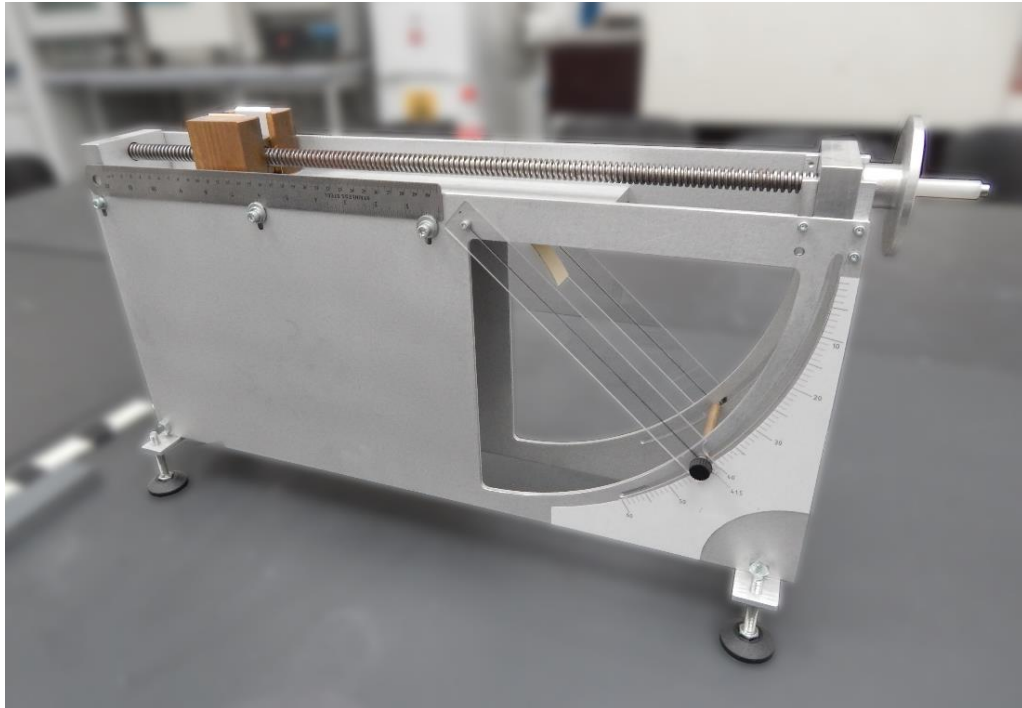
A képfeldolgozás jelenleg egy lézervonal koordinátáit képes exportálni.

A mérés lépései a következők:

1. A minta feszültségmentes rögzítése a befogókkal.
2. A befogási hossz megrövidítésével létrehozuk a kelme harang alakú felgyűrődését.
3. Fényképfelvétel készítése a szoftverrel.
4. A berendezés képfeldolgozó szoftvere segítségével exportáljuk a kelmesávra vetített lézervonalakat alkotó pontok koordinátáit.

3.2.3. PT Flexometer

A PT Flexometert (továbbiakban PT Flexometer) (21. ábra) szakdolgozata keretében a Sörös Gábor készítette Polimertechnika Tanszéken [17].



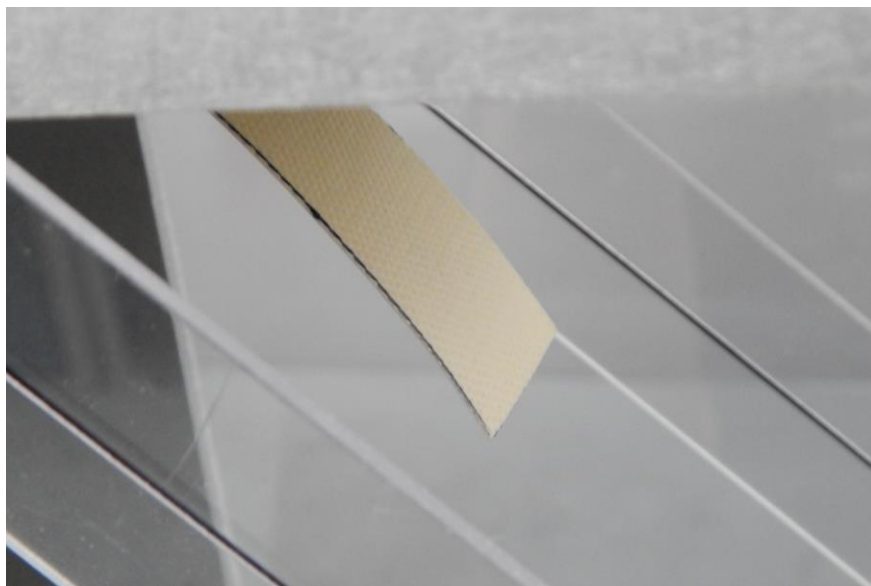
21. A Flexometer mérés közben

A konstrukció előnyei a TKI típusú Flexometerhez képest:

- a próbasáv Teflonnal bevont tárgyasztalon csúszik, ami megakadályozza a minta letapadását,
- a mintát leszorító idom (, amelyet egy kézikerékkel meghajtott orsóval lehet mozgatni) alja gumiborítású, hogy előtolás közben megfelelő legyen a tapadás a minta és a leszorító idom között,
- nagyobb méréstartomány a merevebb kelmék vizsgálatára.

Az MSZ 101/12-64 szabványnak megfelelő mérés menete a következő:

1. A Flexometer vízszintezése.
2. A mintát leszorító idom kiemelése.
3. A próbasávot a berendezés asztalán úgy kell elhelyezni, hogy a minta élei és az asztal szélei párhuzamosak legyenek, valamint a vége is egybeessen az asztal végével.
4. A vontató mechanizmussal addig toljuk előre a próbasávot, amíg annak széle éppen érinti a Flexometer 41,5°-os virtuális lejtőjét.
5. Ezután leolvassuk a mércén az előtolt hosszat.
6. A mérést a próbasáv másik végén is elvégezzük.



22. ábra A próbatest éle éppen érinti a virtuális átmérővonalat

A szabvány előírása szerint, ahogy a Gyimesi könyvben [2] is szerepel, azt a lehajlási hosszat mérik, amely éppen érinti a 41,5°-os lejtőt.

A Flexometeres mérések kiértékelésénél a következő egyszerűsítést alkalmazzák. Amennyiben az (5) Peirce-féle hajlítási egyenletbe a lehajlás szögét $\theta = 41,5^\circ - 43^\circ$ helyettesítjük, a hajlítóhossz képlete jelentősen leegyszerűsödik (16) [2]:

$$\begin{aligned}
 C[m] &\equiv \sqrt[3]{\frac{l^3 * \cos(0,5 * \theta)}{8 * tg \theta}} = \sqrt[3]{\frac{l^3 * \cos(0,5 * 41,5^\circ)}{8 * tg(41,5^\circ)}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{l^3}{8} * 1,056} \cong \frac{l}{2}
 \end{aligned} \tag{16}$$

A $\theta = 41.5^\circ - 43^\circ$ szögű lejtő használatával tehát a Flexometeres mérés kiértékelése egyszerűbb és gyorsabb, ami a szabványosított méréseknél alapvető fontosságú.

A hajlítási hossz (17):

$$C[m] = \frac{l}{2} \quad (17)$$

ahol l [m] a minta túlnyúló, lehajlott hossza.

A hajlítónyomaték (18):

$$M[Nm] = G \cdot C^3 \quad (18)$$

ahol G [N/m²] a minta egységnyi területre eső súlya és C [m] a hajlítási hossz.

A rugalmassági modulus (19):

$$E[Pa] = \frac{M \cdot b}{I} = \frac{M \cdot b}{\frac{b \cdot v^3}{12}} = \frac{12 \cdot M}{v^3} \quad (19)$$

ahol b [m] a próbasáv szélessége, I [m⁴] a keresztmetszet másodrendű nyomatéka és v [m] a próbasáv vastagsága.

A méréshez 200 [mm] hosszú és 20 [mm] széles próbasávokat vágtam ki, az MSZ 101/12-64 számú magyar szabvány [18] szerint. Minden ponyvatípusból három kivágási irányt vizsgáltam (láncirány, vetülékirány és 45°-os átlós), típusonként 3-3 darabot.

3.2.4. Zwick-Z250 Szakítógépet

A szakítógépes hajlítóvizsgálathoz a Polimertechnika Tanszék laboratóriumában található Zwick-Z250 típusú szakítógépet (23. ábra) használtam, 500 N-os erőmérő cellával. Mivel az erőmérő cella 100N-al előfeszített, ezért kis erők mérése esetén, a mérési tartomány alján is pontosan használható.



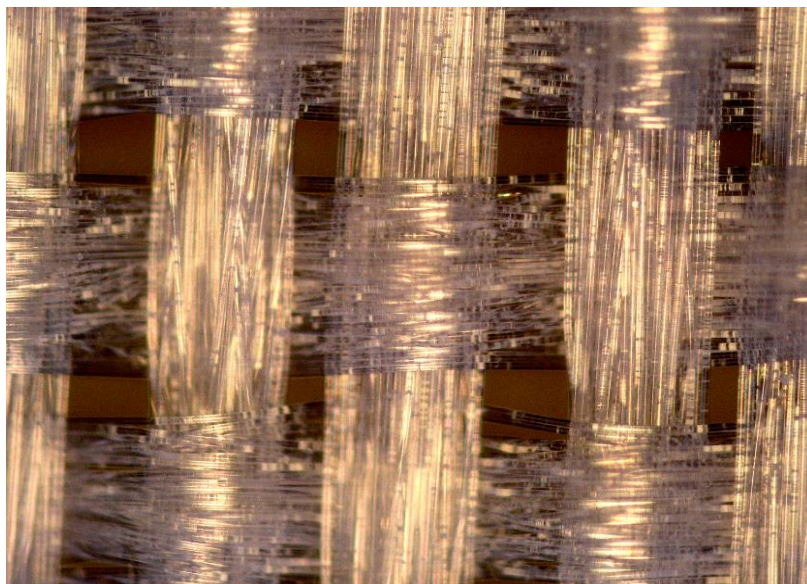
23. ábra Zwick-Z250 típusú szakítógép [19]

4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Ebben a fejezetben bemutatom a Sylvie 3D Bending Tester optikai hajlításmérő berendezés kiértékelő módszerét, a mérés végeselemes analízisét és a mérési eredményeket. Ismertetem a Flexometerrel meghatározott hajlító jellemzőket, a szakítógépes kihajlásvizsgálatot és a mérés végeselemes analízisének eredményét, amellyel a Sylvie 3D Bending Testerrel mért hajlító jellemzőket ellenőriztem. A mérési eredmények értékeléséhez szükség volt a minták optikai mikroszkópos vizsgálatára is.

4.1. Az alapszövet vizsgálata

Az optikai mikroszkópos vizsgálatot megelőzően a PVC bevonatot tetrahidrofurán alkalmazásával 24 órás áztatással eltávolítottam a mintákról. A BÉZS minta mikroszkópi felvételét mutatja 5x-ös nagyításban a 24. ábra.



24. ábra A BÉZS minta optikai mikroszkópos képe 5x-ös nagyításban

A bevonat nélküli minták vizsgálatával meghatároztam a fonalsűrűséget, a fonalminőséget, a kötésmintát és a minták átlagos vastagságát, amelyeket a 2. táblázatban foglaltam össze. Megállapítottam, hogy minden minta vászonkötésű alapszövettel rendelkezik és a fonalak folytonos elemi szálakból épülnek fel. A fonalsűrűségek a FEHÉR minta esetében megegyeznek lánc- és vetülékirányban. Azonban a SZÜRKE és BÉZS minták esetében vetülékirányban kevesebb fonal van, mint láncirányban.

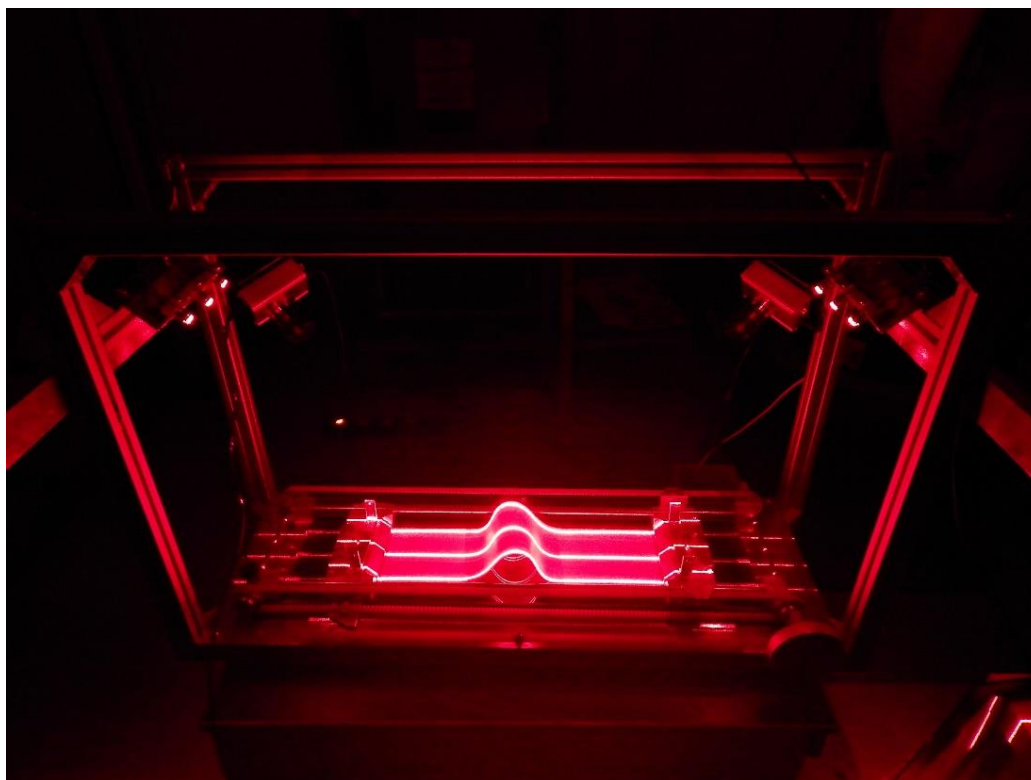
	FEHÉR	SZÜRKE	BÉZS
Kötésminta	vászon	vászon	vászon
Fonalminőség	multifilament	multifilament	multifilament
Fonalsűrűség láncirányban [db/100 mm]	62	72	152
Fonalsűrűség vetülékirányban [db/100 mm]	62	62	126
Átlagos vastagság [mm]	0,65	0,47	0,31

2. táblázat Az alapszövet tulajdonságai

4.2. Sylvie 3D Bending Tester

A Sylvie 3D Bending Tester (25. ábra) a 100 mm széles és 500 mm hosszú, harang alakban meghajlított és a vonallézerekkel megvilágított próbasávról a két fényképezőgép segítségével felvételt készít, amelyekből az előzetesen kalibrált képfeldolgozó szoftver meghatározza a görbült alak koordinátáit.

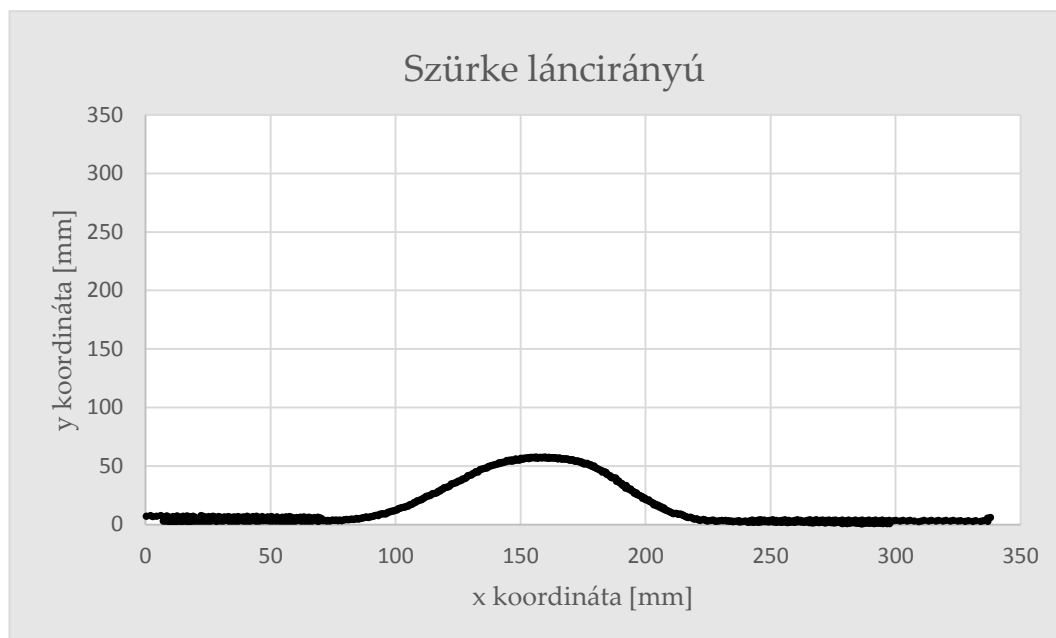
A mérést a három különböző típusú ponyvából láncirányban, vetülékirányban és átlósan kivágott, irányonként 5-5 db próbasávon végeztem el.



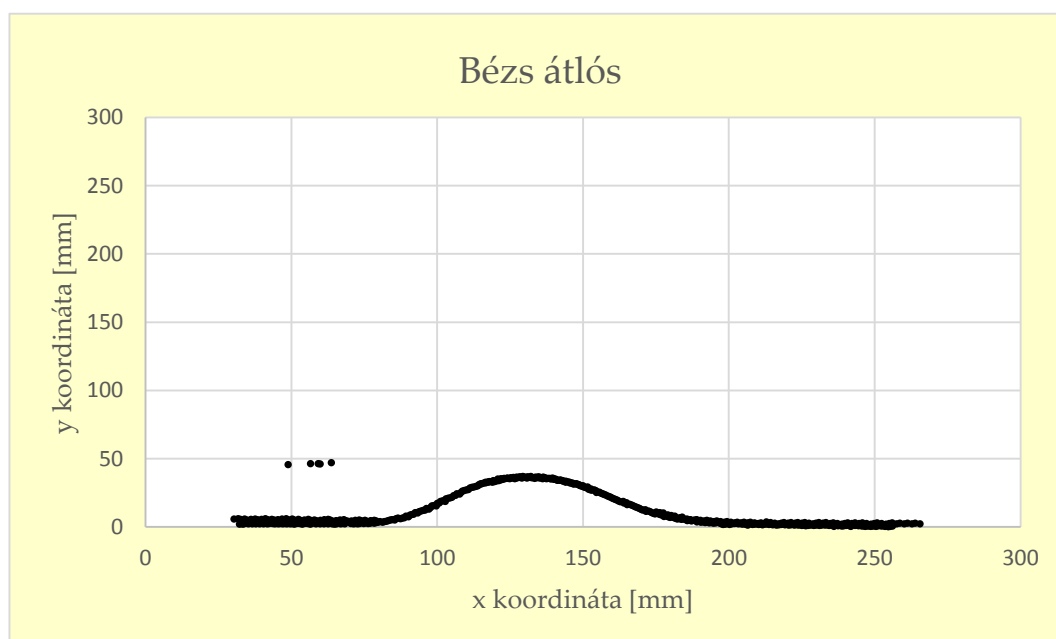
25. ábra A Sylvie 3D Bending Tester mérés közben

4.2.1. A mérési pontok feldolgozása

A képelemző program által kinyert nyers mérési pontokat mutatja 28. ábra - 28. ábra.

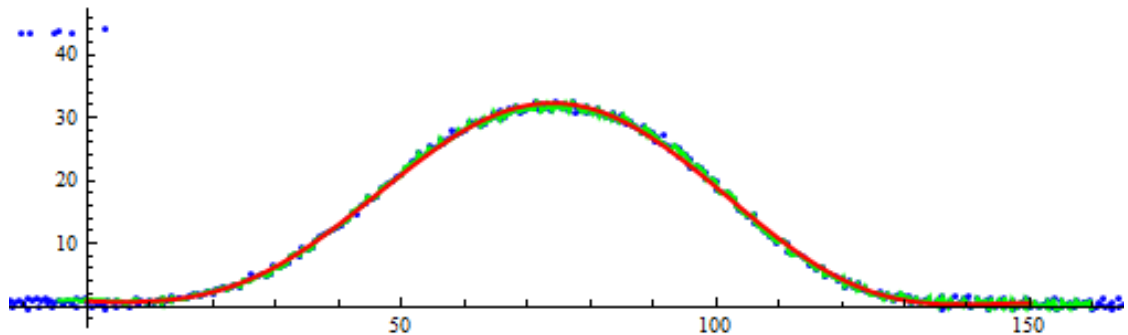


26. ábra SZÜRKE láncirányú minta tipikus mérési görbéje Sylvie 3D Bending Testerrel



27. ábra BÉZS átlós minta tipikus mérési görbéje Sylvie 3D Bending Testerrel

A nyers mérési pontokat szűrni szükséges, hogy az esetleges rossz mérési pontok a görbeillesztést ne torzítsák. Ilyen kiugró mérési pontot okozhat pl. a berendezés fém részein megcsillanó lézerfény (28. ábra).



28. ábra A pontok szűrés (kék- eredeti mérési pontok, zöld – szűrt pontok, piros – a szűrt pontokra illesztett nyolcadfokú görbe)

A mérési pontok szűrését úgy kell elvégezni, hogy a felgyűrődés pontjaiból ne, vagy lehetőleg a legkevesebb vesszen el. Mivel minden mérésnél megközelítőleg 560 db pont kerül kiexportálásra, a kiértékelés időszükségletének minimalizálása érdekében egy automatikus válogatásra van szükség. Ezt úgy oldottam meg, hogy balról jobbra vizsgálom az egymás után következő pontok y koordinátáját és azokat, amelyek távolsága az előző ponthoz képest nagyobb, mint 2 mm, a görbeillesztésnél nem veszem figyelembe.

A görbült alakra, azaz a mérési pontokra nyolcadfokú polinom jól illeszthető [20].

A nyolcadfokú polinom egyenlete (20):

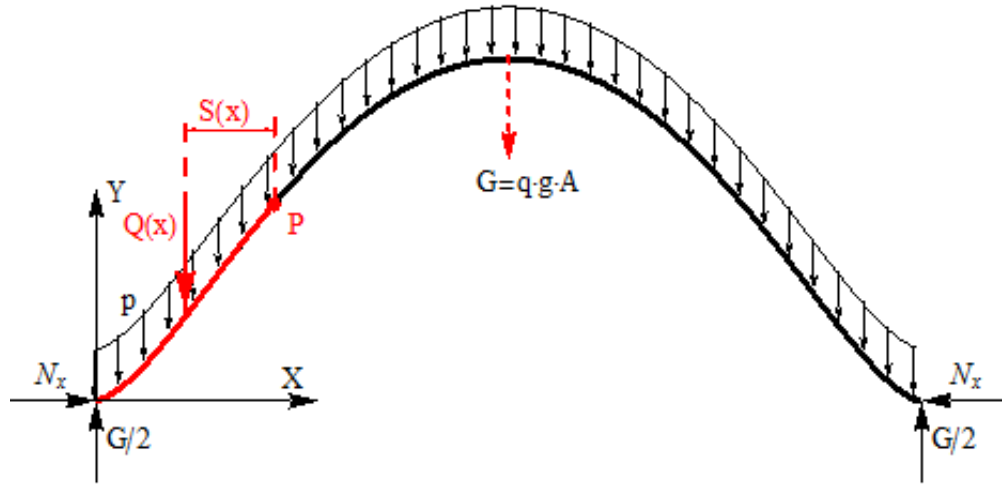
$$y(x) = a_8 \cdot x^8 + a_7 \cdot x^7 + a_6 \cdot x^6 + a_5 \cdot x^5 + a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (20)$$

A görbeillesztés előtt a próbasávnak a mérőberendezés asztalán vízszintesen felfekvő részét, azaz azt a részt, amely az alakváltozásban nem vesz részt, el kell hagyni, hogy a nyolcadfokú görbét rá lehessen illeszteni a harang alakú felgyűrődésre. Továbbá, az alakváltozás jellegéből következően az illesztett görbének olyannak kell lennie, hogy a kezdeti és végpontban a derivált zérus legyen, vagyis az érintő vízszintes legyen ott, ahol a felgyűrődés kezdődik.

Pontok szűrését és a görbeillesztést Wolfram Mathematica 9 programmal végeztem.

4.2.2. Mechanikai modell

A harang alakban meghajlított mintára ható erőket szemlélteti a 29. ábra.



29. ábra A harang alakban meghajlított mintára ható erők

A deformált próbasáv a rá ható, a 26. ábrán vázolt erőrendszer hatására egyensúlyban van. Ennek következtében a statika egyensúlyi egyenletei teljesülnek. A modellünk szempontjából szükséges a hajlítónyomatéki igénybevételi függvény felírása.

A hajlítónyomaték egy tetszőleges pontra (pl. a P pontra, ld. 29. ábra) (21):

$$M_h(x) = N_x \cdot y(x) - \frac{G}{2} \cdot x + Q(x) \cdot S(x) \quad (21)$$

, ahol N_x [N] a horizontális irányban ható erő, G [N] a minta súlya, $Q(x) \cdot S(x)$ a minta súlyából származó nyomaték.

A minta súlya (22):

$$G \text{ [N]} = q \cdot g \cdot A \quad (22)$$

, ahol $q \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$ a területi sűrűség, $g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$ nehézségi gyorsulás és $A \text{ [m}^2\text{]}$ a minta terület.

A vonal mentén megoszló erő (23):

$$p \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] = q \cdot g \cdot b \quad (23)$$

ahol $b \text{ [m]}$ a minta szélessége.

A (21) kifejezésben:

$$S(x) = x - \frac{\int_0^x x \cdot \sqrt{1 + y'^2(u)} du}{\int_0^x \sqrt{1 + y'^2(u)} du} \quad (25)$$

$$Q(x) = p \int_0^x \sqrt{1 + y'^2(u)} du \quad (26)$$

, ahol $p \left[\frac{N}{m} \right]$ a megoszló terhelés, azaz a minta hosszegységre eső súlya, $S(x)$ [m] az elhagyott rész súlypontjának távolsága a tetszőleges P ponttól és $Q(x)$ [N] a súlypontba redukált megoszló erőrendszer.

A rugalmas szál differenciálegyenlete abban az esetben, ha görbület nem hanyagolható el (geometria nemlinearitás):

$$y''(x) = - \frac{M_h(x) \cdot (1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}{I_z \cdot E} \quad (26)$$

, ahol $I_z[m^4] = \frac{b \cdot h^3}{12}$ a keresztmetszet másodrendű nyomatéka, b [m] a próbasáv szélessége, h [m] a próbasáv vastagsága és E [Pa] a modulus.

A (21) egyenletet a (26) egyenletbe helyettesítve és átrendezve kapjuk a kiértékeléshez használt integro-differenciálegyenletet (27):

$$\begin{aligned} f(x) = & D y''(x) + \\ & + \left(N_x y(x) - \frac{1}{2} q g A x \right. \\ & \left. + q g b \int_0^x \sqrt{1 + y'^2(u)} du \left[x - \frac{\int_0^x x \cdot \sqrt{1 + y'^2(u)} du}{\int_0^x \sqrt{1 + y'^2(u)} du} \right] \right) (1 + y'^2)^{\frac{3}{2}} = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

A hajlítási merevség (28):

$$D[Nm^2] = I_z \cdot E \quad (28)$$

Az egyenlet zárt alakban nem oldható meg, azonban a mérési pontok kiértékelése és a görbeillesztés után az $y(x)$ függvény rendelkezésre áll. Ezt behelyettesítve megfelelő számú mérési pontban kiértékelve, az ismeretlen paraméterek meghatározásához szükséges mennyiségű egyenlethez jutunk.

Az (27) egyenletet az összetolt minta magasságának 45 %-nál és 55 %-nál kiszámítva meghatározható a két ismeretlen, a D és az N_x . Az egyenlet numerikus kiértékelését Wolfram Mathematica 9 program segítségével végeztem.

4.2.3. Sylvie 3D Bending Tester-rel meghatározott hajlítómodulus

A Sylvie 3D Bending Tester berendezéssel meghatározott hajlítómodulus és hajlítómerevség értékeket az 3. táblázat tartalmazza.

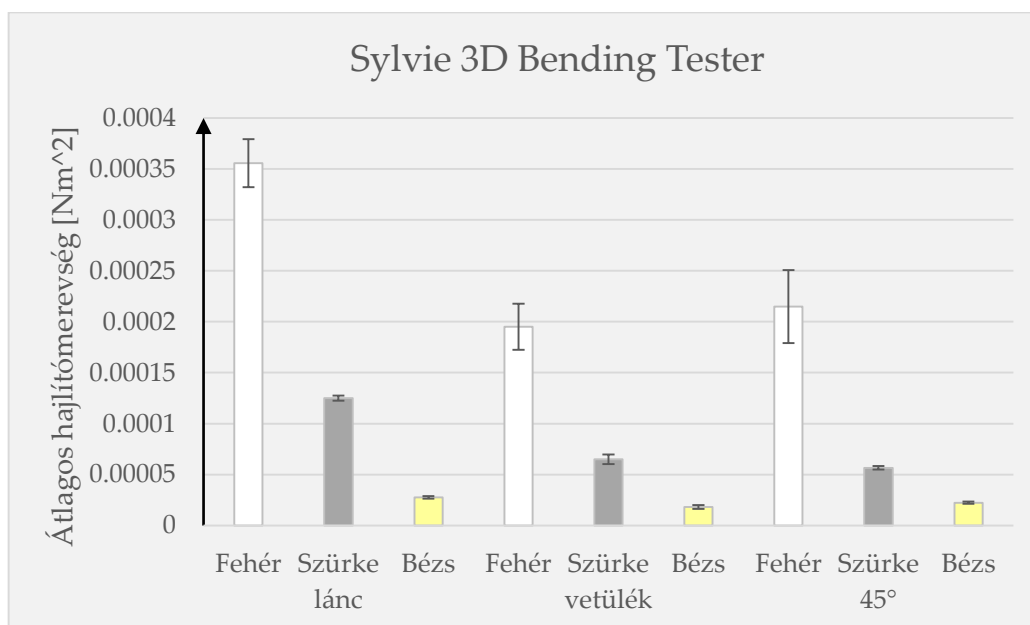
Sylvie 3D Bending Tester				
Kivágási irány	Minta	Hajlítómodulus [MPa]	Hajlítómerevség [Nm ²]	Relatív Szórás [%]
Lánc	FEHÉR	155,4	$3,55 \cdot 10^{-4}$	6,7
	SZÜRKE	144,5	$1,25 \cdot 10^{-4}$	2,1
	BÉZS	111,0	$0,27 \cdot 10^{-4}$	4,2
Vetülék	FEHÉR	85,3	$1,95 \cdot 10^{-4}$	11,6
	SZÜRKE	75,1	$0,65 \cdot 10^{-4}$	7,4
	BÉZS	72,8	$0,18 \cdot 10^{-4}$	10,7
45°	FEHÉR	93,9	$2,14 \cdot 10^{-4}$	16,7
	SZÜRKE	65,4	$0,56 \cdot 10^{-4}$	2,9
	BÉZS	90,2	$0,22 \cdot 10^{-4}$	5,3

3. táblázat A Sylvie 3D Bending Tester-rel meghatározott hajlítómodulus értékek

Oszlopdiagramon ábrázolva a hajlítómerevség értékeket (30. ábra) látható, hogy a FEHÉR minták merevsége minden kivágási irányban a legnagyobb, míg a BÉZS minták a legkisebb merevségűek. Ezek az eredmények a várakozásoknak megfelelőek, mivel a FEHÉR minta vastagsága (lásd. 1. táblázat) több mint kétszerese a BÉZS minta vastagságának, a merevséget pedig jelentős mértékben befolyásolja a minta vastagsága, amely a merevség számításának képletében (20) köbösen szerepel.

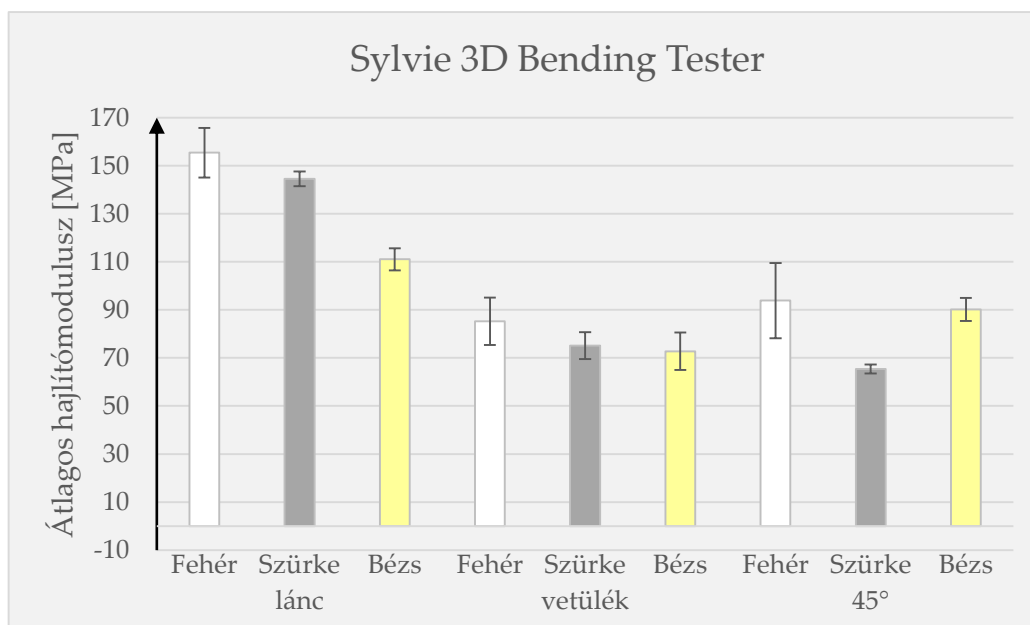
Ha a kivágási irányok szerint vizsgáljuk az eredményeket, akkor megállapítható, hogy minden mintatípus esetében a láncirányban kivágott minták hajlítómerevsége a legnagyobb. Az irányonként különböző tulajdonságok a szerkezet irányítottságának következmény, hiszen a ponyva teherviselő rétege egy orthotróp szövet.

A 45°-ban kivágott minták merevsége hasonló nagyságú a vetülékirányban kivágottakéhoz.



30. ábra A Sylvie 3D Bending Tester-rel mért hajlítómerevség értékek

A hajlítómodulus értékeket oszlopdiagramon ábrázolva a 31. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy a legnagyobb hajlítómodulus minden ponyvatípus esetében a hosszirányban kivágott mintáknál mérhető. Keresztirányban és átlósan nincsen nagy különbség a modulusban, viszont érdekes, hogy a FEHÉR és BÉZS minták esetében az átlós irányúak modulusa kismértékben nagyobb. Az átlósan kivágott minták esetében nyíróhatás is felléphetett, emiatt az eredmények értékelése további vizsgálatokat igényel.



31. ábra A Sylvie 3D Bending Testerrel mért hajlítómodulus értékek

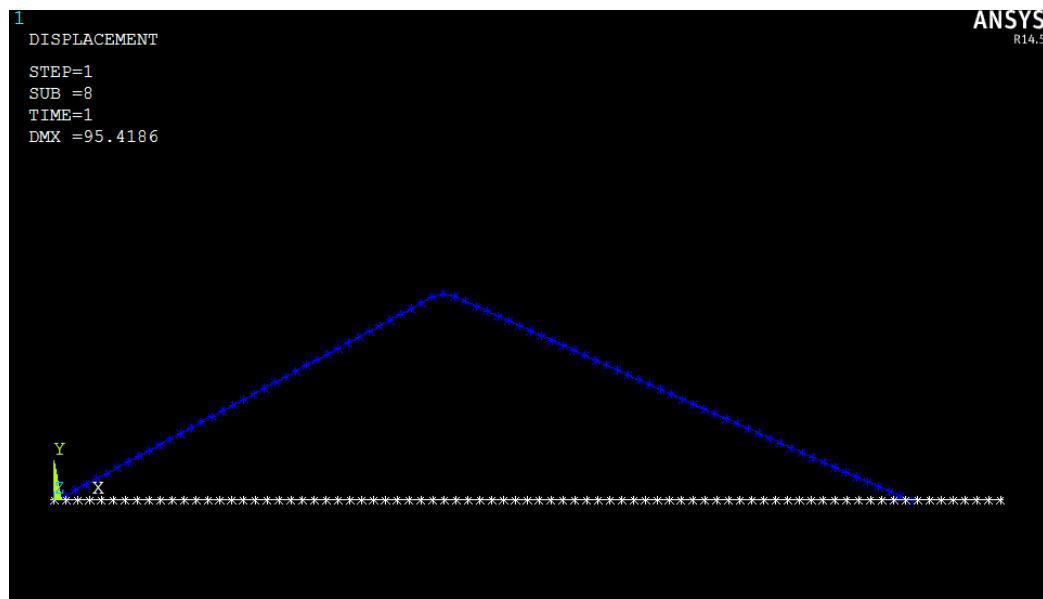
4.2.4. A mérés végeselemes analízise

A vízszintes felületen történő összenyomás numerikus modellezése bonyolult feladat. A kis merevségű próbatest jelentős része felfekszik a mérőberendezés asztalán, és nem vesz részt az alakváltozásban. Ezt a problémát a végeselem modellben, az asztal kontaktfelületként való létrehozásával kell kezelni. A végeselemes analízist ANSYS 14.5 végeselem szoftver segítségével végeztem.

A szoftverben 40 darab BEAM189 elemmel létrehoztam a próbatest modellt és a próbatest alatti, szintén ugyanilyen elemsűrűségű, de nagyságrendekkel merevebb hálót, amely az alátámasztást (a berendezés tárgyasztalát) modellezi. A próbatest csomópontjaiban CONTA175 típusú kontakt elemeket, az alátámasztás csomópontjaiban TARGE169 típusú target elemeket hoztam létre, amelyek biztosítják a csomópont-felület kontakt definiálását. A felületek közötti kapcsolatot az anyagtulajdonságoknál beállítható súrlódási tényezővel vettem figyelembe. A mérés során a mintadarab a befogás miatt z irányban nem mozdulhat el és az x és y tengely körül nem fordul el. Emiatt, a modellt az x-y síkban hoztam létre, a peremfeltételek megadásánál a csomópontok z-irányú elmozdulását és az x és y tengely körüli elfordulását lekötöttem. A próbatest modelljének egyik végére merev befogást, a másik végére a Sylvie 3D Bending Tester mérésnél alkalmazott 40 mm elmozdulást definiáltam.

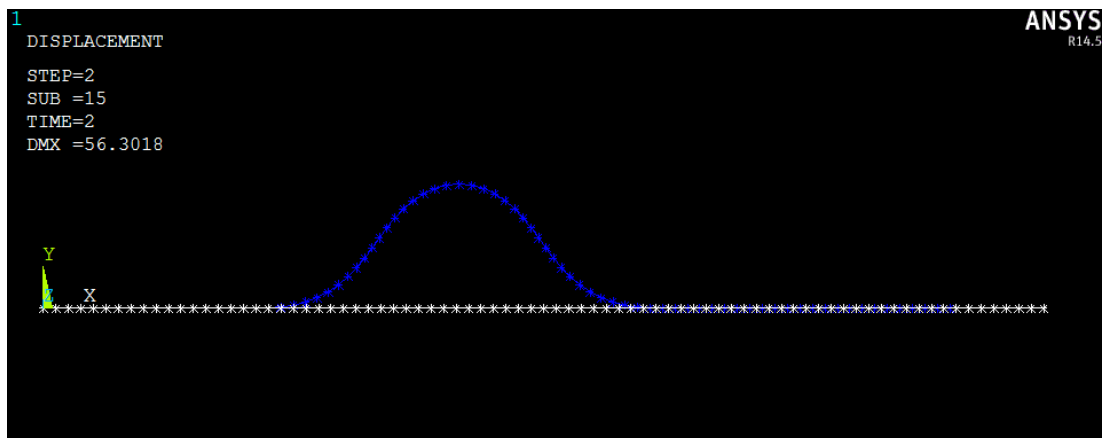
A nagy elmozdulások miatt ebben a lépésben a probléma már nemlineáris, ezért futtatásnál be kell kapcsolni a nagy elmozdulások kezelését (Large Displacement Static) és azt, hogy minden terhelési lépés kiinduló állapota az előző lépés legyen (Calculate Prestress Effects).

Mivel a végeselemes analízis csak terhelési állapotokat képes modellezni, ezért a kihajlás utáni állapot vizsgálatát két terhelési lépésben lehet vizsgálni. Először az előírt 40 mm-es vízszintes összenyomás mellett szükséges a modell középponthoz legközelebb eső csomópontjában egy függőleges erőt, azaz egy zavarást definiálni, amellyel egy tetszőleges kitérített állapot létrehozható. Az első lépésben (32. ábra) kitéríttem a modellt 10N erővel.



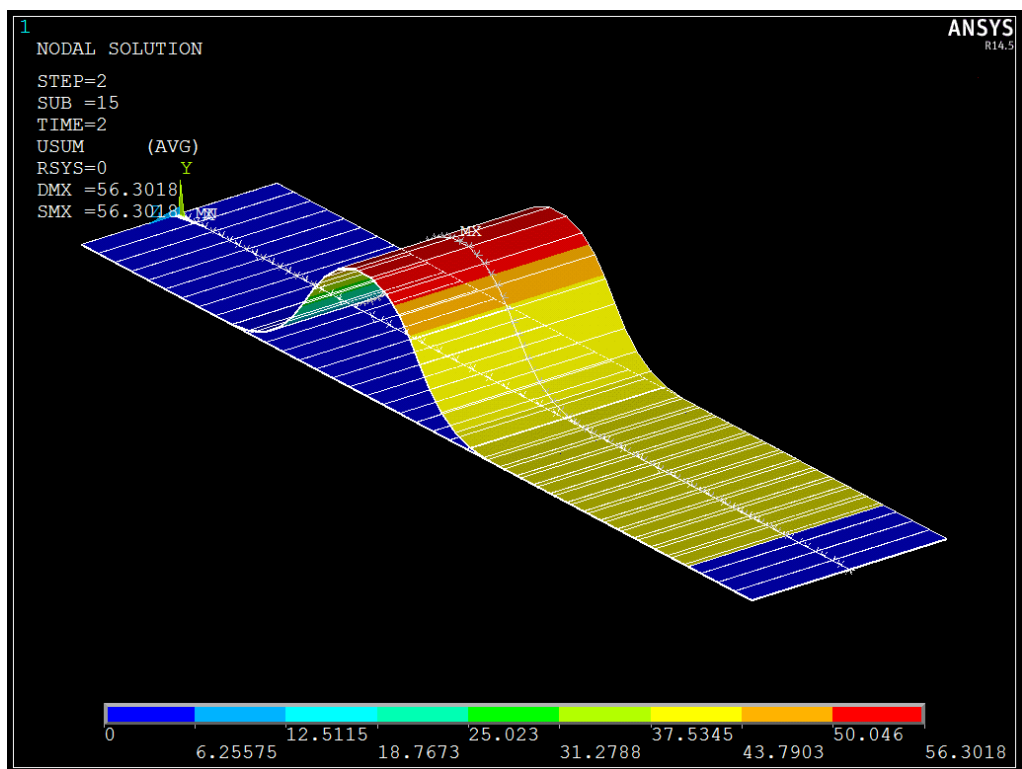
32. ábra Az első terhelési lépés – a próbatest modellje közepén függőlegesen kitérített

A második terhelési lépés (33. ábra) a függőleges erő eltávolításával definiálható, amelyben a kitérített állapot körüli új egyensúlyi helyzet keresése történik.



33. ábra A második terhelési lépés

A végállapotban a modell harang alakú felgyűrődött részének kiterjedését és alakját a modell geometriai paraméterei (vastagság, keresztmetszet) és az anyagjellemzők (sűrűség, rugalmassági modulus) határozzák meg. A modell többi része a mérőberendezés asztalával érintkezve vízszintes helyzetbe kerül. A geometriai méretek megegyeznek a Sylvie 3D Bending Tester mérésnél használt próbatestek méreteivel. Az anyagjellemzőknél felhasznált modulusz a Sylive 3D mérésből számított hajlítómodulus. A kihajlás utáni végállapotot mutatja a 34. ábra.



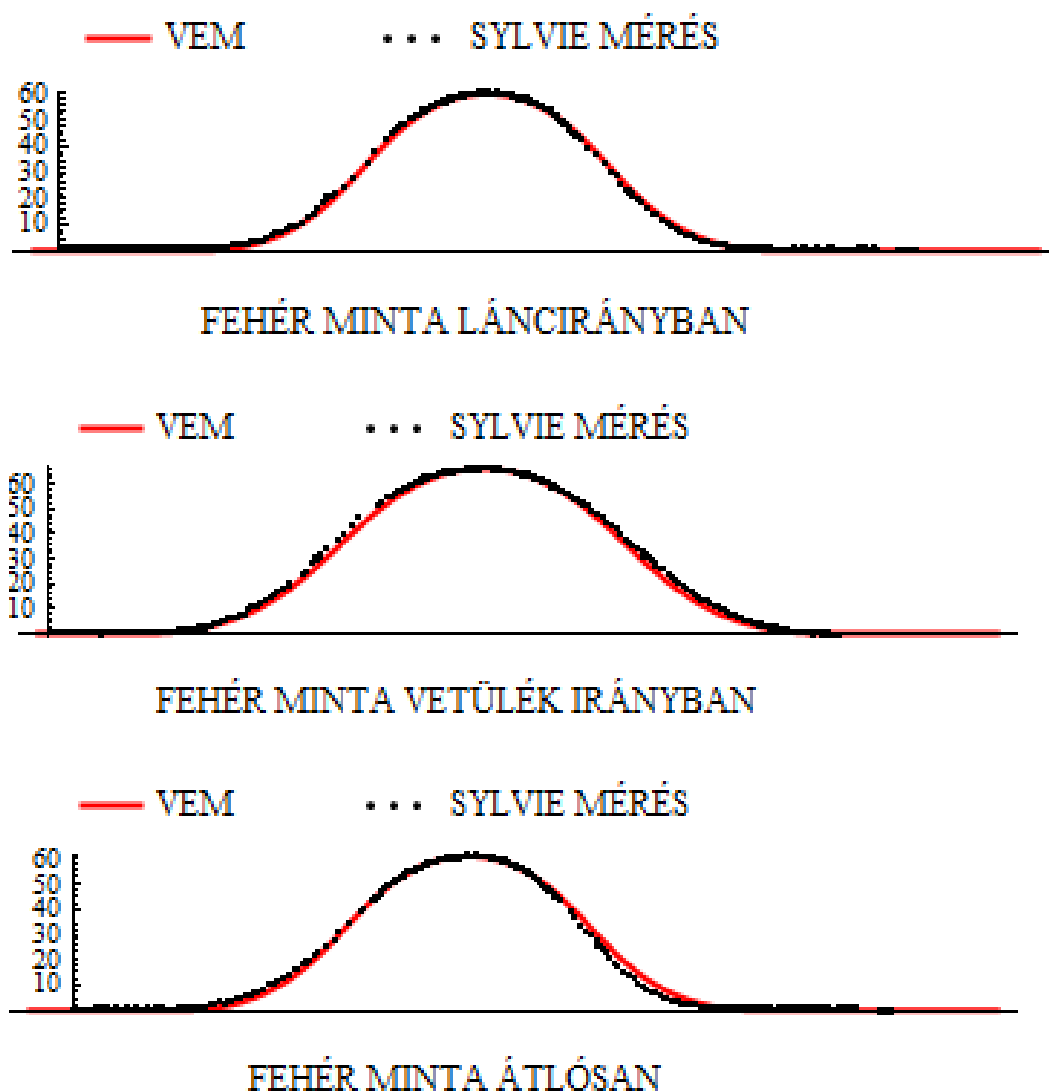
34. ábra A Sylvie 3D Bending Tester mérés végelelemes analízise (SZÜRKE 45° minta)

4.2.5. A végelelemes analízis eredménye

A deformált modell csomópontjainak elmozdulásait a `List > Results > Nodal Solution > DOF Solution > Displacement vector sum` paranccsal kimentettem az ANSYS-ból. Emellett a szükséges deformált alak megjelenítéséhez szükség van a csomópontok kiindulási helyzetét megadó koordinátákra is. Ezeket a koordinátákat szintén a List menüből kell lekérdezni. Az adatok elmentése az elmozdulások menítésével megegyező módon történik. A deformált alak a csomóponti koordináták és az elmozdulásvektor összegzésével áll elő.

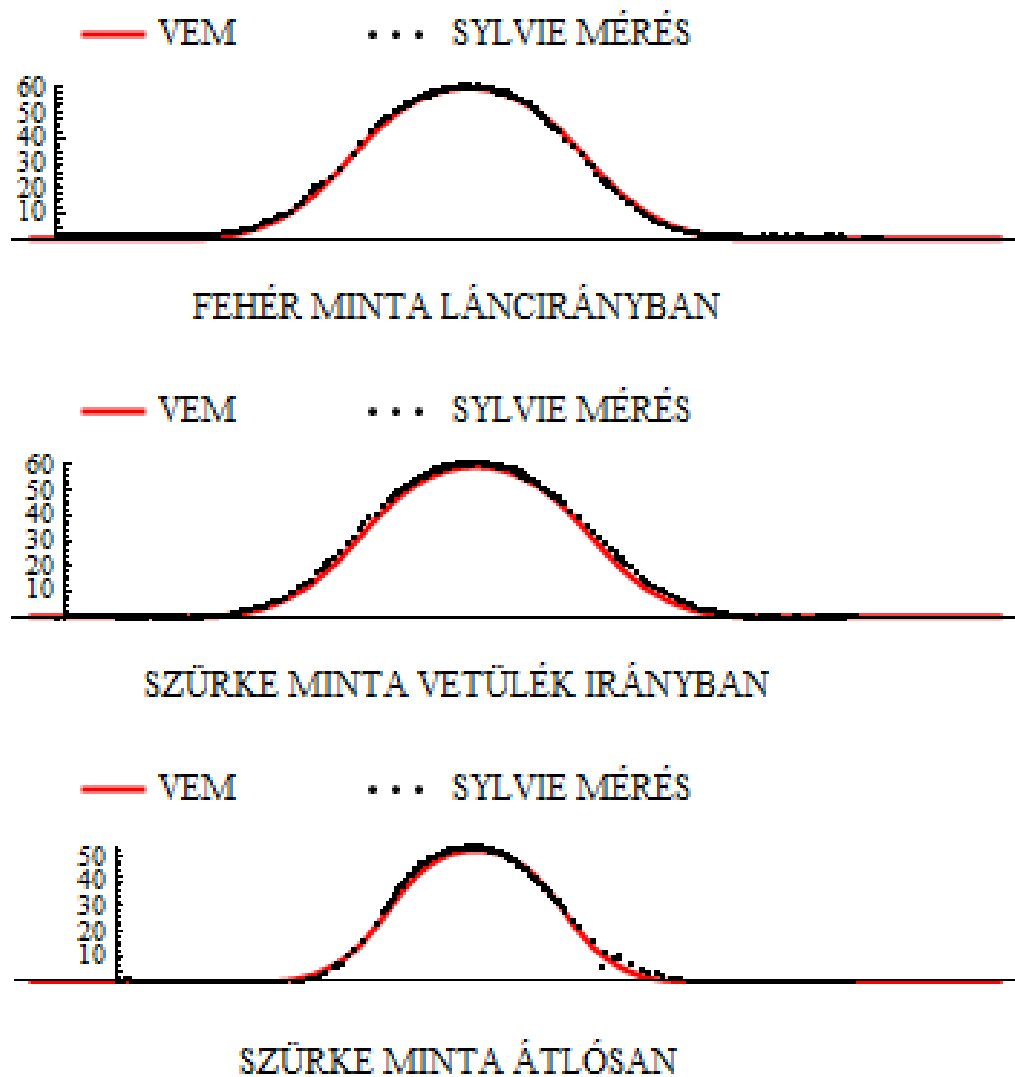
A mérés végelelemes analízisének eredménye jól illeszkedik a Sylvie 3D Bending Tester szorftverével meghatározott mérési pontokra (35. ábra).

Az ábrákon a piros vonal a végelelemes analízis eredményét mutatja, a fekete pontok a Sylvie 3D Bending Tester képfeldolgozó szorftverével meghatározott koordináták. Megfigyelhető, hogy a vetüλέkirányú FEHÉR minta esetében, ahol a Sylvie 3D mérésből származó pontok ritkábbak (feltehetően a pontok szűrésénél egy nagyobb mérési hiba miatt több jó pont elveszett), ott a VEM analízis eredménye kissé eltér a mérési pontoktól.



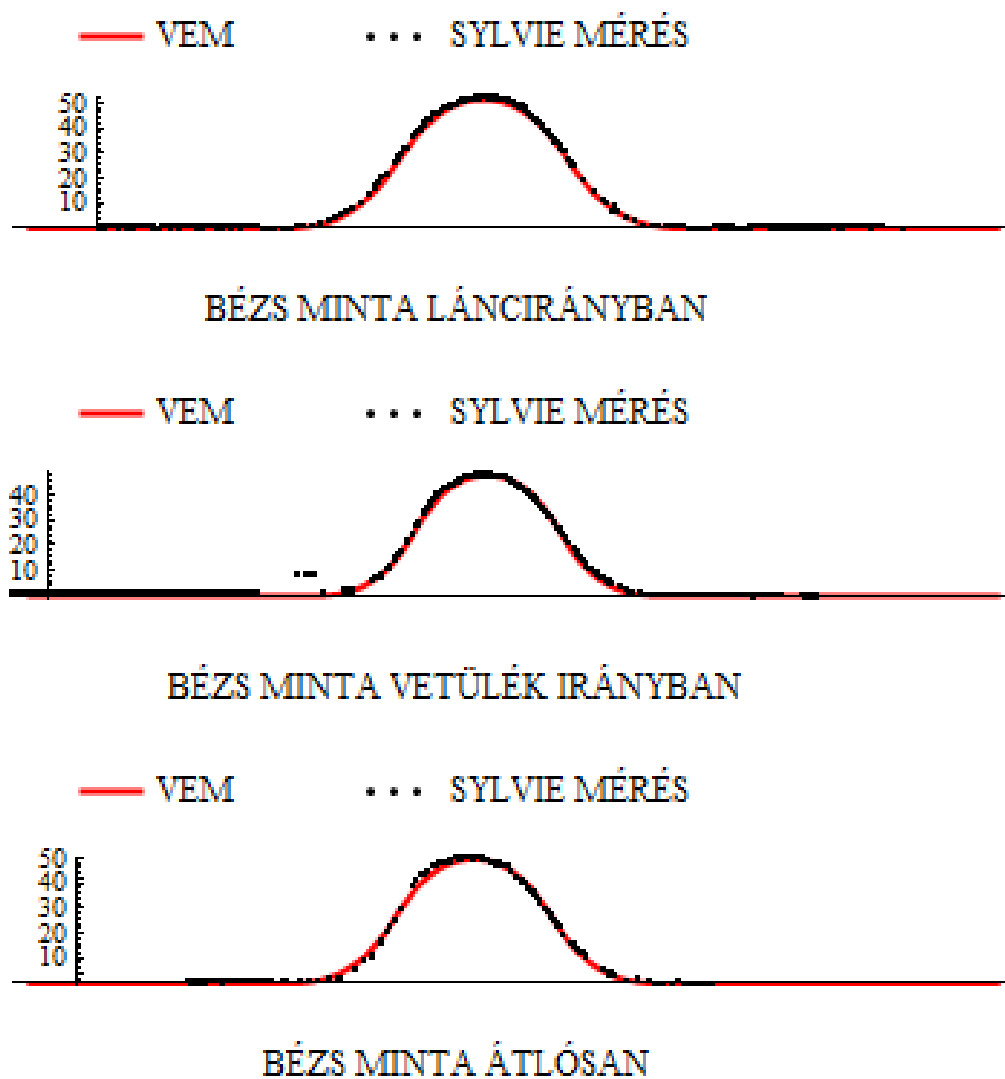
35. ábra A VEM analízis és a mérési pontok összevetése a FEHÉR minták esetében (A vízszintes tengelyen az x koordináta, a függőlegesen az y koordináta szerepel. Mindkét tengely léptéke mm.)

A végelelemes analízis és a SZÜRKE próbasávok Sylvie 3D méréssel meghatározott koordinátáinak összevetését mutatja a 36. ábra.



36. ábra A VEM analízis és a mérési pontok összevetése a SZÜRKE minták esetében (A vízszintes tengelyen az x koordináta, a függőlegesen az y koordináta szerepel. Mindkét tengely léptéke mm.)

A SZÜRKE próbasávok esetében is megfigyelhető az, hogy a VEM analízis eredménye nagyon jól illeszkedik a mérési pontokra, azonban ahol ritkábbak a képelemzésből felvett pontok, ott van eltérés a két eredmény között. Ugyanez a jelenség megfigyelhető a BÉZS minták esetében is. A BÉZS minták analízisének az eredményét a 37. ábra mutatja.



37. ábra A VEM analízis és a mérési pontok összevetése a BÉZS minták esetében (A vízszintes tengelyen az x koordináta, a függőlegesen az y koordináta szerepel. Mindkét tengely léptéke mm.)

4.3. Mérések PT Flexometerrel

Az MSZ 101/12-64 szabvány ajánlása szerint a próbasávok lehajlását színoldallal felfelé mindkét végükön megmértem, majd ezeket az értékeket átlagoltam. 0

A mért lehajlásokat mutatja a 4. táblázat.

Flexometerrel mért hajlítóhosszak						
Kivágási irány	Minta	Hajlítóhossz [mm]			Átlagos hajlítóhossz [mm]	Szórás [mm]
Lánc	FEHÉR	119	118	120	119,8	1,16
		121	121	120		
	SZÜRKE	92	95	96	96,0	2,36
		97	99	97		
	BÉZS	66	70	64	67,3	2,16
		69	68	67		
Vetülék	FEHÉR	100	102	100	101,0	2,19
		105	99	100		
	SZÜRKE	88	87	88	88,0	0,89
		89	89	87		
	BÉZS	69	68	68	68,7	1,96
		69	66	72		
45°	FEHÉR	94	92	95	94,0	2,75
		92	92	99		
	SZÜRKE	69	65	66	67,8	1,94
		70	68	69		
	BÉZS	58	59	56	57,2	1,72
		56	59	55		

4. táblázat A Flexometerrel mért lehajlások

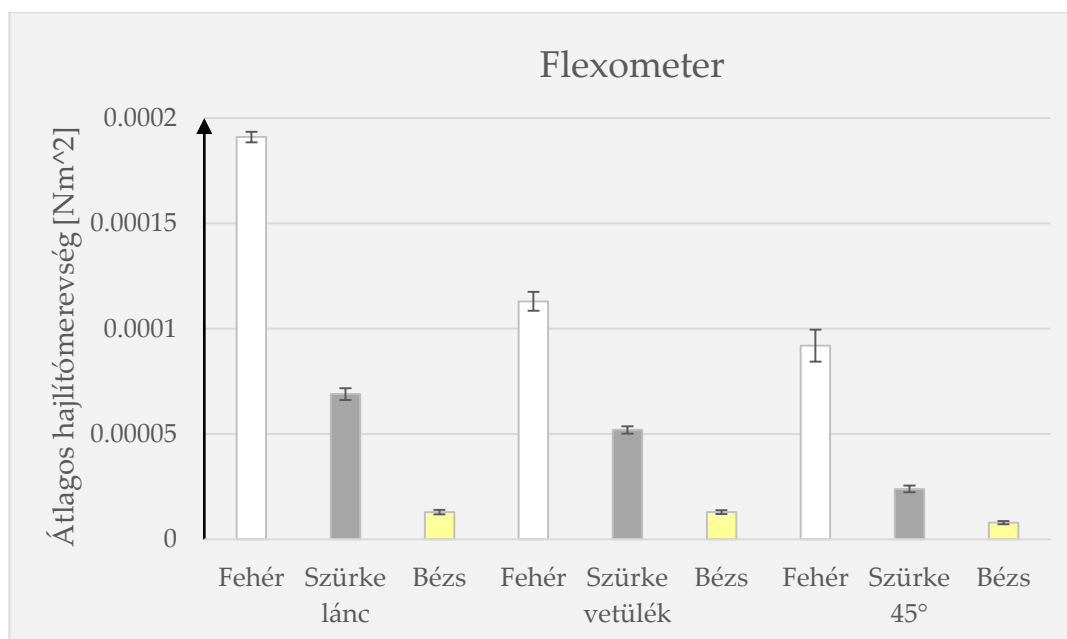
A PT Flexometerrel meghatározott hajlítóhosszból a 3.2.3 fejezetben leírt képletek felhasználásával kiszámoltam a próbasávok átlagos hajlítómerevségét és rugalmassági modulusát.

Az eredményeket az 5. táblázat tartalmazza.

Flexometer				
Kivágási irány	Minta	Hajlítómodulus [MPa]	Hajlítómerevség [Nm ²]	Relatív Szórás [%]
Lánc	FEHÉR	83,3	1,91·10 ⁻⁴	1,3
	SZÜRKE	79,0	0,69·10 ⁻⁴	4,1
	BÉZS	52,8	0,13·10 ⁻⁴	7,8
Vetülék	FEHÉR	49,7	1,13·10 ⁻⁴	4,0
	SZÜRKE	59,8	0,52·10 ⁻⁴	3,4
	BÉZS	56,0	0,13·10 ⁻⁴	6,6
45°	FEHÉR	40,3	0,92·10 ⁻⁴	8,2
	SZÜRKE	27,8	0,24·10 ⁻⁴	6,8
	BÉZS	32,3	0,08·10 ⁻⁴	9,2

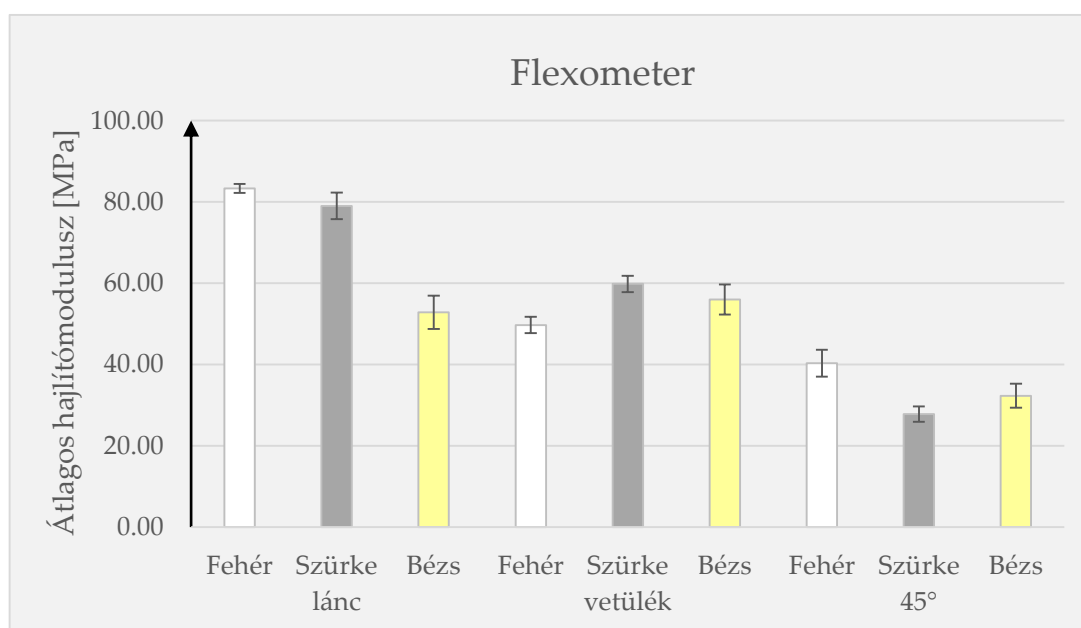
5. táblázat A PT Flexometer-rel meghatározott hajlítómodulus

Az eredményeket oszlopdiagramon ábrázolva (38. ábra), látható, hogy minden mintatípus esetében a láncirányban kivágott minták hajlítómerevsége a legnagyobb, legkisebb pedig az átlósan kivágott minták merevsége. A legvastagabb FEHÉR minták merevsége minden kivágási irányban a legnagyobb, a legvékonyabb BÉZS minták merevsége pedig a legkisebb. Ha a mérési eredményeket összehasonlítjuk a Sylvie 3D Bending Tester berendezéssel meghatározott merevségekkel, azonban a Flexometerrel a merevségek kisebbre adódnak. Az eredményekről egy összehasonlító táblázat (7. táblázat) található a Mellékletben.



38. ábra A Flexometerrel meghatározott hajlítómerevségek

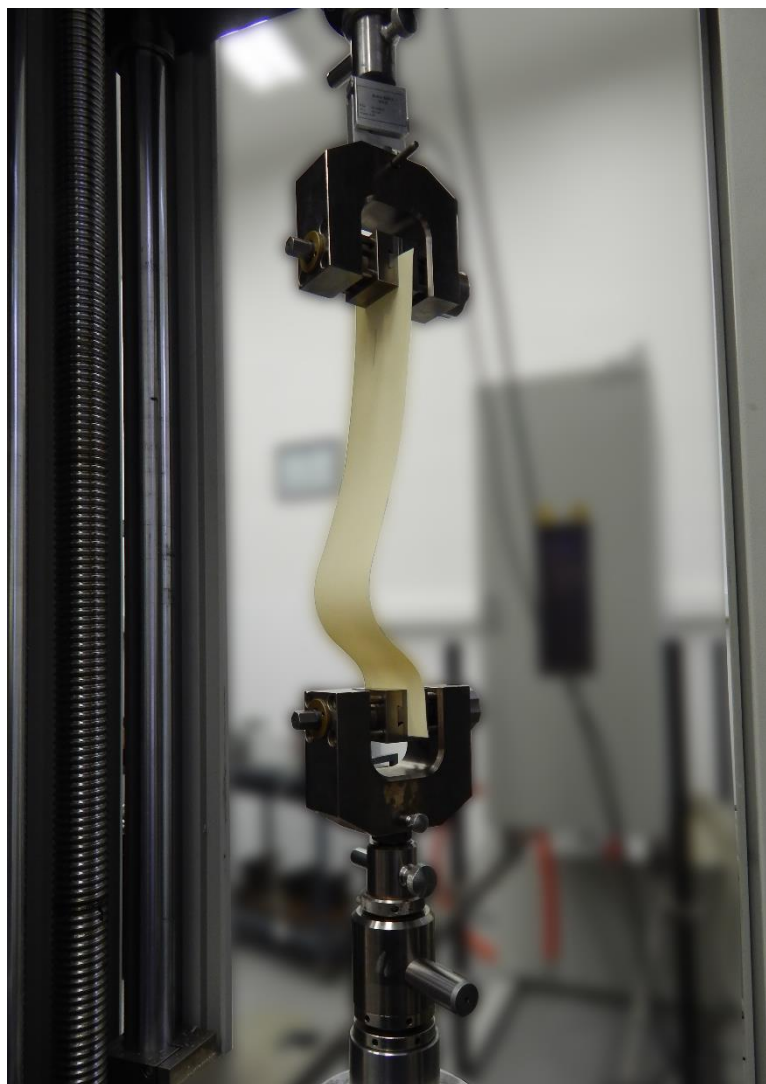
A 39. ábra a PT Flexometerrel meghatározott hajlítómodulusokat mutatja.



39. ábra A Flexometerrel meghatározott hajlítómodulusok

4.4. Szakítógépes kihajlásvizsgálat

A szakítógépes kihajlásvizsgálat ötletét Kocik és társai [15] munkája adta. A vizsgálatot Zwick-Z250 típusú szakítógépen végeztem.

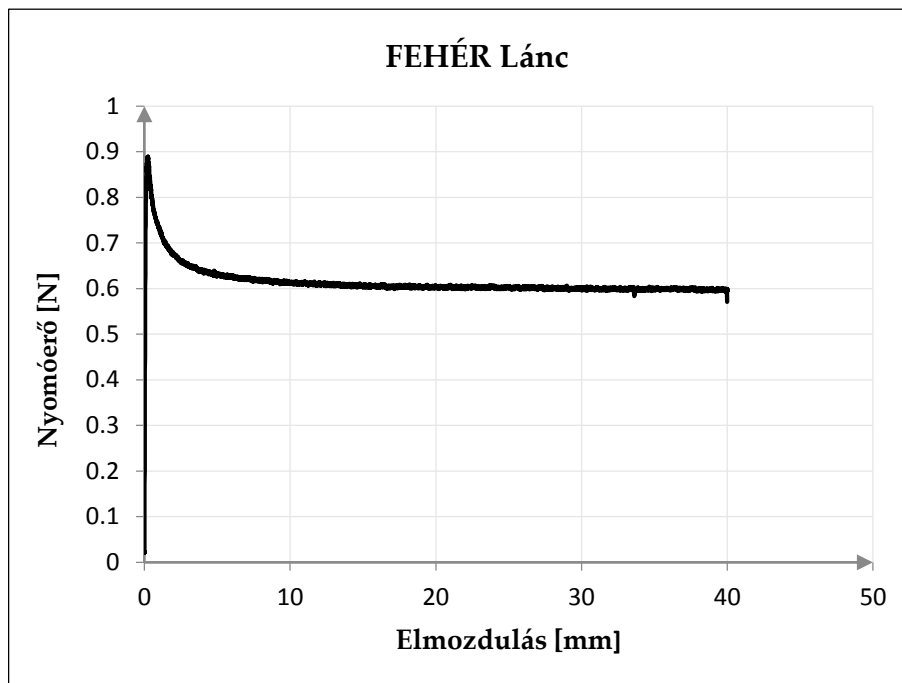


40. ábra Kihajlásvizsgálat szakítógéppel

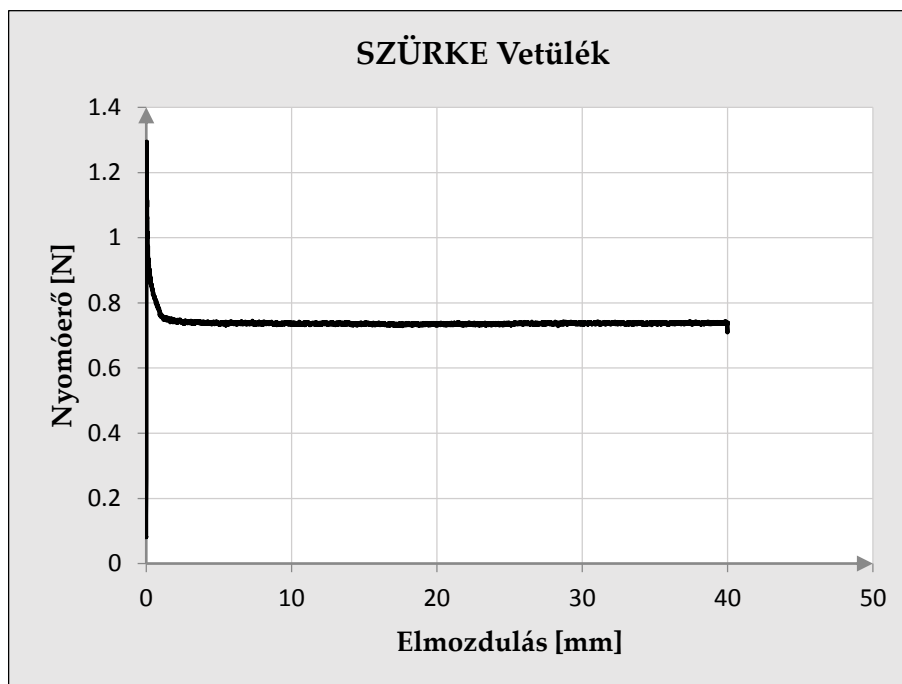
A méréshez ugyanazokat a próbatesteket használtam, mint amelyeket a Sylvie 3D Bending Tester-rel végzett vizsgálatoknál. A 500 N-os erőmérőcellánál kisebb cellát a ponyva befogására alkalmas befogó mérete miatt nem lehetett alkalmazni. A próbatestek felső befogóba való befogása után az erőt nulláztam. Erre azért volt szükség, hogy a kihajlásnál fellépő nagyon kicsi erőt a ponyva saját súlyából származó erő ne torzítsa el, csak a kihajláshoz szükséges erőt mérjem. Az alsó befogóba való befogás után a mintákat 0,5 N erővel meghúzva (előterhelve) indítottam a vizsgálatot. A keresztfej sebesség 20 mm/perc, a teljes összenyomás pedig 40 mm volt. A nyomógörbék felvétele akkor indult, amikor a nyomóerő értéke elérte a nullát. A mérést ponyvatípusonként és kivágási irányonként 3-3 db próbatesten végeztem el.

4.4.1. A mérési eredmények

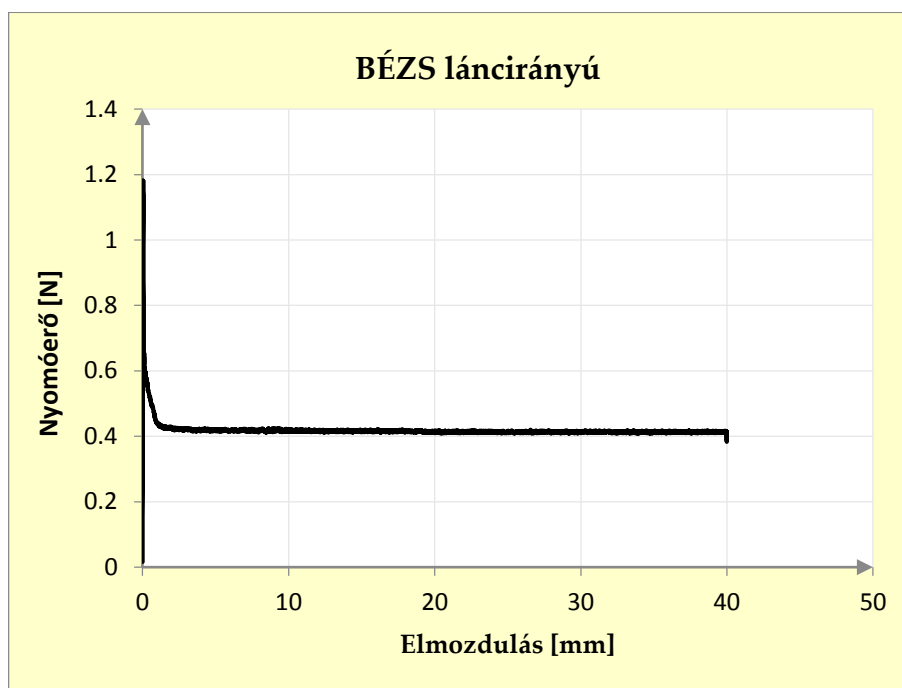
A szakítógépes kihajlásvizsgálat során felvett ponyvatípusonként tipikus erő-elmozdulás diagramokat mutatja a 42. ábra -43. ábra.



41. ábra A szakítógépes kihajlásvizsgálat során felvett tipikus erő-elmozdulás diagram (FEHÉR láncirányú minta)



42. ábra A szakítógépes kihajlásvizsgálat során felvett tipikus erő-elmozdulás diagram (SZÜRKE vetülékirányú minta)



43. ábra A szakítógépes kihajlásvizsgálat során felvett tipikus erő-elmozdulás diagram (BÉZS vetülékirányú minta)

Az összenyomás hatására a próbasávok kihajlása az erőmaximumnál történik. A kihajlás után a további összenyomáshoz konstans erő szükséges, amely a kihajláshoz szükséges erő 36-60%-a ponyvatípustól függően. A vizsgálat során mért nyomóerőket az 6. táblázat tartalmazza.

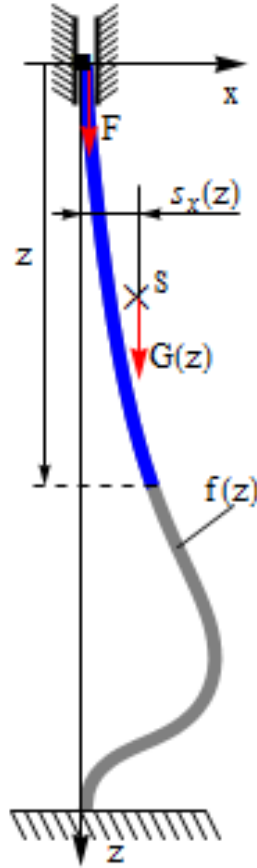
Szakítógépes kihajlászvizsgálat								
Kivágási irány	Minta	Átlagos erő a kihajlás pillanatában [N]	Szórás [N]	Relatív Szórás [%]	Átlagos erő a kihajlás után [N]	Szórás [N]	Relatív szórás [%]	Kihajlás utáni nyomóerő szükséglet [%]
Lánc	FEHÉR	0,83	0,07	8,9	0,51	0,10	20,3	60,8
	SZÜRKE	1,31	0,07	5,0	0,53	0,02	4,1	40,1
	BÉZS	1,32	0,10	10,2	0,53	0,10	19,2	40,3
Vetülék	FEHÉR	0,97	0,06	6,2	0,64	0,02	3,2	65,9
	SZÜRKE	1,40	0,20	14,4	0,72	0,07	10,3	51,0
	BÉZS	1,16	0,02	1,4	0,43	0,05	12,7	36,5
45°	FEHÉR	1,02	0,10	9,5	0,57	0,04	7,2	56,0
	SZÜRKE	1,12	0,03	2,7	0,49	0,04	7,5	43,6
	BÉZS	1,11	0,06	4,9	0,56	0,02	2,8	50,4

6. táblázat A szakítógépes kihajlászvizsgálat során mért nyomóerők

A szakítógépes kihajlászvizsálatnál mért erők feltűnően kicsik, amelyek teljes mértékben összhangban van a gyakorlati tapasztalattal, miszerint ezek az anyagok, akár kézzel is nagyon kis erővel deformálhatók, gyakorlatilag saját súlyuk alatt is lehajlanak.

4.4.2. A mérés mechanikai modellje

A szakítógépes kihajlász mérés mechanikai modelljét a Sylvie 3D Bending Tester modelljéhez hasonlóan írtam fel. A különbség abban nyilvánul meg, hogy a függőleges orientáció miatt a modell saját súlyából származó megoszló terhelés iránya megváltozik. A 44. ábra a mérés modelljét mutatja.



44. ábra A szakítógépes kihajlásmérés modellje

Az ívhossz (29):

$$l(z) = \int \sqrt{1 + f'(z)^2} dz \quad (29)$$

,ahol $f(z)$ a próbatest alakját leíró görbe.

A súlypont helye x irányban (30):

$$S_x(z) = \frac{\int f(z) \cdot \sqrt{1 + f'(z)^2} dz}{l(z)} \quad (30)$$

A kelme súlya (31):

$$G(z) = \rho A g l(z) \quad (31)$$

,ahol $l(z)$ a minta hossza.

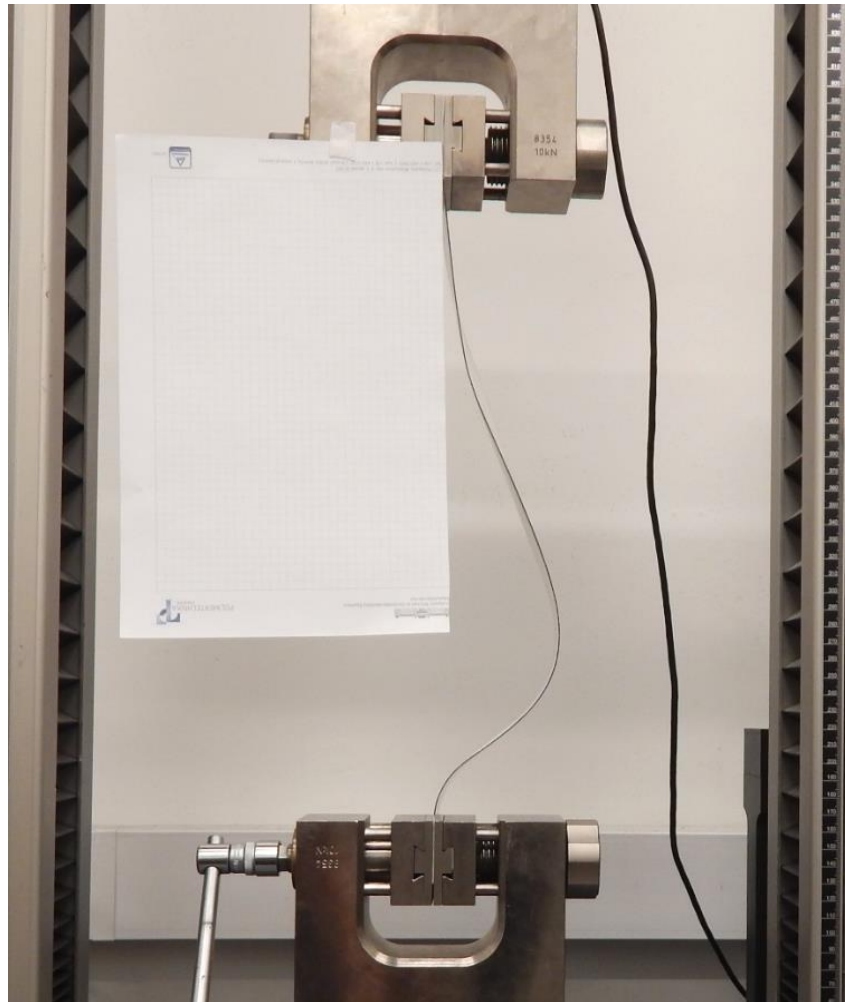
A hajlító nyomaték (32):

$$M_h(z) = f(z) \cdot F + G(z)[f(z) - S_x(z)] \quad (32)$$

A (32) hajlítónyomatékot a rugalmas szál differenciálegyenletébe (26) helyettesítve a hajlítómerevség számítható.

4.4.3. Manuális képelemzés

A szakítógépes kihajlásvizsgálatnál nem állt rendelkezésre az a fényképfelvételt készítő és képfeldolgozó apparátus (lásd. 4.1 fejezet), amellyel a Sylvie 3D Bending Tester berendezésnél dolgoztam. A szakítógépes kihajlásvizsgálat során kialakuló deformált alak koordinátáinak meghatározására viszont szükség volt a további kiértékeléséhez. Ehhez fényképezőgéppel felvételeket készítettem a mérés közben (45. ábra).

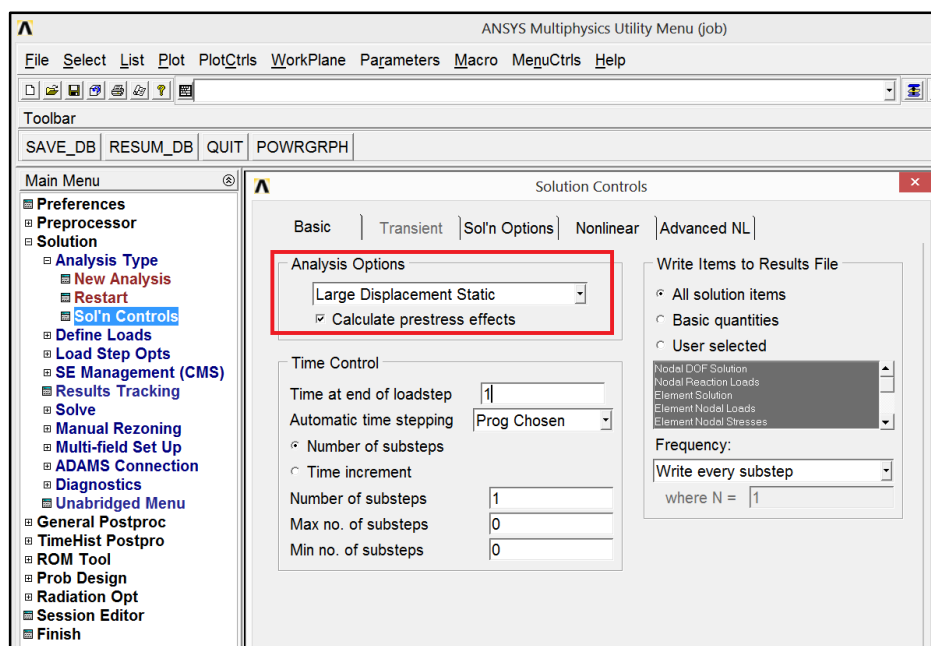


45. ábra Szakítógépes kihajlásvizsgálat – felvétel készítése a deformált alakról manuális képelemzéshez (SZÜRKE láncirányú)

A fényképek elkészítésénél kiemelt figyelmet fordítottam arra, hogy a fényképezőgép állványa a szakítógéppel pontosan szemben helyezkedjen el és párhuzamosak legyenek. A minta élét sötét festés segítségével kiemeltem, hogy megfelelően kontrasztos legyen a fehér háttér előtt. Továbbá szükséges volt a meghajlított minta síkjában egy mérce elhelyezésére (négyzetrácsos papír), amellyel a kiértékelésnél a képpontok a valós méretekkel megfeleltethetők. A fényképek kiértékelését GIMP 2.8.14 szoftverrel végeztem. A minta görbült alakján 25-30 mérési pont vettem fel és a program beépített Measure Tool eszközével egy referencia ponthoz képest meghatároztam a koordinátaikat.

4.4.4. Végeselemes analízis

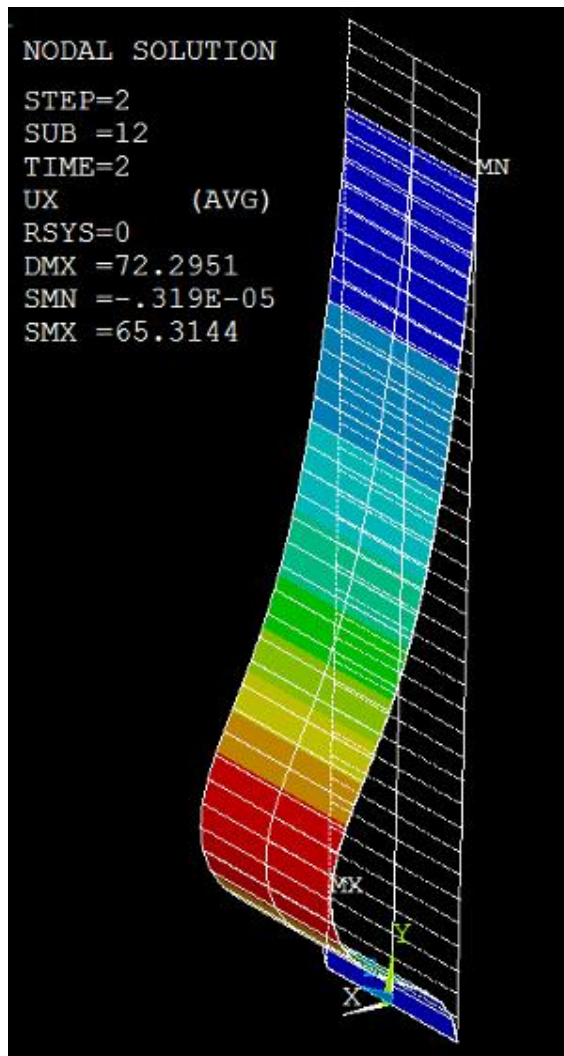
A végeselemes analízist ebben az esetben is ANSYS 14.5 végeselem szoftverrel végeztem. 40 db rúdelem (BEAM189 finite strain, elemenként három csomópont) alkalmazásával létrehoztam a próbatest modelljét. A nagy elmozdulások miatt szükséges ezt az elemet használni, azonban a 3D elem felesleges szabadságfokait le kell kötni a síkfeladat megoldásához (az új Ansys programban már nincsen külön síkbeli rúdelem). A modellezett próbatest 424 mm hosszú, azaz ugyanakkora, mint a Sylvie 3D mérésnél és a szakítógépes kihajlásmérésnél befogott hossz. A terhelés definiálásához a nehézségi gyorsulás és a sűrűség megadásával figyelembe vehető a próbatest saját súlya. Az analízis első lépésében a modell felső befogási pontjára előírom a 40 mm elmozdulást és az alsó befogáshoz közeli csomópontokra a vízszintes elmozdulást (ez a kihajlás utáni, ún. post-buckling állapot leírására szükséges [5]). A második lépéstől ezt a zavarást megszüntetem, hogy a program iterálja az egyensúlyi állapothoz tartozó elmozdulásmezőt.



46. ábra Az alkalmazott beállítások

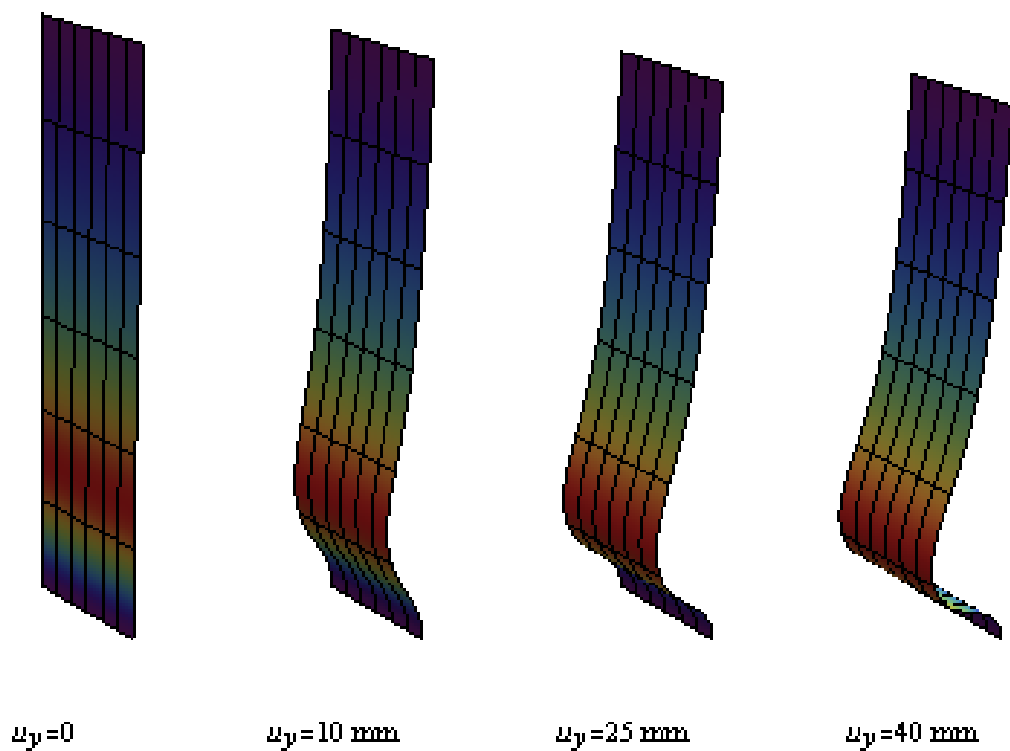
Az analízis során bekapcsoltam a geometriai nemlinearitást figyelembe vevő eljárást (46. ábra), vagyis a nagy elmozdulások kezelését (Large Displacement Static) és azt, hogy minden terhelési lépés kiinduló állapota az előző lépés legyen (Calculate Prestress Effects).

A hosszirányban kivágott BÉZS minta végeselemes modelljét a 47. ábra mutatja.



47. ábra A hosszirányban kivágott BÉZS minta végeselem modellje

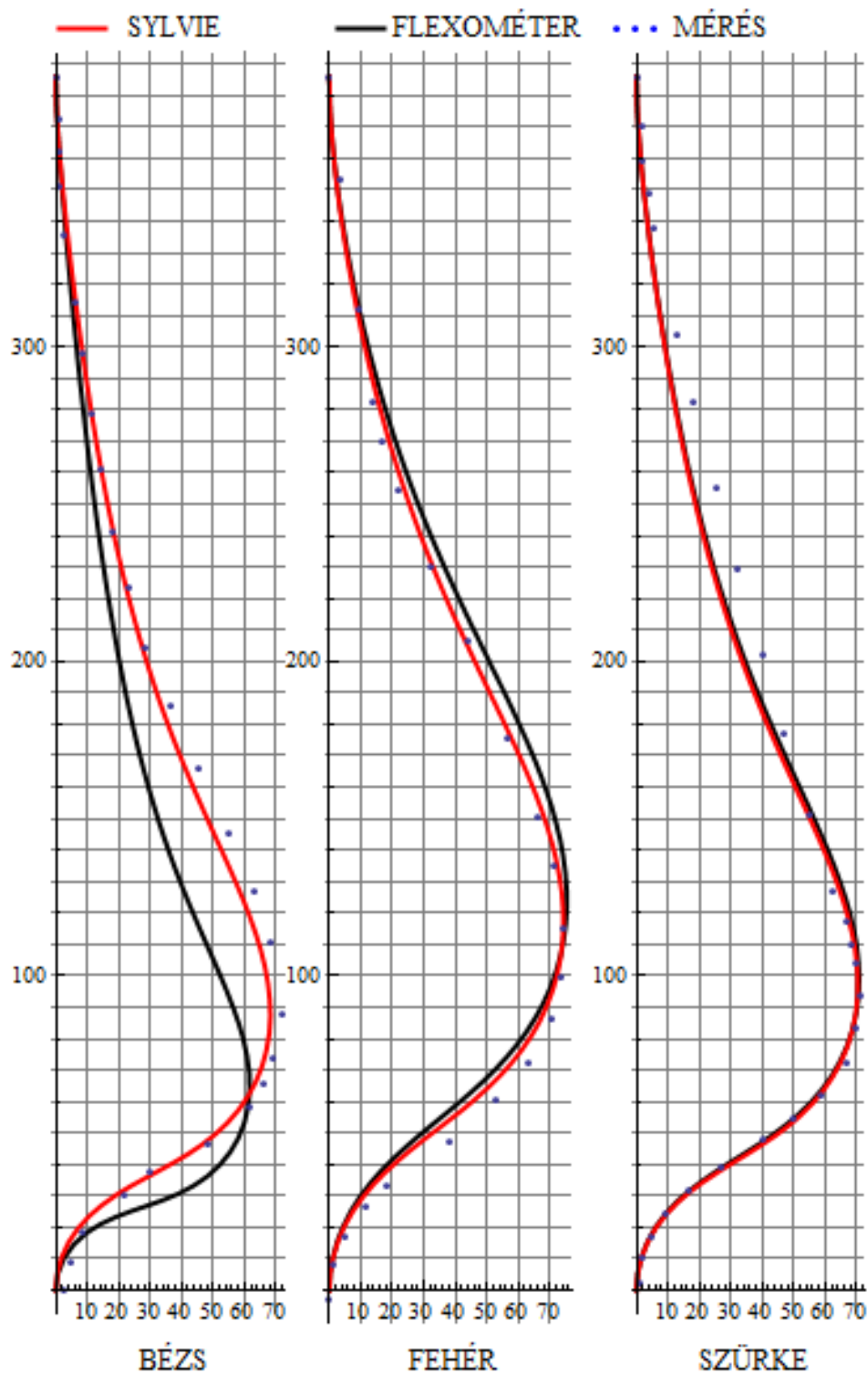
A különböző mértékben összenyomott modelleket a 48. ábra mutatja.



48. A különböző mértékben összenyomott végelem modellek (u_y = az összenyomás mértéke)

4.4.5. A végeselemes analízis eredményének és a képelemzéssel meghatározott alaknak az összehasonlítása

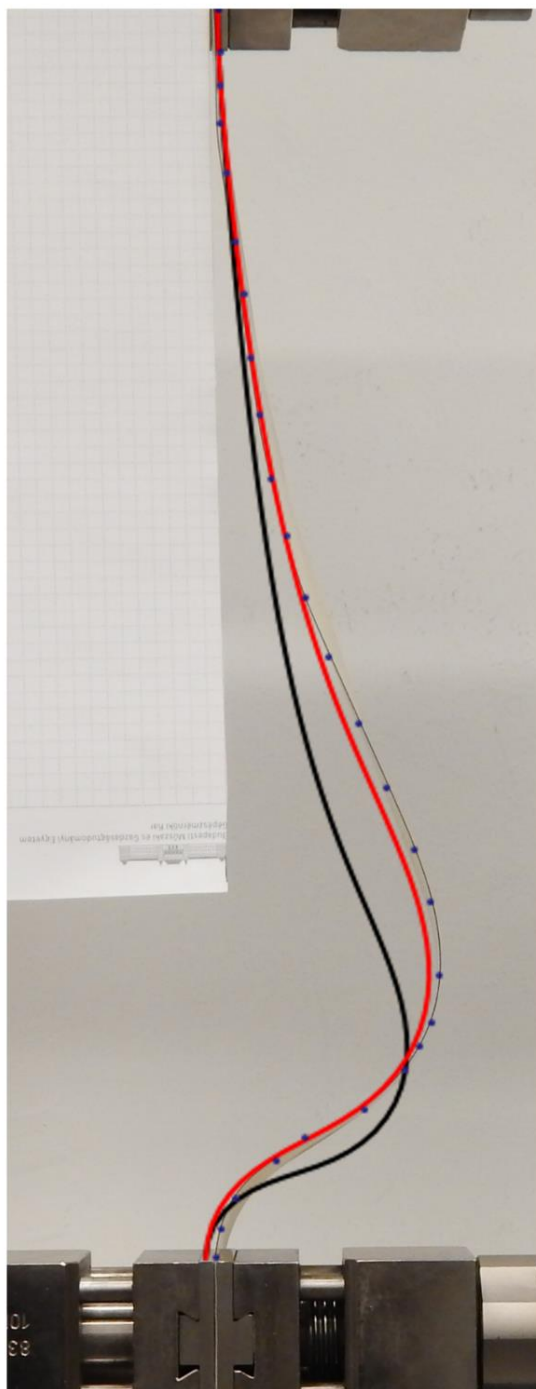
A szakítógépes kihajlásvizsgálat végeselemes modelljét kétféle anyagjellemzővel futtattam. Az első esetben a Sylvie 3D Bending Testerrel meghatározott rugalmassági modulust használtam fel, a második esetben pedig a Flexometerrel meghatározottat. Ezeket az eredményeket ezután összevettem a szakítógépes kihajlásmérés során készített fényképfelvételek kézi képelemzéséből meghatározott görbült alakkal. Az összehasonlítás eredményét a 49. ábra mutatja.



49. ábra A végelelemes analízis és a képelemzéssel meghatározott pontok összehasonlítása (kék pontok – a képelemzéssel meghatározott pontok, piros – a végelelemes analízis eredménye a Sylvie 3D-vel meghatározott rugalmassági modulust felhasználva, fekete - a végelelemes analízis eredménye a Flexometerrel meghatározott rugalmassági modulust felhasználva)

Az ábrán megfigyelhető, hogy a BÉZS minta esetében a Sylvie 3D Bending Testerrel meghatározott rugalmassági modulusszal futtatott analízis eredménye

rendkívül jól illeszkedik a szakítógépes kihajlásmérésnél felvett alakkal. Ezt az illeszkedést mutatja a 50. ábra, amelyen a végeselemes analízis eredménye a mérésen készült fényképre van vetítve. Az ábrán a piros görbe a Sylvie 3D Bending Testerrel meghatározott hajlítómodulusszal futtatott végeselemes analízis eredményét, a fekete görbe a Flexometerrel meghatározott modulusszal futtatott analízis eredményét, a kék pontok pedig a fényképen felvett mérési pontokat mutatja.



50. ábra A végeselemes analízis eredménye a mérésen készült fényképre vetítve (BÉZS láncirányú)

A FEHÉR és SZÜRKE minta esetében a Sylvie méréssel meghatározott rugalmassági modulusszal futtatott analízis kismértékben eltér a VEM-es eredményektől. Ennek feltételezhetően az az oka, hogy a mintát befogásánál nem sikerült tökéletesen párhuzamosan beállítani az alsó és felső befogás között, ami így az összenyomásnál kismértékű csavarodást okozott. Ez a csavarodás a fényképeken is látható.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A lapszerű, már saját súlyuk alatt is lehajló anyagok hajlítási jellemzőinek meghatározása fontos terület, amelynek eredményei viselkedésük modellezéséhez, szimulációjához elengedhetetlenül szükségesek. A jelenleg elsősorban ruházati- és lakástextíliák vizsgálatára alkalmazott mérőberendezések azonban méréstartományuk és pontosságuk, vagy éppen beszerzési árak miatt a műszaki területek igényeit nem teljesen elégítik ki. A BME-n a Polimertechnika Tanszék és a Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék által közösen kifejlesztett Sylvie 3D Bending Tester berendezés segítségével a hajlítási jellemzők a meghajlított minták alakjának elemzéséből egy újszerű, optikai mérési elvet alkalmazva határozhatók meg. Ezzel a módszerrel valamennyi kis hajlítómerevségű, lapszerű anyag, mint például ponyvák, kompoziterősítő anyagok vagy egyéb műszaki textíliák, vizsgálhatók.

5.1. Eredmények

Diploma dolgozatom célja a Sylvie 3D Bending Tester berendezés kiértékelési módszerének a továbbfejlesztése, teszt mérések elvégzése és a mérési eredmények validációja volt.

Fő feladatom a képfeldolgozó program által kiadott, a meghajlított próbatest alakját leíró pontok alapján a hajlítási jellemzők kiszámítási módszerének a kidolgozása volt. A Sylvie 3D Bending Tester mechanikai modelljét a várhatóan nagy alakváltozások figyelembe vételével építettem fel. A számításoknál a rugalmas szál differenciálegyenletének a nagy szögelfordulások esetén is alkalmazható változatát használtam. Ezen kívül továbbfejlesztettem a kiértékeléshez szükséges képfeldolgozást a mérési pontok szűrésének automatizálásával.

A tesztmérésekhez három különböző területi sűrűségű, poliészterszövet alapú, PVC kenésű ponyvaanyagot választottam. A hajlításméréseket elvégeztem lánc-, vetülék- és 45°-os irányban is.

Elkészítettem a Sylvie 3D Bending Tester mérés végeselemes analízisét a három ponyvaanyagra, és azt tapasztaltam, hogy az analízis a kiértékelés során kapott hajlítómodulusokkal futtatva az eredmények jó egyezést mutatnak a mérési pontokkal.

A Sylvie 3D Bending Testerrel kapott eredményeket két további mérés eredményeivel hasonlítottam össze. Az egyik mérés során a Polimertechnika Tanszéken tervezett és megépített PT Flexométerrel végeztem vizsgálatokat, és a szokásos kiértékelésen felül kiszámítottam a hajlító rugalmassági modulus értékeket is.

A másik mérés során szakítógéppel végeztem kihajlásmérést. A mérés alatt a kihajlott mintáról fényképfelvételeket készítettem, amelyeket manuális képelemzésnek vetettem alá, és meghatároztam a minta görbült alakját leíró pontok

koordinátáit. A szakítógépes kihajlásvizsgálathoz is felállítottam a mérés mechanikai modelljét, valamint elkészítettem a végeselemes modelljét. A végeselemes analízis során anyagtulajdonságként a Sylvie 3D Bending Tester-rel és a PT Flexometerrel meghatározott hajlítómodulusokat is felhasználtam. Megállapítottam, hogy a Sylvie 3D Bending Tester mérésből kiértékelt hajlítómodulusszal futtatott végeselemes analízis eredménye jobban illeszkedik a képelemzésből származó mérési pontokra, mint a PT Flexometerrel meghatározott hajlítómodulusszal futtatott analízis.

Összességében arra a következtetésre jutottam, hogy a Sylvie 3D Bending Tester berendezés alkalmas a kis hajlítómerevségű, lapszerű anyagok hajlítójellemzőinek meghatározására.

5.2. További feladatok

A téma számos további feladat megoldását kívánja.

A Sylvie 3D Bending Tester-rel végzett további vizsgálatokkal a ponyvákon kívül egyéb hajlékony lapszerű anyagok hajlító tulajdonságai is feltárhatók.

A PT Flexometer mérési eredményeinek kiértékelése továbbfejleszthető a próbasáv képelemzéssel meghatározott alakjának figyelembe vételével, valamint a mérés végeselemes analízisének elkészítésével.

A szakítógépes kihajlásmérés eredményeinek feldolgozása továbbfejleszthető a mért erők, a képelemzéssel meghatározott görbült alak és a mechanikai modell felhasználásával, valamint további értékes információkhoz juthatunk a kapott hajlító jellemzőknek a többi mérési módszerrel kapott eredményekkel való összehasonlítása révén.

Tekintettel arra, hogy a vizsgált anyagok legtöbbje polimer anyag, további feladat lehet a jelenleg alkalmazott lineárisan rugalmas anyagtörvény helyett viszkoelasztikus anyagtörvény figyelembe vétele és a kiértékelés eljárás további automatizálása.

További kutatás tárgyát képezheti annak elemzése is, hogy milyen tényezők és hogyan befolyásolják a vizsgált anyagok hajlító tulajdonságait.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Al-Gaadi B.: Szőtt kompozit-erősítő szerkezetek 3D-s deformációs tulajdonságainak elemzése. PhD értekezés. BME (2012).
2. Gyimesi J.: Textilanyagok fizikai vizsgálata. Műszaki könyvkiadó, Budapest (1968).
3. Peirce, F. T.: The "Handle" of Cloth As a Measurable Quantity. Journal of the Textile Institute Transactions, 21(9), T377–T416 (1930).
4. Bilbao E. de, Soulat D., Hivet G., Launay J., Gasser A.: Bending test of composite reinforcements. International Journal of Material Forming, 1, 835-838 (2008).
5. Zheng C: Cloth simulation by isogeometric analysis. PHD értekezés, University of Iowa. (2013).
6. B.K. Behera, P.K. Hari: Woven Textile Structure. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England (2010).
7. J. Geršak, M. Halász: Complex Fabric Deformation and clothing modeling in 3D. Lambert Academic Publishing, London (2013).
8. Hegyi D.: Ponyvaszerkezetek és ponyvaanyag nemlineáris vizsgálata numerikus és kísérleti módszerekkel. PhD értekezés. BME (2006).
9. Burj Al Arab, <http://flic.kr/p/5wzw2y> (2014.10.25)
10. Bilbao E. de, Soulat D., Hivet G., Launay J., Gasser A.: Study of bending behaviour of composite reinforcements. International Journal of Material Forming, 2, Suppl. 1, 205-208 (2009).
11. E. de Bilbao, D. Soulat, J. Launay, G. Hivet and A. Gasser. Experimental study of bending behavior of reinforcements. Experimental Mechanics, 50, 333-351 (2009).
12. Saville B.P: Physical testing of textiles. Woodhead Publishing Limited. Cambridge, England (2000)
13. Chou T.W, Ko F.K.: Textile Structural Composites. Composite Materials Series, 94-99 (1989).
14. P. Grosberg: The mechanical properties of woven fabrics part II: the bending of woven fabrics. The Journal of the Textile Institute. 36 (3), 205-214 (1966).
15. Kocik M., Zurek W., Krucinska I., Gersak J., Jakubczyk J.: Evaluating the Bending Rigidity of Flat Textiles with the Use of an Instron Tensile Tester. FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, 13(2), 31–34. (2005).
16. ASTM D 4032 –08 (2009) Standard Test Method for Stiffness of Fabric by the Circular Bend Procedure (2009).
17. Sörös G.: Cím. Hajlékony textile és kompozit lapok hajlítóvizsgálat (BSc Szakdolgozat). BME (2014).

18. MSZ 101/12-64 Szövetek hajlítással szembeni ellenállásának vizsgálata.
19. <http://pt.bme.hu> (2014.10.01)
20. Vas L. M.: Textilanyagok szerkezeti elemzése számítógépes modellezéshez. BME Kutatási tanulmány, (2003).
21. Szabó L.: Képkalkulációra alapozott ruhaipari mérés technikák, Phd dolgozat, BME (2008).

7. SUMMARY

Determining the flexural property of fabric is an important field considering that the results can be used in modelling and simulation. Current measuring methods and instrument are only suitable for apparel and home fabric, whereas analysis of engineering textiles require a wider measurement range, greater precision, or moderate price.

Sylvie 3D Bending Tester, designed by the Department of Polymer Engineering and the Department of Mechatronics, Optics, and Engineering Informatics, is a tester especially for the flexural analysis of fabric. The tester works in a novel method that optically records the shape of the deformed sample. It makes the analysis of sheet-like material, including coated fabrics, composite reinforcement textiles, and other engineering fabrics possible.

The aim of my thesis comprised of improving the evaluation of the Sylvie 3D Bending Tester, conducting test measurements, and validating results. My main task was to develop an evaluation method that is capable to calculate the flexural properties from coordinates obtained from image analysis. As large displacements are present during the test with Sylvie 3D Bending Tester the evaluation is based on the equation of the elastic curve for large displacements. As part of my work, an automatic filtering for the image processed coordinates was created.

Three types of PVC coated PES fabrics, cut out in the directions of warp, weft, and 45 degrees, were tested.

A finite element analysis (FEA) of the Sylvie 3D test was created. The results of the analysis were in agreement with the coordinates of the deformed sample. The results of the Sylvie 3D test were compared with the results of another two test methods. First, with the results calculated from tests with PT Flexometer. Second, with results from a buckling test conducted with a tensile tester.

During the buckling test, photographs were taken for manual image analysis of the deformed shape. The mechanical model and FEA (using material properties calculated from Sylvie 3D and Flexometer tests) have been created for the test. The results of the FEA using the flexural modulus calculated from the Sylvie 3D test fits the deformed shape of the sample during the buckling test better than those FEA results using the flexural modulus calculated from the Flexometer test.

Summarizing, it can be concluded that the Sylvie 3D Bending Tester is a capable method to determine the flexural properties of sheet-like material with small bending rigidity.

8. MELLÉKLET

		Flexometer			Sylvie 3D Bending Tester		
Kivágási irány	Minta	Hajlítómerevség [Nm ²]	Hajlítómodulus [MPa]	Relatív Szórás [%]	Hajlítómerevség [Nm ²]	Hajlítómodulus [MPa]	Relatív Szórás [%]
Lánc	FEHÉR	1,91·10 ⁻⁴	83,3	1,3	3,55·10 ⁻⁴	155,4	11.6
	SZÜRKE	0,69·10 ⁻⁴	79,0	4,1	1,25·10 ⁻⁴	144,5	7.4
	BÉZS	0,13·10 ⁻⁴	52,8	7,8	0,27·10 ⁻⁴	111,0	4.2
Vetülék	FEHÉR	1,13·10 ⁻⁴	49,7	4,0	1,95·10 ⁻⁴	85,3	6.7
	SZÜRKE	0,52·10 ⁻⁴	59,8	3,4	0,65·10 ⁻⁴	75,1	2.1
	BÉZS	0,13·10 ⁻⁴	56,0	6,6	0,18·10 ⁻⁴	72,8	10.7
45°	FEHÉR	0,92·10 ⁻⁴	40,3	8,2	2,14·10 ⁻⁴	93,9	16.7
	SZÜRKE	0,24·10 ⁻⁴	27,8	6,8	0,56·10 ⁻⁴	65,4	2.9
	BÉZS	0,08·10 ⁻⁴	32,3	9,2	0,22·10 ⁻⁴	90,2	5.3

7. táblázat A ponyva minták hajlító jellemzői Flexometer-rel és Sylvie 3D Bending Tester-rel mérve