



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

TATÁR NIKOLETTA

TDK DOLGOZAT

KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZER FEJLESZTÉSE KÉPELEMZÉSES
HAJLÍTÁSMÉRÉSHEZ

Témavezető:

Dr. Halász Marianna

egyetemi docens

Konzulensek:

Dr. Tamás Péter

egyetemi docens

Dr. Vas László Mihály

címzetes egyetemi tanár

BUDAPEST, 2014

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Dr. Halász Mariannának a sok bízgatásért, 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	III
JELÖLÉSEK JEGYZÉKE.....	VII
1. BEVEZETÉS	2
2. LAPSZERŰ ANYAGOK HAJLÍTÓJELLEMZŐINEK MEGHATÁROZÁSA	4
2.1. A hajlítójellemzők meghatározása deformált alakból	4
2.2. Hajlítójellemzők meghatározása hajlítónyomaték/erő mérésel	12
3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK	15
3.1. Felhasznált alapanyagok.....	15
3.2. Alkalmazott berendezések és vizsgálati módszerek.....	16
4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ	21
4.1. Sylvie 3D Bending Tester.....	21
4.2. Mérések Flexometerrel	29
4.3. Szakítógépes kihajlásvizsgálat	30
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	37
5.1. Eredmények.....	37
5.2. További feladatok.....	38
6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK	39
7. 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
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	hajlítónyomaték	Nm
m	korrekciós tényező	-
N _x	horizontálisan ható erők	N
Q	a súlypontba redukált erőrendszer	N
S _p	adott lehajláshoz tartozó előtolt hossz	m
S	súlypont helye	
s	P pont távolsága a szabad végtől	m
v	próbasáv vastagsága	m
q	területi sűrűség	kg/m ²

Görög betűk

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

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
KES	Kawabata Kelmeelemző Rendszert (Kawabate Evaluation System)
PVC	polivinilklorid (polyvinylchloride)
PTFE	politetrafluorétilén (polytetrafluorethylene, TEFLON)
TKI	Textilipari Kutató Intézet
VEM	végeselemes 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 hajlítótulajdonságok meghatározzák a kelmék alakíthatósági képességét, esését és tartását. Minél kisebb egy szövet merevsége, annál jobb az esése, viszont minél merevbb, 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 hajlítójellemzőket. 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 hajlítójellemzőinek 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 TDK munka célja a Sylvie 3D Bending Tester berendezés kiértékelési módszerének továbbfejlesztése és a vizsgált ponyvaanyagok hajlítótulajdonságainak meghatározása. Továbbá megvizsgálom annak a lehetőségét, hogy a szakítógéppel elvégzett nyomóvizsgálat alapján, hogyan lehet validálni az egyéb mérésekkel kapott eredményeket.

2. LAPSZERŰ ANYAGOK HAJLÍTÓJELLEMZŐINEK MEGHATÁROZÁSA

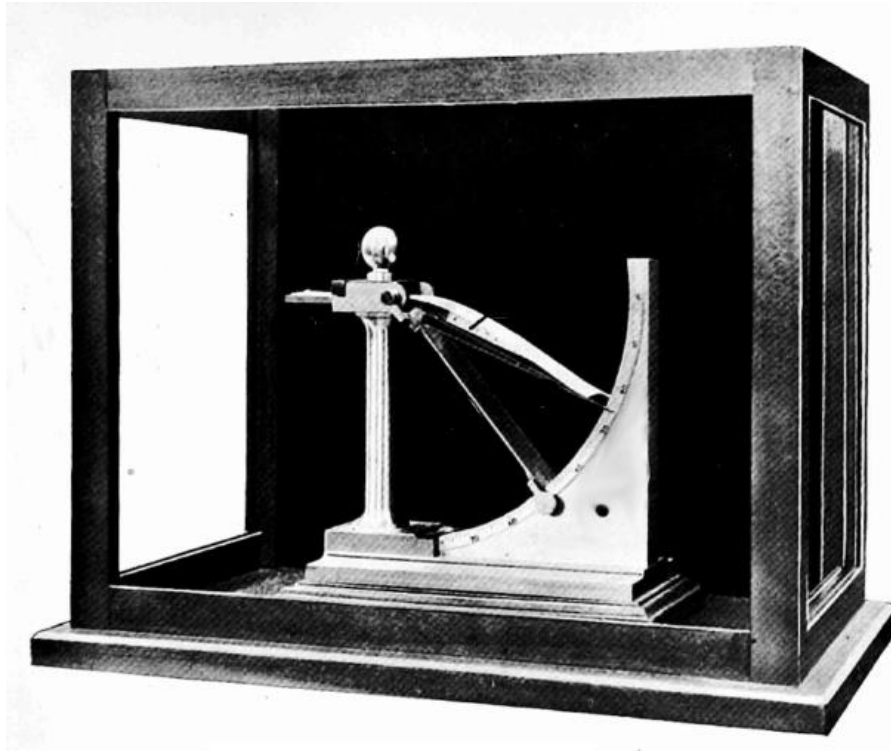
A következőkben bemutatom a lapszerű anyagok hajlítási tulajdonságainak vizsgálatára alkalmas berendezéseket és módszereket. Ezeket két csoportba sorolom aszerint, hogy a hajlítójellemzőket a hajlítónyomaték hatására deformált minta alakjának elemzéséből vagy közvetlenül, a hajlítónyomaték méréséből határozzák meg.

2.1. A hajlítójellemzők 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. A második, ahol ezt a nyomatékot külső erő hozza létre. Saját súlyától lehajló, különböző szögű lejtőket érintő textilsávokra dolgozott ki számítási eljárásokat több kutató. Ezek közül kiemelkedik F.T. Peirce Cantilever Test módszere, amelynek alkalmazása alapvetővé vált a textiliparban.

2.1.1. 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, lágysággal, 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 (1. ábra) foglalkozik. Ezt a publikációt a jelentősége miatt a következőkben részletesen is bemutatok.



1. 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)

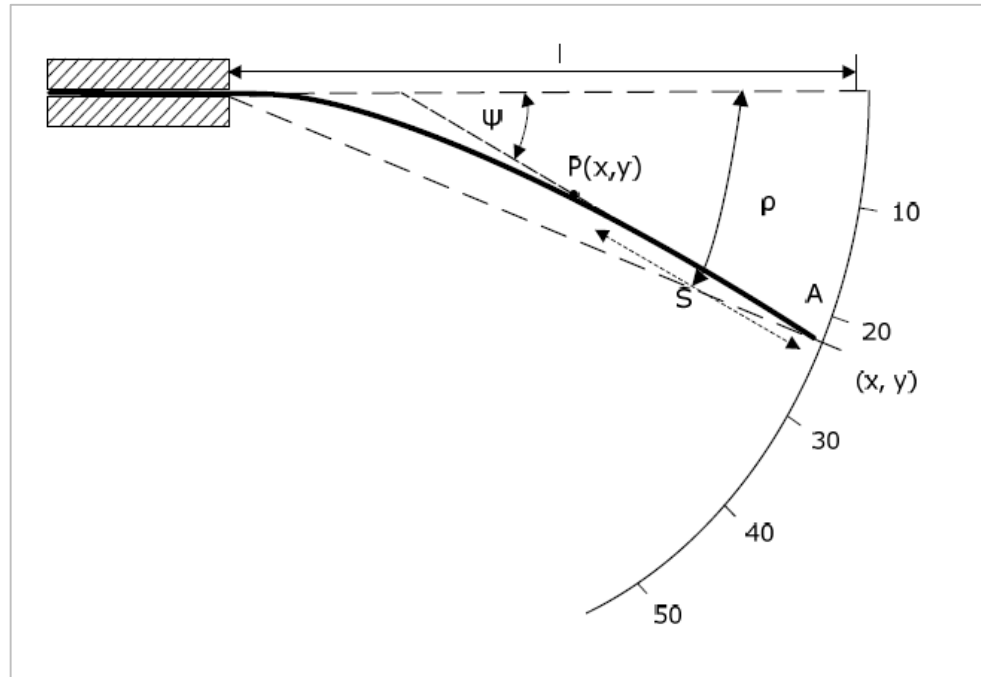
$$S_p = \frac{G}{q} \quad (1)$$

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

Amennyiben téglalap keresztmetszetű próbasávot vizsgálunk (2. 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.



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

Ahogy azonban a lehajlás mértéke nő, a (2) egyenlet a valósnál 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 lehajlásának 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 2. 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.

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

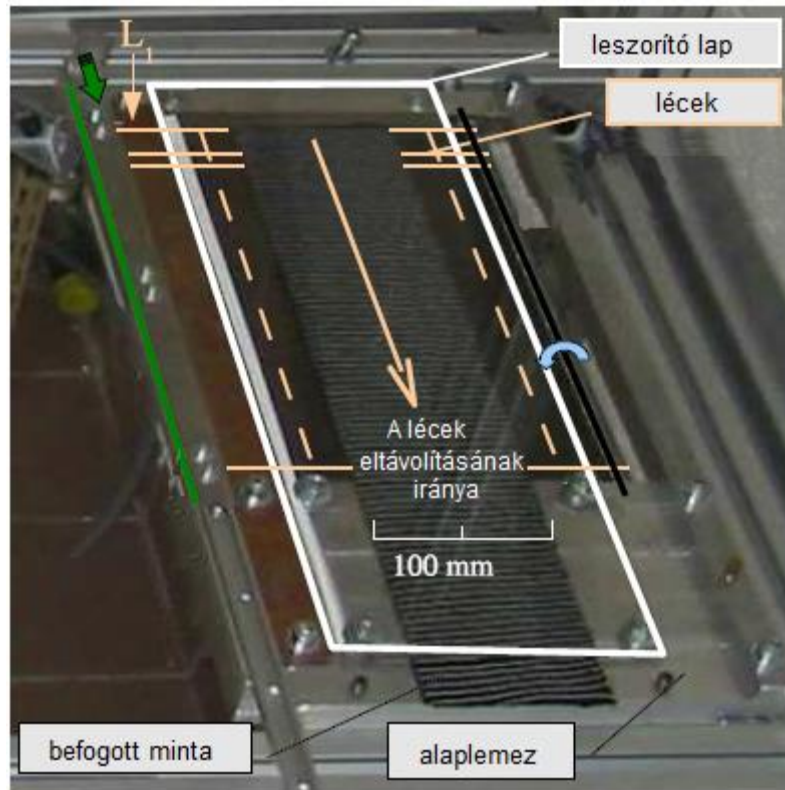
A (4) egyenlet azonban nem integrálható zárt alakban, ezért Peirce egy empirikus úton előállított egyenlet használatát javasolja, ahol

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

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

2.1.2. Bilbao módosított Flexometer

Bilbao és társai cikkeikben [4, 7-8] bemutatnak egy képfeldolgozással kiegészített módosított Flexometert, annak érdekében, hogy azonosítani tudják a textíliák nem-lineáris viselkedését.



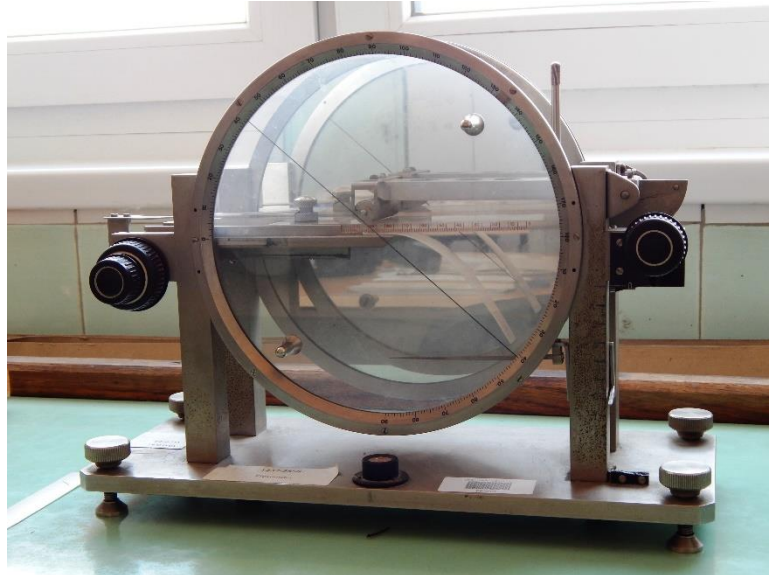
3. ábra Bilbao módosított Flexometer berendezése [7]

A módosított berendezéssel különböző hajlítóhosszak esetén lehet mérni a hajlítótulajdonságokat. A mintákat 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 leógó minta alakjáról. Nagy hajlítóhosszak esetén a kiértékeléshez a Dahl-modellt alkalmazzák. Ez a modell azonban kis hajlítóhossznál nem illeszkedik a feltételezhetően lineárisan rugalmas viselkedés miatt. Bilbao kidolgozott egy inverz módszert a hajlítójellemzők meghatározására, ahol kis görbületek esetén, a lehajló minta alakját végeeselemes 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.

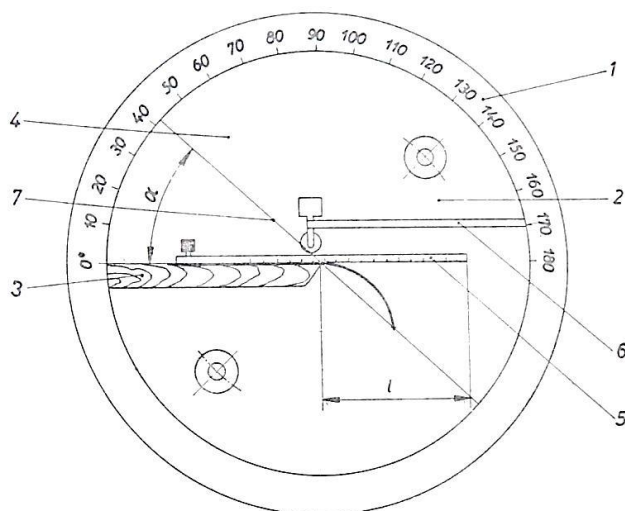
2.1.3. A TKI típusú Flexometer

Magyarországon a leggyakoribb Flexometer típus a Textilipari Kutatóintézetben (TKI) kialakított konstrukció (4. ábra).



4. ábra Egy TKI típusú Flexometer mérés közben

A berendezés egy virtuális lejtővel rendelkezik, amelyet az előlapon lévő átmérővonal és annak reflexiója hoz létre a hátlayan lévő tükrön (5. ábra).

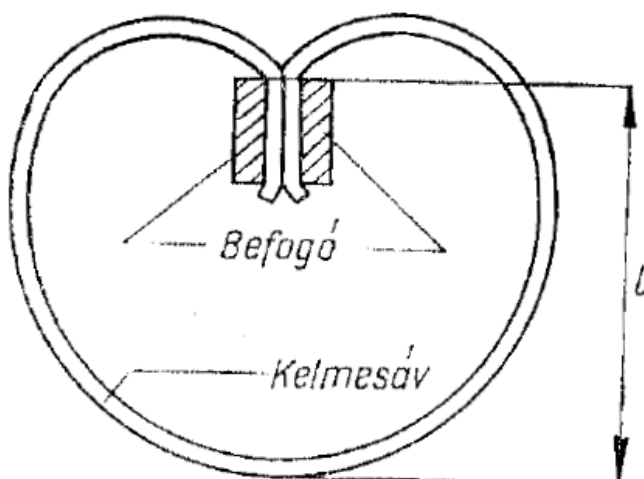


5. A TKI típusú Flexometer vázlata

- 1- gyűrű alakú szögmérő,
- 2- forgatható átlátszó lap, amin az átmérővonal van,
- 3- vízszintes asztallap,
- 4- tükör,
- 5- mérce,
- 6- a próbasáv rögzítését biztosító terhelés,
- 7- átmérővonal

2.1.4. Szív alakú 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 6. ábra szerint szív alakban összefogott kelmehurok függőleges l hosszából határozzák meg a hajlítómerevséget [2].



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

A torzítatlan hossz (6):

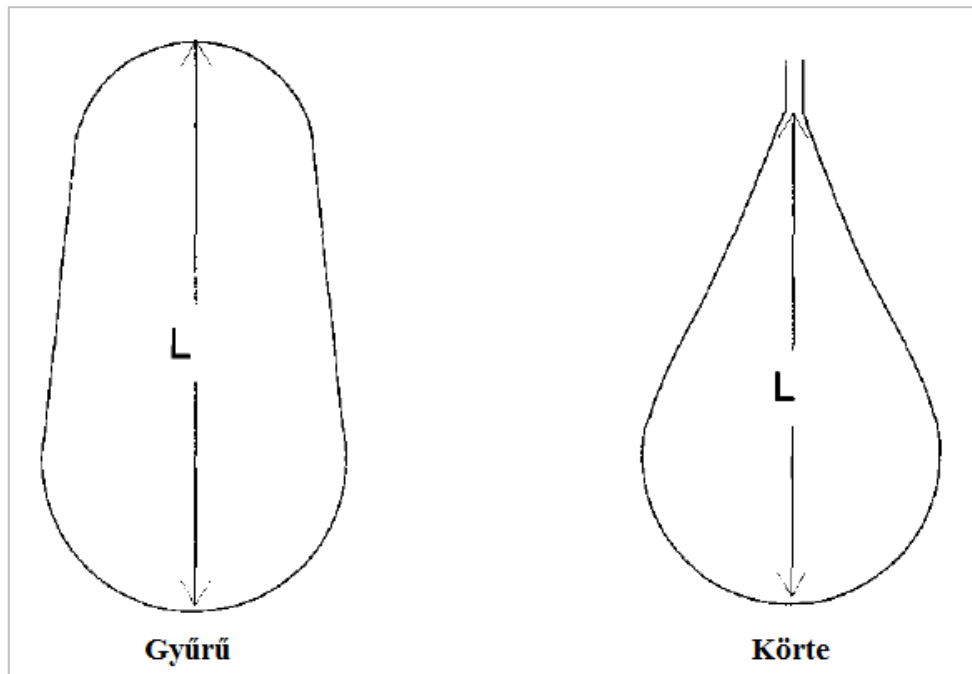
$$l_0 = 0,1337l \quad (6)$$

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 $f_2(\theta) = (\cos\theta/\tan\theta)^{\frac{1}{3}}$.

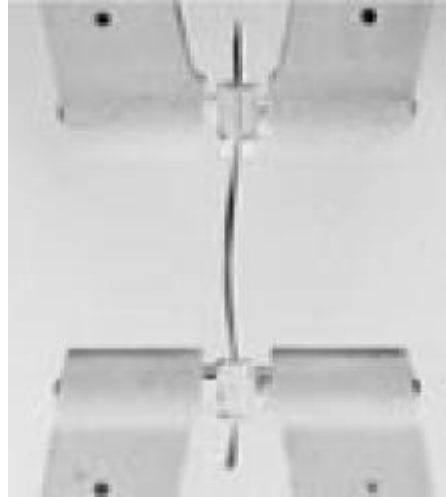
Speciális esetekre további hurok alakokat lehet használni, például gyűrű és körte alakú hurokokat (7. ábra).



7. ábra A gyűrű alakú és körte alakú hurok módszer mérési elrendezése [9]

2.1.5. Szakítógépes Kihajlásmérés

Kocik és munkatársai [10] a hajlítómerevséget úgy vizsgálták, hogy szakítógépen a szövetmintákat összenyomva mérték a kihajlásnál fellépő kritikus erőt.



8. ábra Kocik fële szakítógépes kihajlásmérés közben a kihajlás pillanatában készített felvétel [10]

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 (8. ábra) képfeldolgozással határozzák meg a görbületet. Az így meghatározott hajlítómerevségek és a FAST rendszer hajlítóvizsgáló egységével, azaz Flexometerrel meghatározott hajlítómerevségek lineáris korrelációt mutatnak. A szerzők cikkükben megemlítik, hogy a módszerükkel további vizsgálatokat kell végezni, pl. merevebb minták esetén.

2.2. Hajlítójellemzők meghatározása hajlítónyomaték/erő méréssel

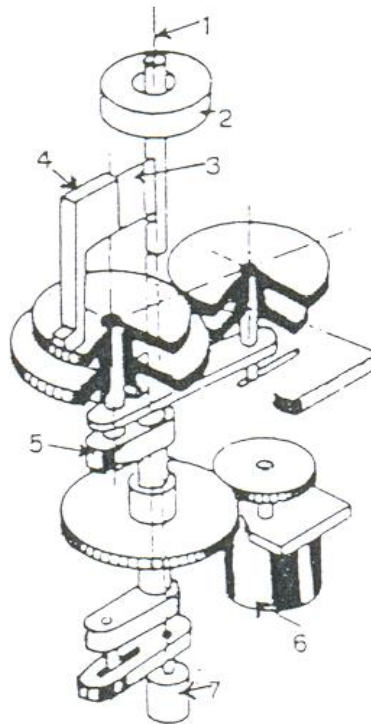
A hajlítójellemzők meghatározásának egy másik módja, amikor a kelme hajlításához szükséges hajlítónyomatékot/hajlítóerőt közvetlenül mérik.

2.2.1. Kawabata Kelmeelemző Rendszer

Sueo Kawabata professzor és társai a textíliák „fogási” tulajdonságainak objektív meghatározására kifejlesztették a Kawabata Kelmeelemző rendszert (KES). A rendszer négy

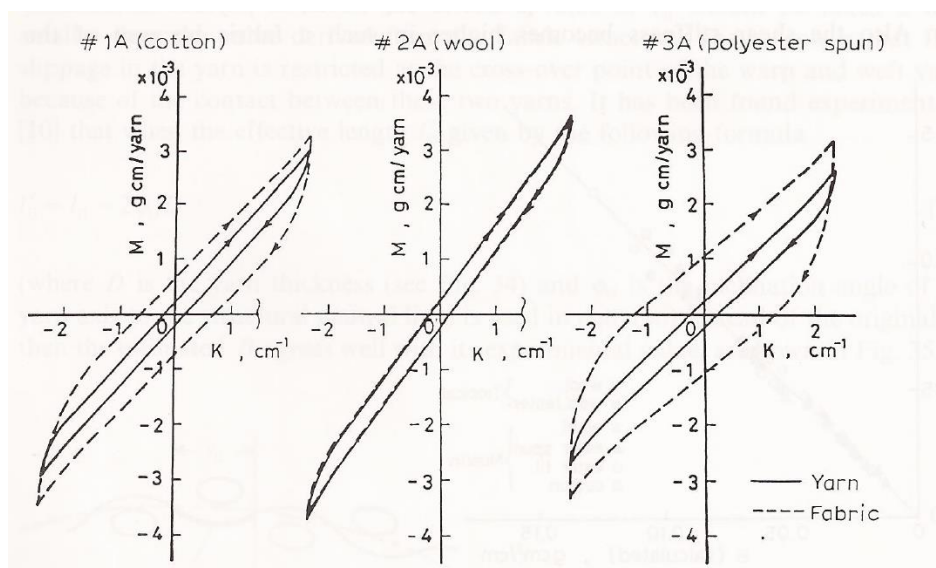
különböző berendezésből áll, amelyekkel húzó és nyíró (KES-FB1), hajlító (KES-FB2) és nyomó (KES-FB3) vizsgálatokat végeznek, valamint meghatározzák a kelme felületi tulajdonságait (KES-FB4) is. Minden mérés roncsolásmentes, ugyanazt a 200 mm x 200 mm-es próbadarabot vizsgálja minden egység. A mérés végeredménye a textíliát jellemző 16 paraméter [11].

A hajlítóvizsgálatnál (KES-FB2) a gép (9. ábra) 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 hajlítónyomatékokat [1]. A hajlítást mindkét irányban elvégzik, a minta szín és fonákoldalán egyaránt.



9. ábra KES-FB2, a hajlítóvizsgálatot végző berendezés elvi vázlata (1. acélhuzal, 2. nyomatékmérő cella, 3. mintadarab, 4. mozgó befogópófa, 5. áttétel, 6. hajtás, 7. görbületmérő cella) [11]

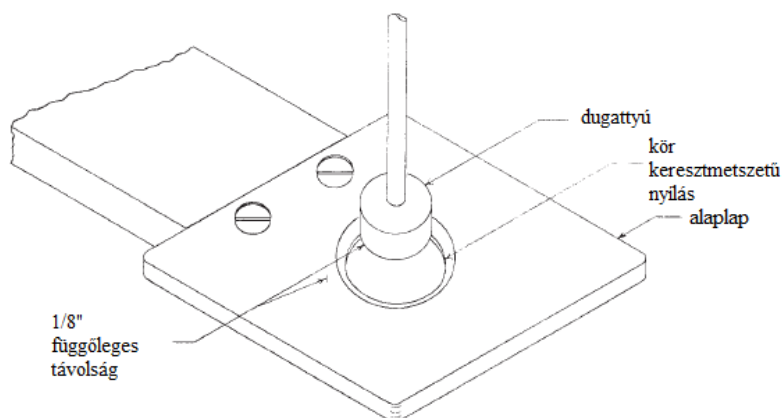
A felvett diagramból (10. ábra) a gép kiértékeli a B hajlítómerevséget és a 2HM hajlítási hiszterézist magasságát. Kawabata a kiértékeléshez a Grosberg modellt használta [12].



10. ábra KES-FB-vel végzett hajlításmérés eredménye pamut (cotton), gyapjú (wool) és sodrott poliészter mintákra

2.2.2. 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 (11. ábra) és közben mérik az átpréseléshez szükséges erőt, azaz a kelme merevségét.



11. ábra A Körkörös Hajlító Eljárás elvi vázlatja és berendezése [13]

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

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

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

3.1. Felhasznált alapanyagok

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 (12. ábra) kialakításakor.



12. ábra Sportpálya ideiglenes téli fedése sátorral

A vizsgálatokat három különböző területi sűrűségű, vászonkötésű poliészter alapszövetű, PVC-vel bevont ponyva anyagon végeztem (13. ábra).



13. 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 ezt a jelölést használom a dolgozatban is. A minták tulajdonságai az 1. táblázatban láthatók.

	FEHÉR	SZÜRKE	BÉZS
Gyártó jelölése	B6000	B7119	C2357
Szálfinomság [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
Átlagos vastagság [mm]	0,65	0,47	0,31

1. Táblázat A vizsgált ponyvák névleges tulajdonságai

3.2. Alkalmazott berendezések és vizsgálati módszerek

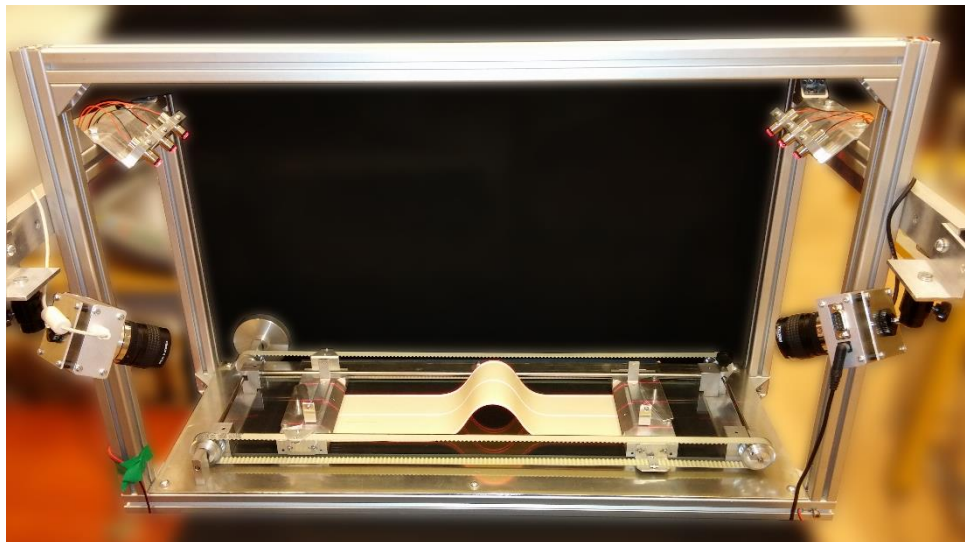
A hajlítójellemzők meghatározásához három berendezést használtam. Az első a Sylvie 3D Bending Tester, amellyel a deformált próbasávok alakjának elemzéséből, mechanikai modell segítségével számíthatók a hajlítójellemzők. Második a Flexometer, amelynek

eredményeit a Sylvie 3D Bending Tester validációjára használtam. A harmadik méréshez szakítógépet használtam.

3.2.1. Sylvie 3D Bending Tester

A Sylvie 3D Bending Tester (14. ábra) hat darab vonallézerrel, két oldalról három lézervonalat vetít a befogott, harang alakban deformált próbasávra, amelyről fényképet készít. A felgyűrődést megjelenítő fényképről, a berendezéshez tartozó képelemző szoftver, a pontok koordinátáit meghatározza.

A berendezést a Polimertechnika Tanszék és MOGI Tanszék közös fejlesztése.



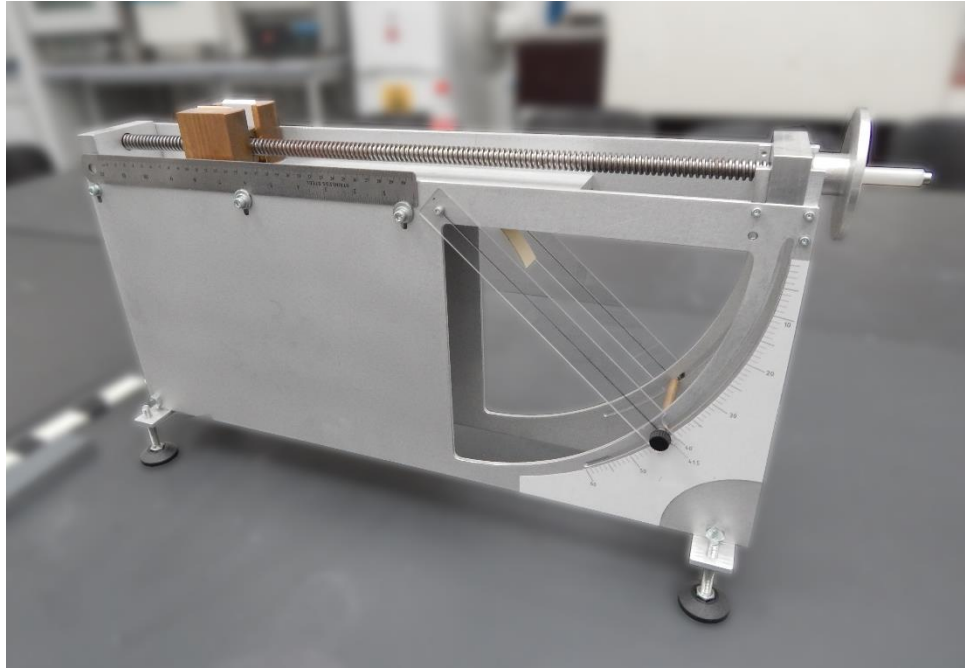
14. ábra A Sylvie 3D Bending Tester

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

A berendezés használatát a 4.1.1 fejezetben ismertetem.

3.2.2. Flexometer

Flexometerrel meghatározható a lapszerű anyagok hajlítással szembeni ellenállása, vagyis a hajlítómerevség, amelyet a hajlítási hosszal jellemezhetünk.



15. A Flexometer mérés közben

A Polimertechnika Tanszéken lévő Flexometert szakdolgozata keretében Sörös Gábor készítette [14].

A konstrukció előnyei a TKI típusú Flexometerhez képest:

- a próbasáv Teflonnal bevont tárgyasztalon csúszik, ami megakadályozza a minta letapadását,
- a mintát leszorító idom alja gumiborítású, hogy elötolás közben megfelelő legyen a tapadás a minta és a vonszolt leszorító idom között,
- megfelelő méréstartomány a merevebb kelmék vizsgálatára.

A méréshez 200 [mm] hosszú és 20 [mm] széles próbasávokat vágtam ki, az MSZ 101/12-64 számú magyar szabvány [15] szerint. Minden ponyvatípusból három kivágási irányt vizsgáltam (láncirány, vetülékirány és 45°-os átlós). A szabvány ajánlása szerint a próbasávok lehajlását színoldallal felfelé, mindkét irányban megmértem, majd átlagoltam.

A 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.

Amennyiben az (5) jelű Peirce-féle hajlítási egyenletbe a lehajlás szögét $\theta = 41,5^\circ - 43^\circ$ helyettesítjük, a hajlítóhossz képlete jelentősen leegyszerűsödik (8):

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

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 (9):

$$C[m] = \frac{l}{2} \quad (9)$$

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

A hajlítónyomaték (10):

$$M[Nm] = G \cdot C^3 \quad (10)$$

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

A rugalmassági modulus (11):

$$E[Pa] = \frac{M \cdot b}{I} = \frac{M \cdot b}{\frac{b \cdot v^3}{12}} = \frac{12 \cdot M}{v^3} \quad (11)$$

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

3.2.3. Zwick-Z250 Szakítógép

A szakítógépes hajlítóvizsgálathoz a tanszék laboratóriumában található Zwick-Z250 típusú szakítógépet (16. 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.



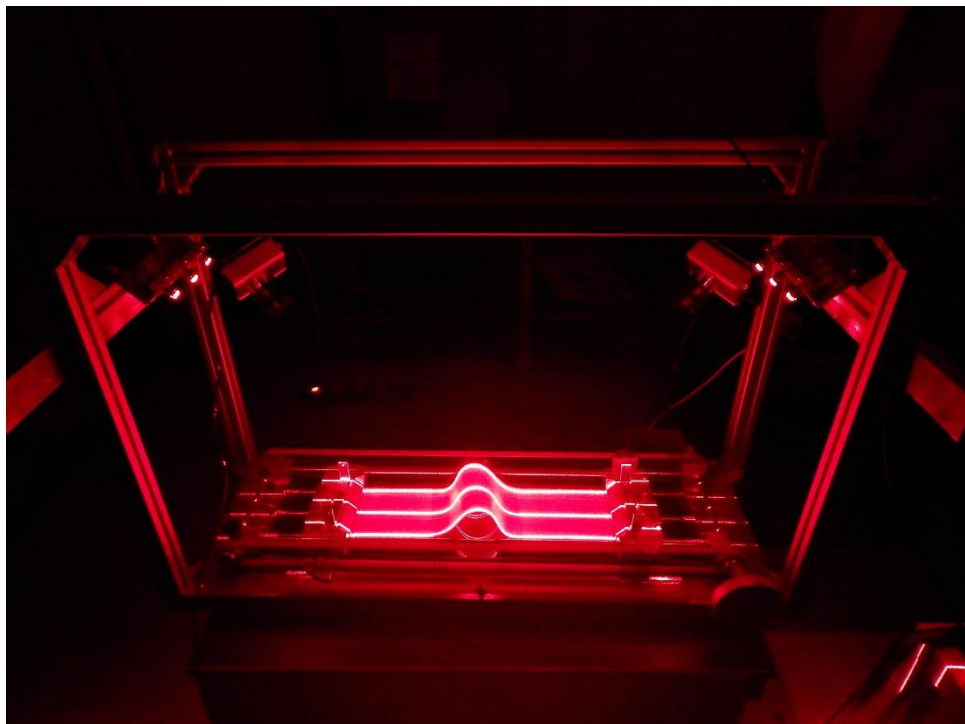
16. ábra Zwick-Z250 típusú szakítógép [16]

4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Ebben a fejezetben bemutatom a Sylvie 3D Bending Tester optikai hajlításmérő berendezés kiértékelő módszerét, amelyet a 2013-as TDK dolgozatom [17] óta továbbfejlesztettem. Ezen kívül megvizsgálom annak a lehetőségét, hogy meghatározható-e a lapszerű anyagok hajlítójellemzői szakítógépen végezhető nyomóvizsgálattal.

4.1. Sylvie 3D Bending Tester

A Sylvie 3D Bending Tester (17. ábra) a 100 mm széles és 500 mm hosszú, harang alakban meghajlított, vonallézerekkel megvilágított próbasávról két fényképezőgép segítségével felvételt készít, amelyből az előzetesen kalibrált képfeldolgozó szoftver meghatározza a görbült alak koordinátáit.



17. ábra A Sylvie 3D Bending Tester mérés közben

Mivel a befogási hossz megrövidítésével létrehozott felgyűrődés bizonyos esetekben kitakarhatja a próbasáv és a lézervonalak egy részét, „vakfoltot” létrehozva, ezért a lézervonalakat két oldalról kell létrehozni 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.

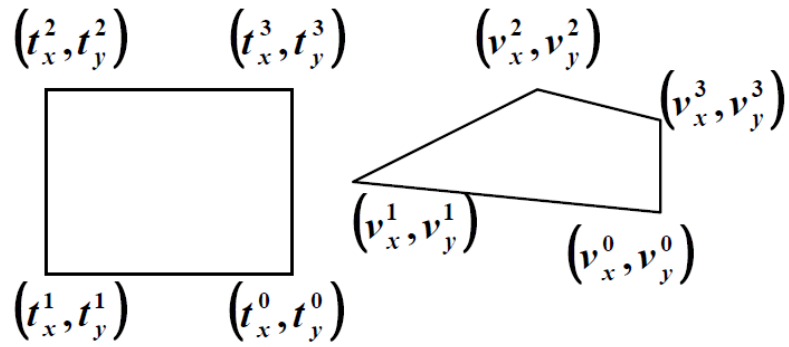
4.1.1. Kalibráció és képfeldolgozás

Mivel a vonallézerek által létrehozott három párhuzamos lézervonalat 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 négyszögből négyszögbe vetítés lineáris perspektivikus transzformáció, amely homogén koordinátákat alkalmaz [19]. Az ehhez szükséges transzformációs mátrix nyolc független koordinátát tartalmaz az alábbiak szerint:

$$P = \begin{bmatrix} p_0 & p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 & p_5 \\ p_6 & p_7 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

A kalibráláshoz egy 100 mm x 100 mm keresztmetszetű elemet használunk, amelynek a sarokpontjaival definiáljuk a transzformációs mátrix koordinátáit. Legyenek a kalibráló elem sarokpontjainak valós koordinátái (t_x^i, t_y^i) , a fényképről leolvasott koordinátái pedig (v_x^i, v_y^i) , $i = (1,2,3,4)$, jelölje a négy sarkot, a 18. ábra szerint.



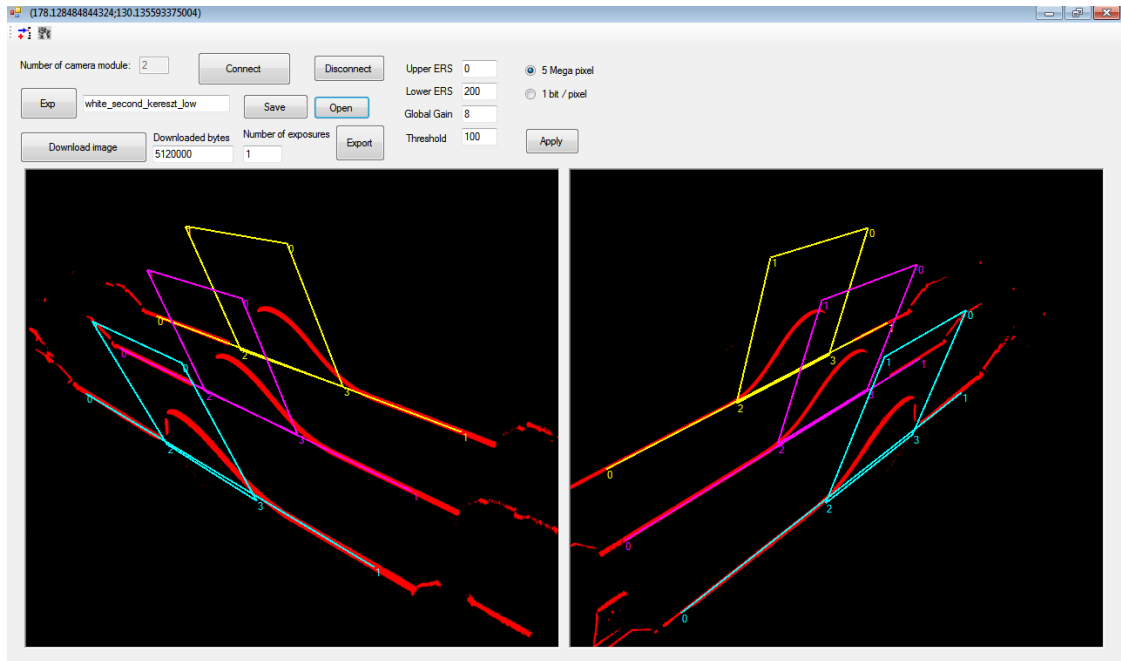
18. ábra Síkbeli perspektivikus projekció

A transzformáció az alábbi egyenlettel írható fel (13):

$$\begin{bmatrix} v_x^i \\ v_y^i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 & p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 & p_5 \\ p_6 & p_7 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_x^i \\ t_y^i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Ebből nyolc egyenletet kapunk, amellyel a nyolc ismeretlen meghatározható.

A kalibrációt, vagyis a sarokpontok kiválasztását a fényképeken (19. ábra), mindhárom lézervonal esetén, mindkét képen el kell végezni.



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

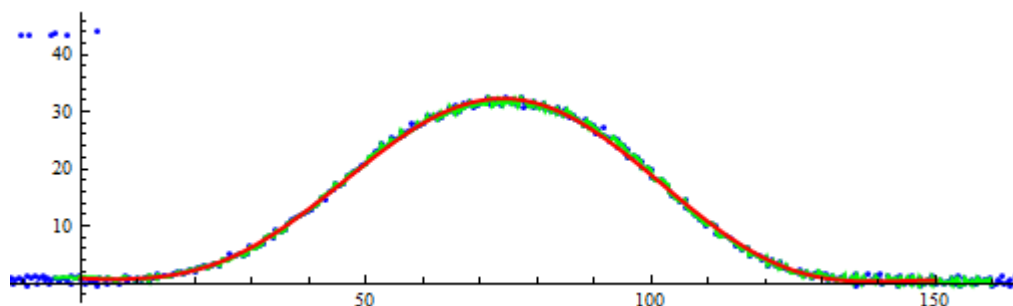
A képfeldolgozás jelenleg egy lézervonal koordinátáit képes exportálni.

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.

4.1.2. A mérési pontok feldolgozása

A képelemző program által kinyert pontokat szűrni szükséges, hogy az esetleges rossz mérési pontok a görbeillesztést ne torzítsák. Ilyen kiugró mérési pontot okozhat pl. a berendezés fém részein megcsillanó lézerefény (20. ábra).



20. 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 le. 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 [18].

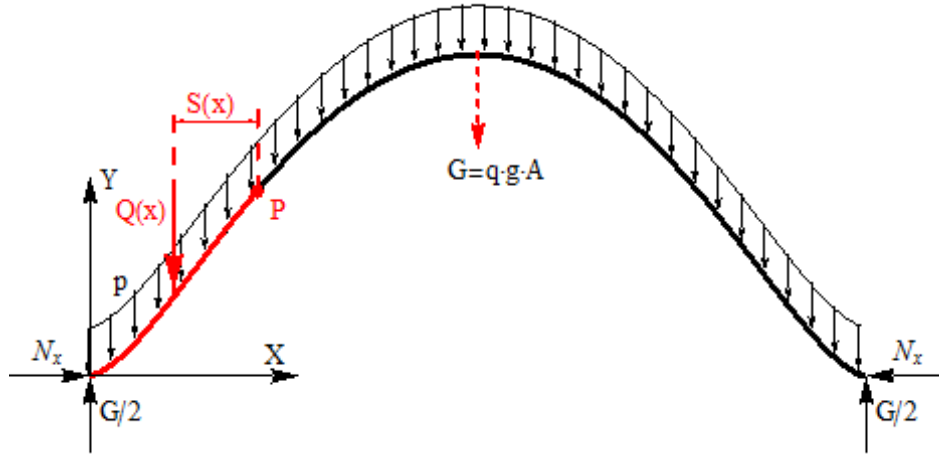
A nyolcadfokú polinom egyenlete:

$$y(x) = a_8 \cdot x^8 + a_7 \cdot x^7 + a_6 \cdot x^6 + a_5 \cdot x^5 + a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (14)$$

Pontok szűrését és a görbeillesztést Wolfram Mathematica 9 programmal végeztem.

4.1.3. Mechanikai modell

A harang alakban meghajlított mintára ható erőket szemlélteti a 21. ábra.



21. ábra A harang alakban meghajlított mintára ható erők

A hajlítónyomaték egy tetszőleges pontra (pl. a P pontra, ld. 21. ábra) (15):

$$M_h(x) = N_x \cdot y(x) - \frac{G}{2} \cdot x + Q(x) \cdot S(x) \quad (15)$$

, 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 (16):

$$G \text{ [N]} = q \cdot g \cdot A \quad (16)$$

, 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.

The megoszló erő (17):

$$p \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right] = q \cdot g \cdot b \quad (17)$$

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

A (15) kifejezésben:

$$S(x) = x - \frac{\int_0^x x \cdot \sqrt{1 + y'^2(u)} du}{\int_0^x \sqrt{1 + y'^2(u)} du} \quad (18)$$

$$Q(x) = p \int_0^x \sqrt{1 + y'^2(u)} du \quad (19)$$

, ahol $p \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$ a megoszló terhelés, azaz a minta hosszegységre eső súlya, $S(x)$ [m] a súlypont helye és $Q(x)$ [N] a súlypontba redukált megoszló erőrendszer.

A rugalmas szál differenciálegyenlete

$$y''(x) = - \frac{M_h(x) \cdot (1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}}{I_z \cdot E} \quad (20)$$

, ahol $I_z [\text{m}^4]$ a keresztmetszet másodrendű nyomatéka és $E [\text{Pa}]$ a modulus.

A (15) egyenletet a (20) egyenletbe helyettesítve és átrendezve kapjuk a kiértékeléshez használt differenciálegyenletet (21):

$$f(x) = Dy''(x) + \left(N_x y(x) - \frac{1}{2} q g A x + q g b \int_0^x \sqrt{1 + y'^2(u)} du \left[x - \frac{\int_0^x x \cdot \sqrt{1 + y'^2(u)} du}{\int_0^x \sqrt{1 + y'^2(u)} du} \right] \right) (1 + y'^2)^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (21)$$

A hajlítási merevség (22):

$$D [\text{Nm}^2] = I_z \cdot E \quad (22)$$

Az (21) 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.

4.1.4. Sylvie 3D Bending Tester-rel meghatározott hajlítómodulus

A Sylvie 3D Bending Tester berendezéssel meghatározott hajlítómodulus értékeket az 2. táblázat tartalmazza.

SYLVIE 3D BENDING TESTER			
KIVÁGÁSI IRÁNY	MINTA	HAJLÍTÓMODULUS [MPa]	RELATÍV SZÓRÁS [%]
LÁNCIRÁNY	FEHÉR	85.3	11.6
	SZÜRKE	75.1	7.4
	BÉZS	111.0	4.2
VETÜLÉKIRÁNY	FEHÉR	155.4	6.7
	SZÜRKE	144.5	2.1
	BÉZS	72.8	10.7
ÁTLÓS	FEHÉR	93.9	16.7
	SZÜRKE	65.4	2.9
	BÉZS	90.2	5.3

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

4.2. Mérések Flexometerrel

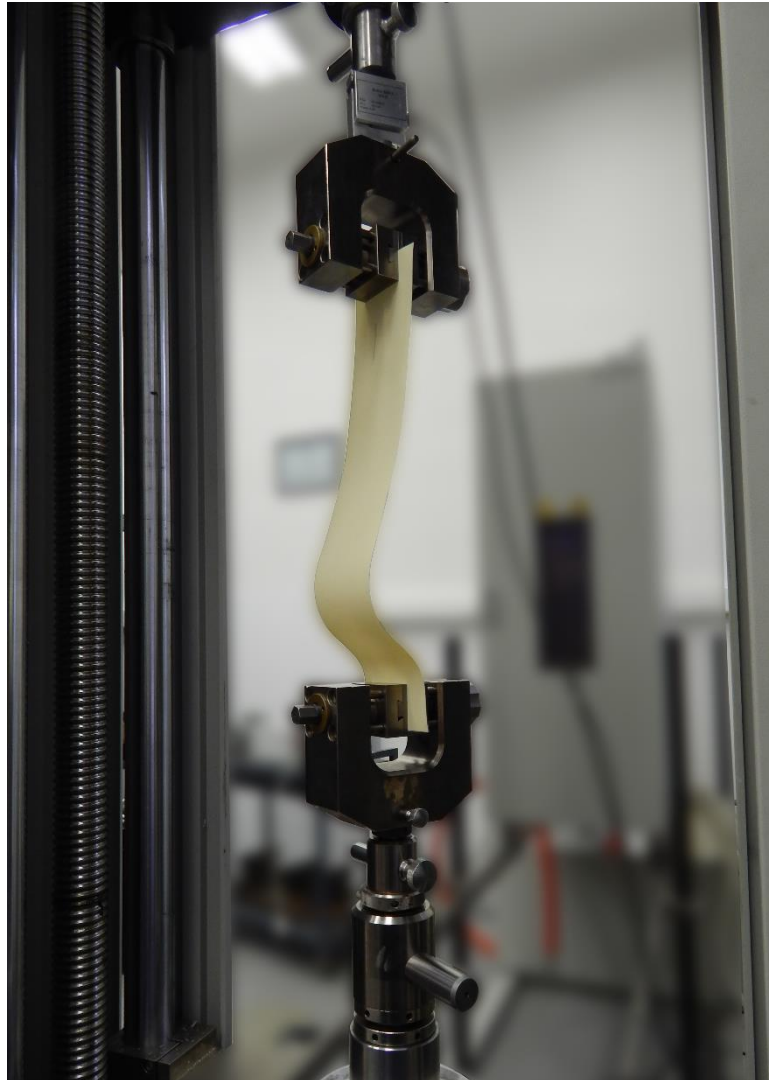
A Flexometerrel meghatározott hajlítóhosszból a 3.2.2 fejezetben leírt képletek felhasználásával kiszámoltam a próbasávok átlagos hajlítómerevségét és rugalmassági modulusát. Az eredményeket a 3. táblázat mutatja.

FLEXOMETER			
KIVÁGÁSI IRÁNY	MINTA	HAJLÍTÓMODULUS [MPa]	RELATÍV SZÓRÁS [%]
LÁNCIRÁNY	FEHÉR	83,3	1,25
	SZÜRKE	79,0	4,1
	BÉZS	52,8	7,78
VETÜLÉKIRÁNY	FEHÉR	49,7	4,0
	SZÜRKE	59,8	3,4
	BÉZS	56,0	6,6
ÁTLÓS	FEHÉR	40,3	8,2
	SZÜRKE	27,8	6,8
	BÉZS	32,3	9,2

3. táblázat A Flexometer-rel meghatározott hajlítómodulus

4.3. Szakítógépes kihajlásvizsgálat

A szakítógépes kihajlásvizsgálat ötletét Kocik és társai [10] munkája adta. A vizsgálatot Zwick-Z250 típusú szakítógépen végeztem.

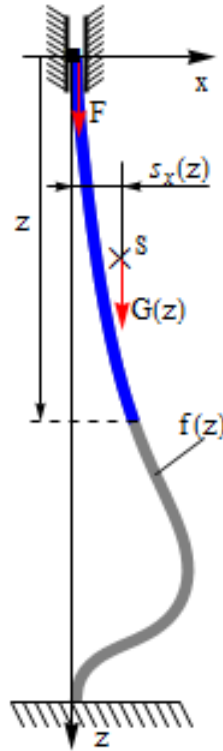


22. ábra Kihajlásvizsgálat szakítógéppel

A méréshez ugyanazokat a próbatesteket használtam, amelyeket a Sylvie 3D Bending Tester-rel. 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. A

befogás után a mintákat 0,5 N erővel meghúzáva (előterhelve) indult a vizsgálat, majd a mintákat 20 mm/perc keresztfej sebességgel, 40 mm-rel nyomtam össze.

A szakítógépes kihajlásmérés mechanikai modelljét a Sylvie 3D Bending Tester modelljéhez hasonlóan írtam fel. A 23. ábra a mérés modelljét mutatja.



23. ábra A szakítógépes kihajlásmérés modellje

Az ívhossz (23):

$$l(z) = \int \sqrt{1 + f'(z)^2} dz \quad (23)$$

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

A súlypont helye x irányban (24):

$$S_x(z) = \frac{\int f(z) \cdot \sqrt{1 + f'(z)^2} dz}{l(z)} \quad (24)$$

A kelme súlya (25):

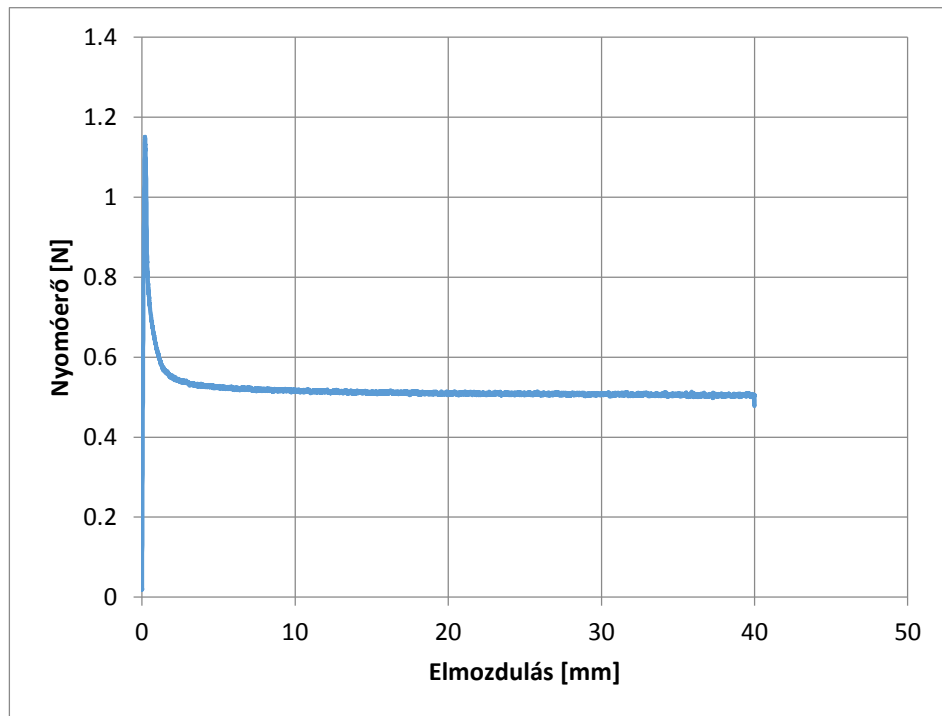
$$G(z) = \rho A g l(z) \quad (25)$$

ahol $l(z)$ a minta hossza.

A hajlító nyomaték (26):

$$M_h(z) = f(z) \cdot F + G(z)[f(z) - S_x(z)] \quad (26)$$

A hajlítónyomatékot a rugalmas szál differenciálegyenletébe (20) helyettesítve lehet a hajlítómerevséget számítani. Azonban a Sylvie 3D Bending Tester-rel történő méréssel szemben itt a deformált alakot leíró függvény nem áll rendelkezésre. A mérés során felvett erő-elmozdulás görbéből (24. ábra) az összenyomáshoz szükséges erő ismerete nem elegendő az integro-differenciálegyenlet megoldásához.

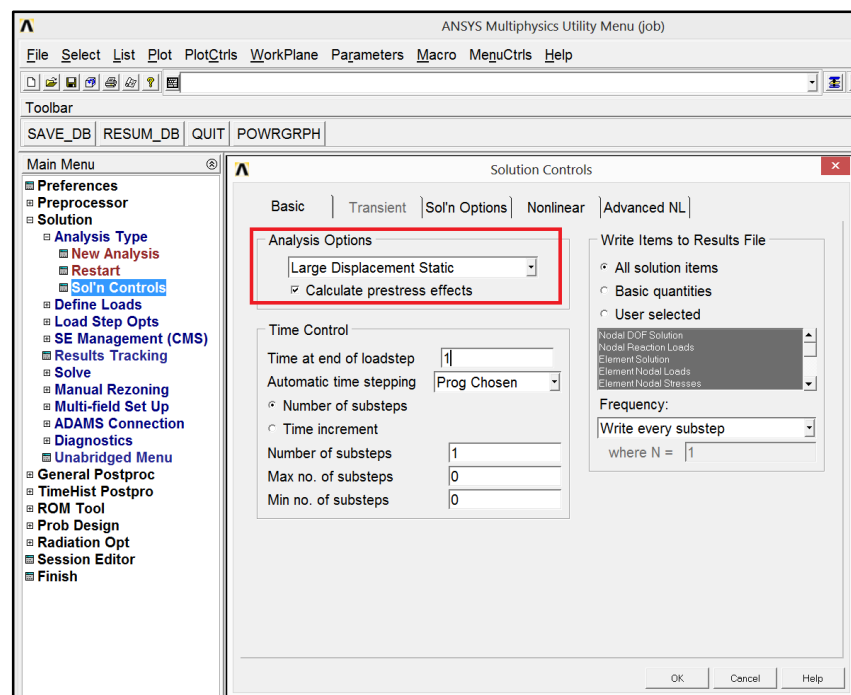


24. ábra A szakítógépes kihajlásvizsgálat során felvett tipikus erő-elmozdulás diagram

4.3.1. Végelelemes analízis

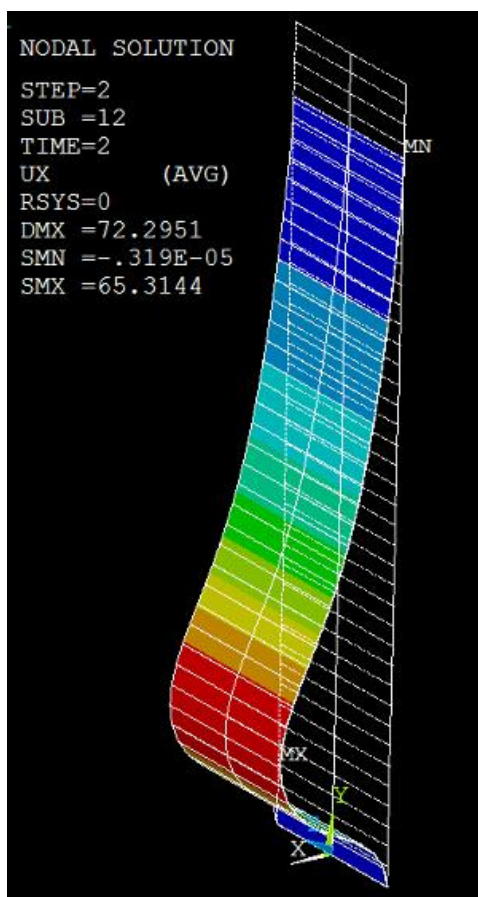
Ansyes 14.5 végelelem program segítségével, 40 db rúdelem (BEAM3D finate strain, elemenként három csomópont) alkalmazásával létrehoztam a próbatest modelljét. A nagy elmozdulások miatt szükséges ezt az elemet használni, azonban a 3D elem felesleges szabadságfokait le kell kötni a síkfeladat megoldásához (az új Ansyes programban már nincsen külön 2D elem). A modellezett próbatest 424 mm hosszú, azaz ugyanakkora, mint a Sylvie 3D mérésnél és a szakítógépes mérésnél 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 csomópontra a vízszintes elmozdulást (ez a kihajlás utáni, ún. post-buckling állapot leírására szükséges [5]). A második lépéstől ezt a zavarást megszüntetem, a program iterálja az egyensúlyi állapothoz tartozó elmozdulásmezőt.

Az analízis során bekapcsoltam a geometriai nemlinearitást figyelembe vevő eljárást (25. ábra), vagyis a nagy elmozdulások kezelését (Large Displacement Static), és azt, hogy minden terhelési lépés kiinduló állapota az előző lépés legyen (Calculate Prestress Effects).



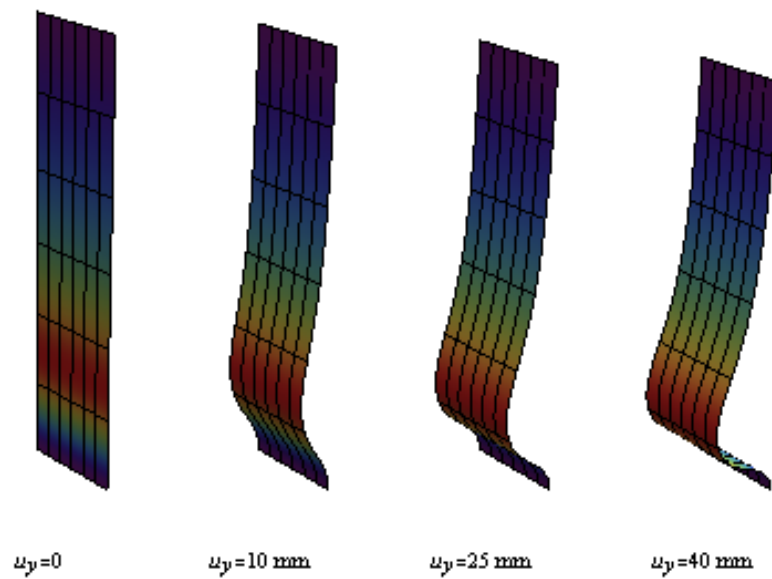
25. ábra Az alkalmazott beállítások

A hosszirányban kivágott BÉZS minta végeselemes modellje látható a 26. ábra. Az anyagjellemzőket a Sylvie 3D méréssel határoztam meg, a BÉZS hosszirányú minta rugalmassági modulusza 111 MPa.



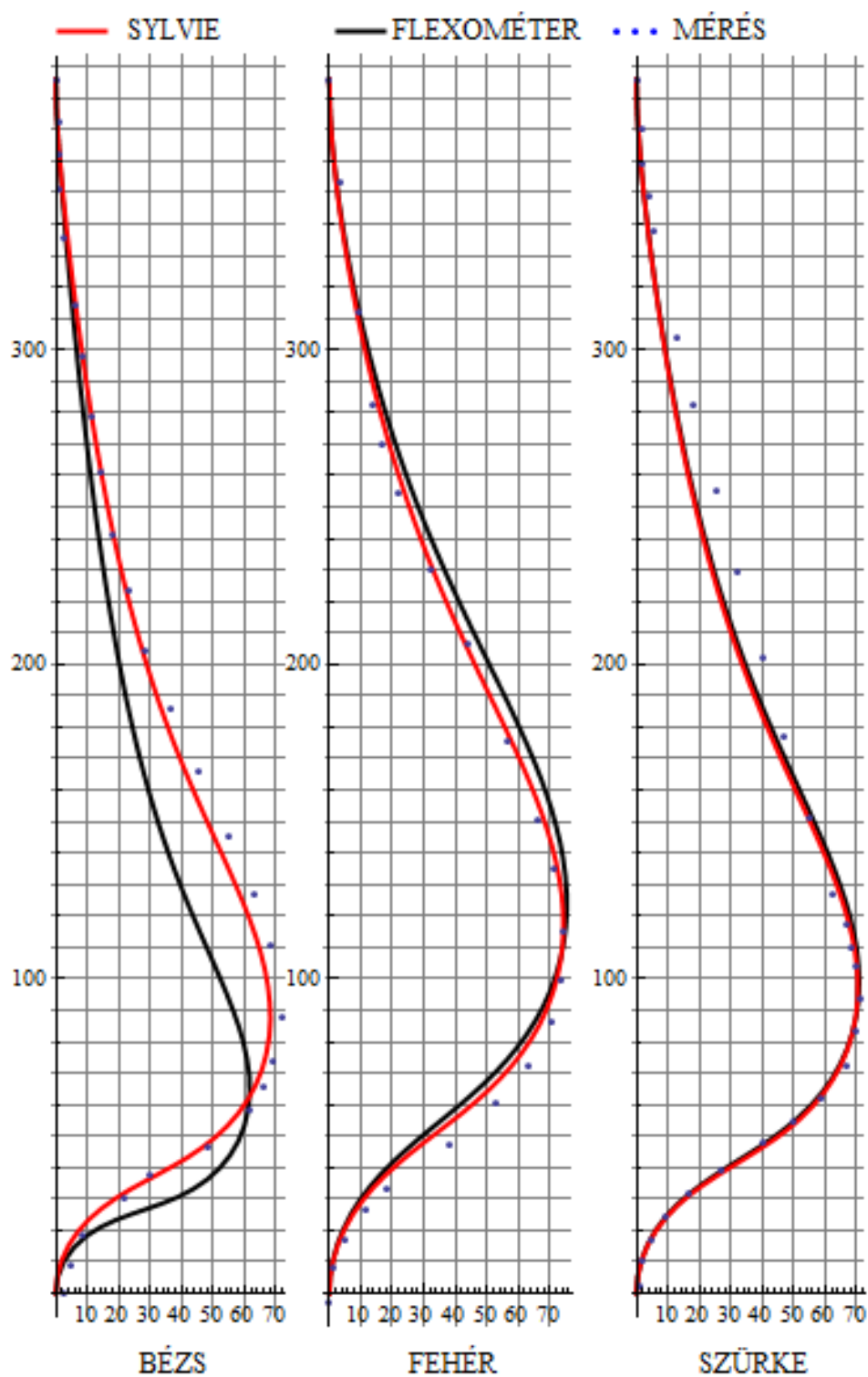
26. ábra A hosszirányban kivágott BÉZS minta modellje

A különböző mértékben összenyomott modelleket a 27. ábra mutatja.



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

Ha a végeselemes analízis eredményét összevetjük a mérés során készült fényképpel (28. ábra), akkor látható, hogy a modell jellege megfelel a valóságnak (a fénykép nézőpontja és az összenyomás mértéke kismértékben különböző).



28. 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)

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Lapszerű anyagok hajlítási jellemzőinek meghatározása fontos terület, amelynek eredményei viselkedésük modellezéséhez, szimulációjához elengedhetetlenül szükségesek. A jelenleg rendelkezésre álló módszereket azonban főleg ruházati- és lakástextíliák vizsgálatára fejlesztették ki, méréstartományuk és pontosságuk a textilipari követelményekhez igazodik. A Polimertechnika Tanszék és a Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék által közösen kifejlesztett Sylvie 3D Bending Tester berendezés segítségével a hajlítási jellemzők egy újszerű, optikai mérési elvet alkalmazva, a meghajlított minták alakjának elemzéséből határozhatók meg. Ezzel a módszerrel hajlékony lapszerű anyagok vizsgálhatók például ponyvák, kompoziterősítő anyagok.

5.1. Eredmények

A TDK dolgozatomban célja a Sylvie 3D Bending Tester kiértékelésének továbbfejlesztése és további teszt mérések elvégzése volt. Korábbi munkámhoz képest továbbfejlesztettem a mechanikai modellt, és a rugalmas szál differenciálegyenletének egyszerűsített alakja helyett nagy szögelfordulások esetén is alkalmazható változatát építettem be a számításokba. Továbbfejlesztettem a képfeldolgozást is a mérési pontok szűrésének automatizálásával.

Mivel a Sylvie 3D Bending Tester a vizsgálat során erőket nem mér, megvizsgáltam annak a lehetőségét, hogy egy hagyományos szakítógéppel kihajlást mérve meghatározhatók-e a lapszerű anyagok hajlítási jellemzői. A mérés mechanikai modelljét a Sylvie 3D Bending Tester modelljéhez hasonlóan írtam fel, amelynek kiértékeléséhez itt is szükségesek az alaki információk. A szakítógépes mérés elemzéséhez készítettem egy vége-selembes modellt. A modell anyagtulajdonságainak megadásánál a Sylvie 3D Bending Tester-rel meghatározott rugalmassági modulust alkalmazva az analízis eredménye jellegre megegyezik a mért alakokkal.

A Flexometer-rel és a Sylvie 3D Bending Tester-rel meghatározott hajlítójellemzőket a 4. táblázat tartalmazza. Az hajlítómerevség eredmények mindkét módszerrel a vártnak megfelelően alakultak, a legvastagabb minta merevsége a legnagyobb, a legvékonyabbé pedig a legkisebb. A hajlítómódulus esetében már nem jelentős a különbség a különböző ponyvafajták között, ez belátható, hiszen a modulus független a vastagságtól. A különböző mérési módszerekkel meghatározott eredmények, habár egy nagyságrendbe esnek, néhol jelentős különbség tapasztalható. Például, a hosszirányú BÉZS minta hajlítómódulusa

Flexometerrel megközelítőleg fele akkora adódik, mint Sylvie 3D Bending Tester-rel mérve. A véges elemes analízisnél a Sylvie 3D berendezéssel meghatározott értékkel a valóságnak megfelelő deformált alak jön létre. Ez azt bizonyítja, hogy a mérés és a kiértékelés megfelelő. Az eltérést feltételezhetően a Flexometer kiértékelésénél alkalmazott egyszerűsítések és elhanyagolások okozzák.

5.2. További feladatok

További vizsgálatok elvégzése a Sylvie 3D Bending Tester-rel, a ponyvákon kívül egyéb hajlékony lapszerű anyagok hajlító tulajdonságainak feltárására.

Flexometer kiértékelésének továbbfejlesztése a próbasáv alakjának beolvasásával.

További megoldandó feladat, a szakítógépes kihajlásmérő vizsgálat kiegészítése fénykép készítésével, a deformált alakot leíró függvény meghatározására. Amennyiben ez rendelkezésre áll, a mérési eredményekből számíthatók lesznek a hajlítójellemzők, amelyek felhasználhatók a Sylvie 3D Bending Tester mérés validációjára.



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. J. Geršak, M. Halász: Complex Fabric Deformation and clothing modeling in 3D. Lambert Academic Publishing, London (2013).
7. 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).
8. 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).
9. Saville B.P: Physical testing of textiles. Woodhead Publishing Limited. Cambridge, England (2000)
10. 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).
11. Chou T.W, Ko F.K.: Textile Structural Composites. *Composite Materials Series*, 94-99 (1989).
12. 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).
13. ASTM D 4032 –08 (2009) Standard Test Method for Stiffness of Fabric by the Circular Bend Procedure (2009).

14. Sörös G.: Cím. Hajlékony textile és kompozit lapok hajlítóvizsgálat (BSc Szakdolgozat). BME (2014).
15. MSZ 101/12-64 Szövetek hajlítással szembeni ellenállásának vizsgálat.
16. <http://pt.bme.hu> (2014.10.01)
17. Tatár N.: Hajlékony lapszerű anyagok hajlításmérési módszereinek összehasonlítása, TDK dolgozat, BME, (2013).
18. Vas L. M.: Textilanyagok szerkezeti elemzése számítógépes modellezéshez. BME Kutatási tanulmány, (2003).
19. Szabó L.: Képkalkulációra alapozott ruhaipari mérés technikák, Phd dolgozat, BME (2008).

7. 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	$1,91 \cdot 10^{-4}$	83,3	1,3	$1,96 \cdot 10^{-4}$	85.3	11.6
	SZÜRKE	$0,69 \cdot 10^{-4}$	79,0	4,1	$0,65 \cdot 10^{-4}$	75.1	7.4
	BÉZS	$0,13 \cdot 10^{-4}$	52,8	7,8	$0,28 \cdot 10^{-4}$	111.0	4.2
Vetülek	FEHÉR	$1,13 \cdot 10^{-4}$	49,7	4,0	$3,56 \cdot 10^{-4}$	155.4	6.7
	SZÜRKE	$0,52 \cdot 10^{-4}$	59,8	3,4	$1,3 \cdot 10^{-4}$	144.5	2.1
	BÉZS	$0,13 \cdot 10^{-4}$	56,0	6,6	$0,18 \cdot 10^{-4}$	72.8	10.7
45°	FEHÉR	$0,92 \cdot 10^{-4}$	40,3	8,2	$2,14 \cdot 10^{-4}$	93.9	16.7
	SZÜRKE	$0,24 \cdot 10^{-4}$	27,8	6,8	$0,57 \cdot 10^{-4}$	65.4	2.9
	BÉZS	$0,08 \cdot 10^{-4}$	32,3	9,2	$0,22 \cdot 10^{-4}$	90.2	5,3

4. táblázat A ponyva minták hajlítójellemzői Flexometer-rel és Sylvie 3D Bending Tester-rel mérve