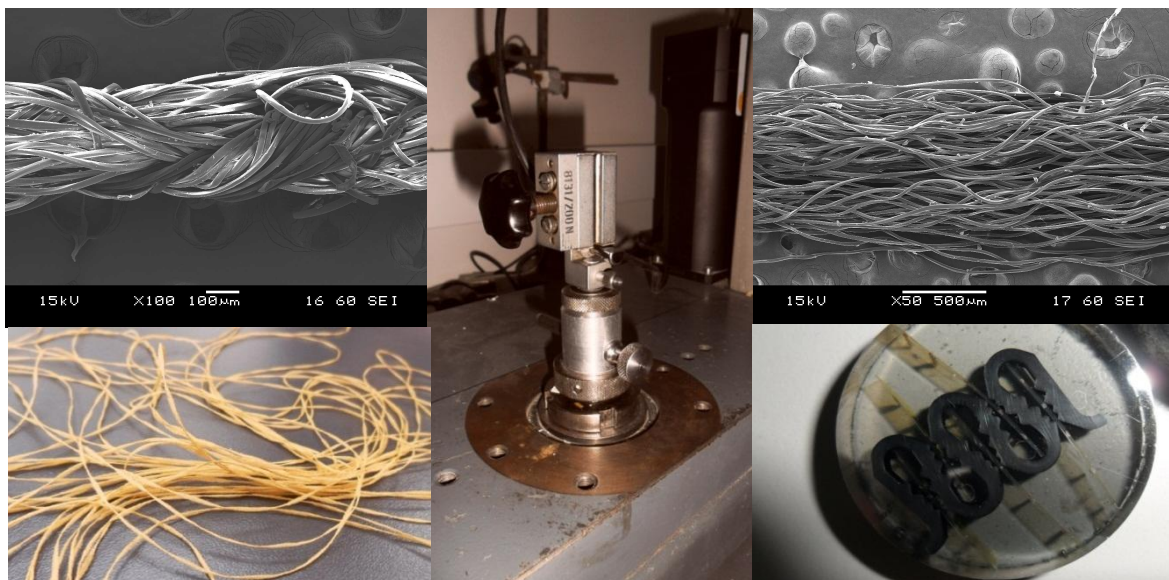




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Polimertechnika Tanszék

HAJLÉKONY KOMPOZIT LAP ÉPÍTŐELEMEINEK SZERKEZETI, SZILÁRDSÁGI VIZSGÁLATA ÉS MODELLEZÉSE

TDK – munka



Huszár Zsuzsanna Anett és Kovács Alexandra Csilla

Konzulensek:

Dr. Halász Marianna, Prof. Dr. Vas László Mihály és Al-Gaadi Bidour

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. Irodalomkutatás	5
2.1 Hajlékony kompozit lap és felhasználása	5
2.2 Az erősítő szálak típusai és tulajdonságai	7
2.3 A szálak és a fonal mikroszkópos vizsgálatai	10
2.4 Elemi szálak és fonalak szakító vizsgálata	12
2.5 A fonalszilárdság Peirce-féle modellje	16
3. Szerkezeti vizsgálatok	18
3.1 Felhasznált berendezések	18
3.2 Optikai mikroszkópos vizsgálatok	21
3.3 Elektronmikroszkópos vizsgálatok	27
3.4 Következtetések, érdekességek	32
3.5 Kiértékelés	34
4. Szilárdsági vizsgálatok	39
4.1 Felhasznált berendezések	39
4.2 Vizsgálat menete	40
4.3 I. méréssorozat és értékelése	40
4.4 II. méréssorozat és értékelése	45
4.5 III. méréssorozat és értékelése	47
5. Összefoglalás és további célkitűzések	53
Köszönetnyilvánítás	56
Irodalomjegyzék	57
Melléklet	58

1. Bevezetés

A kompozitok nagyon fontos szerepet játszanak a műszaki gyakorlatban. Olyan többfázisú rendszerekről van szó, amelyekben a nagyszilárdságú erősítőanyag és a szívós mátrixanyag között erős adhéziós kapcsolat van. Az általunk vizsgált hajlékony lapszerű kompozitokat poliészter anyagú szövetből (erősítőanyag) és PVC-ből (mátrix) készítik úgy, hogy a poliészter szövetet mindkét oldalán bevonják PVC-vel, miközben a PVC a szálak közé hatolva át is itatja a szövetet [6]. Az ilyen típusú kompozitoknak számos alkalmazási területe ismert. Megtalálhatóak az építőiparban, a tetőszerkezetek elemeiként, valamint a tehergépkocsik, kamionok ponyvái, különböző védőburkolati ponyvák, kisebb-nagyobb sátrak, felfújható szerkezetek készülnek belőlük. A ponyva-termékekre általában jellemző a nagymértékű mobilitás és a kis karbantartási igény. Jó szilárdsági tulajdonságaik mellett olcsók, sokrétűen felhasználhatók, összehajtogatva kis helyen elférnek, könnyen szállíthatók, kis tömegűek; köszönhetően a kompozit szerkezetnek [10].

A termékek tervezése ma már szinte minden területen számítógépes tervezőrendszerek segítségével történik. Ekkor azonban szükséges az alkalmazott alapanyag mechanikai viselkedését leíró anyagmodell. A hajlékony lapszerű kompozit anyagmodelljének felállításakor szükséges a struktúra minden egyes szintjének vizsgálata és modellezése. Vizsgálni kell tehát az elemi szálakat és a fonalat, az ezekből készült szövetet, valamint a szövet PVC-vel történő bevonásával készült ponyvát.

Jelen dolgozatunk célja ennek a komplex kutatásnak az első lépése, azaz a hajlékony kompozit lap legelemibb építőköveinek, az erősítőszövet poliészter alapanyagú multifilament, más néven roving típusú fonalainak szerkezeti és szilárdsági vizsgálata, valamint modellezése.

A Polimertechніка Tanszéknek eddig nem volt lehetősége ilyen típusú anyag minden egyes alkotóelemét külön tanulmányozni, mivel nem jutott hozzá az effajta alapanyagokhoz. A Magyar – Marokkói TÉT kutatási program létrejöttének eredményeképpen a ponyva minden egyes szerkezeti elemét megkapjuk, tekintve, hogy a marokkói egyetemnek megvan a megfelelő anyaga és technológiája mind a szövet, mind a kompozitlap előállításához.

2. Irodalomkutatás

Irodalomkutatásunkat a kompozitot alkotó építőelemek megismerésével kezdtük. Munkánk során kitértünk a szálak, illetve fonalak típusaira, felépítésére, geometriai és szilárdsági vizsgálatának módszereire. Kutattuk milyen matematikai/statisztikai modellek léteznek a fonalak szilárdsági tulajdonságainak leírására.

2.1 Hajlékony kompozit lap és felhasználása

A ponyvaszerkezetek az építészeti és mérnöki létesítmények sajátos elemei. A szerkezetalkotó anyag rendkívül vékony, hajlékony, csak húzást és némi nyírást képes felvenni, ami jelentősen korlátozza a beépítés lehetőségeit. Az anyag e mellett rendkívül könnyű, ami miatt viszont nagyon alkalmas hordozható, vagy nagy fesztávolságú szerkezetek építésére.

A műanyagok megjelenéséig statikailag méretezett sátrakat nem építettek. A nylon szálak textíliákból viszont már megbízható és időt álló szerkezeteket lehetett létesíteni.

A mérnöki ponyvaszerkezetek úttörője Otto Frei német építész volt, aki a II. világháború után kezdte el munkásságát. Az általa készített első műszaki ponyvaszerkezet (1. ábra) egy körhinta lefedésére szolgált.



1. ábra Otto Frei által tervezett műszaki ponyvaszerkezet [6]

Magyarországon csak a 70-es években készültek el az első hazai tervezésű sátrak, elsőként a győri AFIT sátor (2. ábra) 1973-ban.



2. ábra A győri AFIT sátor ponyvaszerkezete [6]

A ponyvaszerkezetek és a velük rokon kábelszerkezetű tetők a 70-es években élték reneszánszukat, de azóta is számtalan szerkezet épül. Ezek rendszerint nagy fesztávú sportlétesítmények, repülőterek, rendezvények nagyméretű létesítményei.

Jellemzően kétféle sátorszerkezet készül: feszített és légtartós. A feszített sátrak esetén a peremei közé feszített ponyvaszerkezet önmaga hordja a terheit. A légtartós sátrak esetén a bezárt levegő túlnyomása biztosítja a teherviselést.

Az elmúlt évtizedek alatt sokat fejlődtek a ponyvaszerkezetekhez alkalmazott anyagok. Egyre jobb és időállóbb polimer anyagokat alkalmaznak, és a szövetek szálszerkezete is egyre kedvezőbb mechanikai tulajdonságokkal bír. A legelterjedtebb anyag ma is a poliészter, esetleg a poliamid szálas PVC bevonatú szövet. A szálszerkezet szövet jellegű, mely régebben vászonszövessel, ma inkább panamaszövessel készül.

Egy pár példa a sokoldalú felhasználási módra (3-6. ábra):



3. ábra Utánfutóponyvák - Ponyvamester Kft [10]



4. ábra Légtartós sátrak Spandome Kft.[11]



5. ábra Feszített sátorszerkezetek [11]



6. ábra A müncheni olimpiai csarnok (épült: 1972) és annak klasszikus szerkezetét idéző floridai stadion, a Rays Ballpark (épül: 2012) [12,13]

2.2 Az erősítő szálak típusai és tulajdonságai

A szálanyagok származás szerint két fő csoportba oszthatók: természetes és mesterséges szálakra. Az általunk vizsgált poliészter fonal a mesterségesen előállított anyagok közé tartozik. A mesterséges szálakat természetben előforduló vagy mesterségesen előállított – szerves vagy szervetlen – anyagokból vegyi vagy fizikai eljárásokkal állítják elő. A poliészter fonal esetén a mesterséges szálak csoportján belül

egy szintetikus polimer szárlól van szó, vagyis az alapanyagát képező makromolekulákat vegyi reakcióval, mégpedig esetünkben dikarbonsav monomerből polikondenzációval állítják elő. A szálak lineáris óriásmolekulákból, ún. láncmolekulákból épülnek fel. A szintetikus úton, szálgyártás céljára előállított PES polimereket általában $1 \times 10^{-7} \dots 5 \times 10^{-7}$ m hosszúságú láncok alkotják.

A szálanyag elnevezés a textilipari nyersanyagok külső megjelenési formájára utal; fő jellemzőjük a szálszerű alak, tehát aránylag nagy hosszúság mellett a rendkívül kis átmérő. A hosszuk (h) és az átmérőjük (d) közötti viszony több ezres nagyságrendű is lehet [1].

$$\frac{h}{d} = 1000 \dots 5000 \quad (1)$$

Felhasználási terület

A különböző nyersanyagú szálaknak, köztük a poliészter szálaknak számos felhasználási területe ismert, az 1. táblázat mutatja a fontosabbakat:

Szálfajta	Kő-tőt-táru, alsó-ruházati célra	Kő-tőt-táru, felső-ruházati célra	Női ruha, blúz és ing	Öl-töny és fel-öltő	Ház-tartási sző-vev, ágynemű	Bűtor-és de-korá-ció szövet	Fűg-öny	Sző-nyeg	Taka-ró	Mun-ka-ruha	Bélés, ernyő és nyak-kendő	Csip-ke, paszo-mány	Haris-nya, zokni	Védő-ruház-at	Mű-szaki fel-hasz-nálás
Pamut	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		×
Len			×		×	×				×	×				×
Gyapjú	×	×	×	×		×		×			×	×	×		×
Hernyóselyem			×			×					×				×
Viszkóz (szál)	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×		×
Viszkóz (filament)		×	×		×	×					×	×	×		
Réz-oxid (szál)		×	×			×		×			×	×			
Réz-oxid (filament)		×	×			×					×	×			
Acetát (szál)	×	×	×	×		×					×	×			
Acetát (filament)		×	×			×	×				×				×
Úveg-szál						×								×	×
Poliészter (szál)	×	×	×	×		×					×			×	×
Poliészter (filament)		×	×	×		×	×				×			×	×
Poliamid (szál)		×	×	×	×	×		×		×	×	×	×	×	×
Poliamid (filament)	×	×	×			×		×		×	×	×	×	×	×
Poli(vinil-klorid) (szál)		×				×			×					×	×
Poliakrilnitril (szál)	×	×	×	×		×		×	×				×	×	×
Polipropilén (szál)		×				×		×	×					×	×

1. táblázat Jelentősebb szálfajták fontosabb felhasználási területei [1]

Szálak gyártása

A mesterséges szálak gyártásának elvi lépései a következők:

Az alapanyagot folyékonyra teszik oldással vagy ömlesztéssel, és ezzel alakítható állapotba hozzák. A szálhúzás, ill. szálképzés az oldat vagy ömledék apró furatokon való

átsajtolásával, majd az így képződő szálfolyamok szilárdításával történik. A szilárdításnak több módszere ismeretes. A szálfolyamokat kicsapófürdőbe vezetik, mely kioldja az előállítás során felhasznált oldószert, vagy ha könnyen illó szerves oldószert alkalmaztak, akkor egyszerűen meleg légáramban történő elpárologtatással is megszilárdíthatják a szálakat. Ezeken a nedves, ill. száraz eljárásokon kívül létezik még az ömlesztéses eljárás is, mely során az ömledéket hideg levegő vagy víz ráfűvésével szilárdítják meg. Ezt követően a szálak utókezelési műveletei következnek (mosás, közömbösítés, antisztatizáló kezelés...), majd a nyújtás, amelyek célja a molekuláris szerkezet megfelelő rendezettségének és irányítottságának kialakítása. A szintetikus szálak esetén, amelyek nyújtása 400-1000%, ez külön művelet. Végül a *méreteztetést* végzik el hőkezeléssel.

A vizsgált fonal a végtelen hosszú, folytonos szálakból állóak (selymek) közé tartozik, azaz az ún. multifilamentek, a több folytonos szálból álló fonalak közé. A multifilamenteket finomság szerint két csoportba sorolják [1]:

- vékony multifilament, melynek finomsága 300 dtex-ig terjed;
- vastag (durva) multifilament, finomsága 300-10000 dtex közötti.

Poliészter

A poliészter alapanyagú szál keresztmetszete általában kör alakú, mikroszkópi képe jellegtelen. Finomszerkezete jellemzően hajtogatott láncmolekulákból felépülő, közepesen lokalizált micellákat tartalmazó, közepesen rendezett parakristályos szerkezet. Alapvető fizikai tulajdonságait (P. A. Koch szerint) a 2. táblázat mutatja:

Megnevezés	Szakító-szilárdság, cN/tex	Szakadási nyúlás,* %	Max. elcsavarhatóság, szöge, fok	Nedvesség-felvétel, %	Fajlagos tömeg, g/cm ³	Olvadási hőmérséklet, °C
Poli(etilén-tereftalát) filament, normál nagy szilárdságú szál, normál göbmentes	40...60 60...75 30...55 25...40	20...30 7...20 25...50 30...55	43,5...44,5 47...47,5 33,5...38,5	0,4	1,38	253...256
Poli(ciklohexanon-tereftalát) Kodel 200, Vestan 100	23...36	15...35	49	0,2	1,23	245...255
Módosított poli(etilén-tereftalát) Dacron 65, Diolen FL, Trevira 330, Terylene W 16	23...54	24...42	48		1,38	
Poli(észter-éter) A-Tell	30...53	15...25		0,5	1,34	225

* A száraz és nedves értékek megegyeznek.

2. táblázat Poliészterek tulajdonságai [1]

Rugalmassága jó. Értékes tulajdonsága, hogy rugalmassági jellemzői nedvesség hatására alig változnak, ezért megfelelő arányban természetes szálakkal keverve a könnyen kezelhetőség feltételei megvalósulnak. Kopásállósága igen jó, megközelíti a poliamidokét. Hőállósága jó, 150°C-on hosszabb ideig tartva a szilárdságából alig veszít. Időállósága jó, ultraibolya sugarakra kevésbé érzékeny, mint a poliamidok. Savaknak ellenáll. Szerves és szervetlen tömény savak hidegen vagy híg savak melegen nem károsítják. A lúgos kezelést csak hidegen bírja. Forrón híg alkáliák is jelentősen károsítják. A száraz tisztítás oldószereit jól bírja. Rovarok és mikroorganizmusok nem támadják. A kis nedvességfelvétel a műszaki alkalmazások szempontjából előnyös [1].

Húzó-igénybevétellel szembeni ellenállás

Kutatásunk során a fonal húzó-igénybevétellel szembeni ellenállásának vizsgálatára nagy hangsúlyt fektettünk. A szálanyagok húzó-igénybevétellel szembeni viselkedése ugyanis mind feldolgozhatóságuk, mind pedig felhasználhatóságunk szempontjából fontos. Az egyes feldolgozási műveletek során létrejövő mechanikai igénybevételnek csak a megfelelő szilárdságú és deformabilitású szálak tudnak ellenállni. A szálak húzó-igénybevétellel szembeni ellenállásának legismertebb jellemzői a szakítóerő, ill. annak fajlagosított értéke, a szakítószilárdság, valamint a szakadási nyúlás [1].

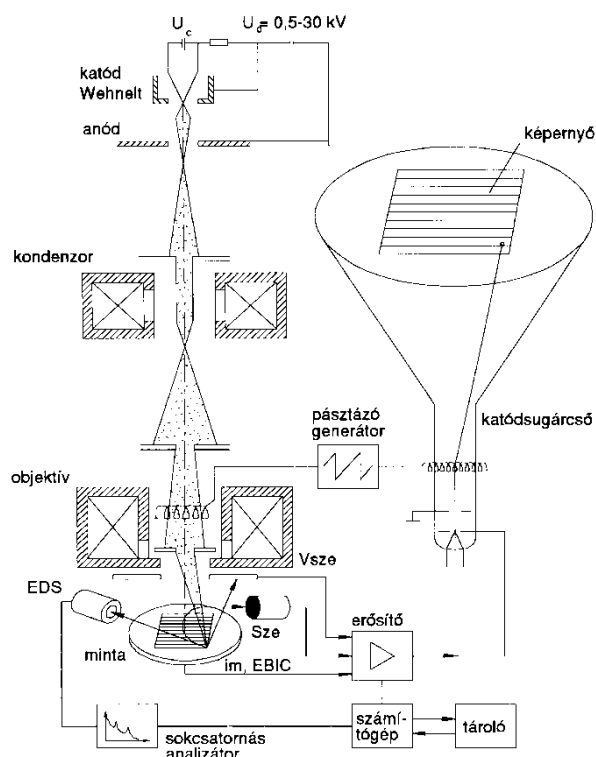
2.3 A szálak és a fonal mikroszkópos vizsgálatai

A szálak és fonalak alaki tulajdonsági jól vizsgálhatók optikai és elektronmikroszkóppal.

A pásztázó elektronmikroszkópia és az elektronsugaras mikroanalízis olyan korszerű anyagtudományi vizsgálati módszerek, melyek elsősorban az anyagok felületéről, ill. a minták felszíne alatti néhány nano- ill. mikrométerről szolgáltatnak információt.

A Scanning Electron Microscope (SEM) működési elve az alábbi módon fogalmazható meg: A pásztázó elektronmikroszkópban (7. ábra) az elektronforrás vagy elektronágyú (benne többnyire izzó katód) állítja elő a vizsgálathoz szükséges elektronokat, amelyeket nagyfeszültség gyorsít a vizsgálandó minta felé, és egy elektromágnesekből álló lencserendszer (kondenzor és objektív) fókuszál tühegyű nyalábbá [8].

A fókuszált elektronnyaláb végigpásztázza a vákuumban lévő vizsgálati minta felületét. Ennek a sugárzásnak a hatására elektronok lépnek ki a minta felszín közeli rétegeiből. A vizsgálati minta pásztázásával szinkronban egy másik elektronnyaláb a mintából kilépő elektronok számával arányos intenzitással egy monitor képernyőjét pásztázza. Ennek eredményeként a monitoron megjelenik a vizsgált minta felszínének képe [8].



7. ábra Elektronmikroszkóp működési elve [11]

Az optikai mikroszkópos vizsgálatok során a tárgyasztalra vagy befogószerkezetbe helyezett tárgyat a megvilágító berendezés erősen megvilágítja. A képet két lencserendszer alkotja, a tárgy felé fordul a tárgylencse (objektív), a szem felé a szemlencse (okulár). Az objektív és az okulár egy tubus két végén foglal helyet, mindkettő több lencséből álló összetett lencserendszer. Azért van szükség a több lencséből álló rendszerekre, mert így lehet elérni, hogy a kép minősége jó legyen, azaz az optikai képalkotás természetéből következő aberrációkat, képhibákat kellő mértékben csökkenteni lehessen [8].

Az optikai mikroszkópok mélységélessége igen csekély, ezért fontos, hogy a minták és a vizsgálandó felület egy síkban legyenek. E célból a két leggyakrabban használt előkészítési eljárás a metszetkészítés és a cseppentéses eljárás. Az előbbi során a

vizsgálandó mintát megfelelő ágyazó anyagba beágyazzuk, majd a beágyazott minta felületét addig csiszoljuk, amíg a felületi érdesség a kívánt ($1-3\mu\text{m}$) értéket el nem éri [8].

A pásztázó elektronmikroszkóp hatékonysága elsősorban az elérhető nagyításnak és mélységélességnek köszönhető. Az optikai mikroszkóppal szemben, mellyel max. $2000\times$ -es nagyítás és $1-10\mu\text{m}$ -es mélységélesség érhető el, a SEM nagyítása elérheti a $200\,000\times$ -est is, illetve a mélységélessége kis nagyításoknál akár $3-4\text{ mm}$ is lehet. Ez a mélységélesség plasztikus térhatású képek megjelenítését teszi lehetővé [8].

2.4 Elemi szálak és fonalak szakítóvizsgálata

Az alábbiakban az elemi szálak, valamint a fonalak, cérnák szakítóvizsgálatának folyamatát, előírásait foglaltuk össze [1].

Elemi szálak vizsgálata

Alkalmazási terület

Pamut-, gyapjú- és mesterséges szálak szakítóerejének, szakadási nyúlásának és más húzó-igénybevételi jellemzőinek meghatározása egyenként végzett szakítással.

Fogalmak

Előterhelés: a befogás előtt a szálra ható húzóerő, amely által egyértelműen meghatározható a kiindulási hossz. Mértékegysége: [N]

Fajlagos előterhelés: a finomsági számra vonatkoztatott előterhelés, amelyet a vizsgálati előírás rögzít. Mértékegysége: [cN/tex]

Befogási hossz, L_0 : az előterhelt próbadarab kezdeti hossza, amely kiindulási helyzetben a befogó fejek közötti szabad, merőleges távolsággal egyenlő.

Szakítási időtartam: a próbadarab erőfelvételének kezdetétől a szakítóerő eléréséig eltelt időtartam.

Szakítóerő, F_{max} : a szakítóvizsgálat során mért maximális húzóerő. Mértékegysége: [cN]

Fajlagos szakítóerő, R_{max} : a szál szakítóerejének és szabványos légtérben mért finomsági számának hányadosa:

$$R_{max} = \frac{F_{max,n}}{T_t} \left[\frac{\text{cN}}{\text{tex}} \right] \quad (2)$$

Szakadási nyúlás, $\varepsilon_{F_{max}}$: a próbadarab L_0 kezdeti hosszának az F_{max} szakítóerő eléréséig bekövetkező $\Delta L_{F_{max}}$ megnövekedése a kezdeti hossza vonatkoztatva. Mértékegysége: %.

$$\varepsilon_{F_{max}} = \frac{\Delta L_{F_{max}}}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

Nedves szakadási nyúlás, $\varepsilon_{F_{max,n}}$: az $F_{max,n}$ nedves szakítóerő eléréséig bekövetkező $\Delta L_{F_{max,n}}$ megnyúlás az L_0 kezdeti hossz százalékában.

Szakítási munka, W : a szál elszakításához szükséges energia, azaz a szakítóerő eléréséig végzett külső munka. A szakítási munka számértéke az erő-nyúlás görbe alatti területtel arányos.

Fajlagos szakítási munka, W_r : a tömegegységre vonatkoztatott szakítási munka, amelyet a következő képlet fejez ki:

$$W_r = \frac{W}{TtL_0} \left[km \cdot \frac{cN}{g} \right] vagy \left[\frac{cN}{tex} \right] \quad (4)$$

ahol W – szakítási munka, [cm·cN]; Tt – a finomsági szám, [tex]; L_0 – befogási hossz, [cm];

Kezdeti modulus, E_i : az erő-hosszváltozás görbe kezdeti, lineáris szakaszán az egységnyi rugalmas nyúlás előidézéséhez szükséges fajlagos húzóerő. a kezdeti modulus számértéke a görbe kezdeti szakaszához húzott érintő iránytangensével arányos.

$$E_i = \frac{F_1 L_0}{\Delta L_{F_1} Tt} \left[\frac{cN}{tex} \right] \quad (5)$$

ahol F_1 – a görbe kezdeti szakaszához húzott érintő egy pontjának erő-koordinátája, [cN], ΔL_{F_1} – az F_1 erőhöz tartozó nyúlás, [mm], L_0 – a befogási hossz, [mm], Tt – finomsági szám, [tex]

A módszer lényege

Az előterhelt szálát két befogófejben rögzítik, és a befogófejek közötti távolságot vagy a szál terhelését folyamatosan növelik a szál elszakadásáig. A vizsgálat során

regisztrálják az erő-nyúlás görbét, vagy ennek hiányában a szakítóerőt és az ahhoz tartozó nyúlást.

Készülékek, eszközök

Szakítógép, amely bármelyik következő elv szerint működik: állandó terhelési vagy húzófej sebesség. A szakítógépen a mérési tartományon belül az erőmérés hibája legfeljebb a mutatott érték $\pm 1\%$ -a, a hosszváltozás mérésének hibája legfeljebb $\pm 0,1$ mm lehet.

További eszközök lehetnek:

- bársonylap a szálaktól eltérő színben
- csipesz a szálak megfogására
- előterhelő csipeszek
- desztillált víz 1 g/l nedvesítőszerrel
- szűrő- vagy itatóspapír

Mintavétel és minta-előkészítés

A vizsgálatokat szabványos légtérben kell végezni tekintettel az alapanyag hő- és nedvességtartalmára. A szálak befogásának megkönnyítésére és a befogópofában való szakadásnak, ill. a szál megcsúszásának elkerülésére a szálakat célszerű a vizsgálat előkészítése során 10×10 mm nyílású papírkeretre felragasztani.

A vizsgálat általános körülményei

- befogási hossz: $10 \pm 0,1$ mm
- fajlagos előterhelés (szabványos légtérben):
2,8 dtex-ig $0,5 \pm 0,1$ cN/tex
2,8 dtex felett $0,7 \pm 0,07$ cN/tex
- átlagos szakítási időtartam: 20 ± 3 s
- Figyelman kívül hagyandók azok a vizsgálatok, amelyeknél a szál:
 - a befogópofákban vagy azoktól számított 0,5 mm-en belül szakadt, vagy
 - a szakítási folyamat alatt a befogókban megcsúszott

Értékelés

Az átlagos szakítóerőt cN-ban, három számjegy pontossággal adják meg. Az átlagos szakadási nyúlást rendszerint az egyes mért szakadási hosszváltozás értékekből számítják ki és 0,1% pontossággal adják meg.

Fonalak és cérnák szakítóvizsgálata**Alkalmazási terület**

Valamennyi normálnyúlású fonal- és cérnafajta szakítóerejének, szakadási nyúlásának és fájlagos szakítási jellemzőinek meghatározása, amelynek szakadási nyúlása nem több, mint 50 %, és finomsági száma nem nagyobb, mint 2000 tex.

A fogalmakban és a módszer lényegében megegyezik az elemi szálhoz tartozóakkal.

Készülékek, eszközök és anyagok

- Szakító gép, mely az előírásokat tekintve megegyezik az elemi szálaknál előírtakkal,
- előterhelő csipeszek,
- áztatóedény,
- desztillált víz, 1 g/l nedvesítőszerez

Mintavétel és minta-előkészítés

Valamennyi kivett kiszereelési egységet a vizsgálat előtt előszárítják, és szabványos légtérben kifektetik. A próbadarabokat a vizsgálat alkalmával veszik le a kiszereelési egységekről. Az első próbadarab befogása előtt legalább 10 m-es fonalszakaszt eltávolítanak. A vizsgálandó próbadarabok száma csévénként 5, így a mintavételi előírásokat figyelembe véve, a vizsgálatok teljes száma 50.

Az átlagos szakítóerő relatív megbízhatósági tartományának félhossza 95%-os egyoldali megbízhatósági szint mellett nem lehet nagyobb $p=2,5$ %-nál. Ha ezt a feltételt az első vizsgálat nem elégítette ki, a vizsgálatot a mintavételi előírás szerint kivett újabb csévékről kell folytatni, csévénként 5... 5 próbadarab vizsgálatával.

A vizsgálatok körülményei:

- Befogási hossz: 500 ± 1 mm;
- fájlagos előterhelés szabványos légtérben: $0,5 \pm 0,1$ cN/tex;
nedves szakításnál $0,25 \pm 0,05$ cN/tex;
- átlagos szakítási időtartam: 20 ± 3 s

A vizsgálatot szabványos légtérben kell végezni. Figyelmen kívül hagyandók azok a vizsgálatok, amelyek során a fonal:

- a befogópofákban vagy azoktól számított 10 mm-en belül szakadt, vagy
- a szakítási folyamat alatt a befogófejben megcsúszott.

Kis sodratú vagy sodrat nélküli filamentfonalak filamentjei rendszerint nem egyszerre szakadnak. Ezeknél szakítóerőnek az első csoportos filamentszakadásakor fellépő erőt tekintik. Csoportos filamentszakadás akkor következik be, ha a terhelés a szakítási folyamat során meghatározott, pl. 5... 10%-os visszaesést mutat.

Értékelés

A fajlagos szakítóerő átlagértékének meghatározásán kívül, minden elemi szálnál felsorolt összefüggés használható (3-5). A fajlagos szakítóerő átlagértékét az átlagos szakítóerőből és a szabványos légtérben mért finomsági számból számítják ki. A fajlagos szakítóerő átlagértékét 3 számjegy pontossággal adják meg.

2.5 A fonalszilárdság Peirce-féle modellje

Mint ismeretes, a fonalak szakítóereje függ a vizsgálat során alkalmazott befogási hosszától. A fonalszilárdság Peirce-féle modellje [4] egy olyan számítási rendszer, mellyel egy adott hosszúságú szakasz szilárdságának ismeretében meghatározott lokális adatokból becsülhetők a fonal nagyobb befogási hosszakra érvényes szilárdsági jellemzői. Tehát ha ismerjük a fonal egy l_0 befogási hosszhoz tartozó átlagos szakítóerejét, akkor kellő pontossággal becsülhetjük egy keresett l befogási hosszhoz tartozó átlagos szakítóerejét.

Peirce normális eloszlás esetére, speciális feltevésekkel és elhanyagolásokkal az alábbi egyenletekben foglalta össze elméletét:

$$\overline{F}_S(nl_0) = \overline{F}_S(l_0) \left[1 - 4,2 \cdot V_{F_S} + 4,2 \cdot V_{F_S} \cdot \left(\frac{1}{n} \right)^{1/5} \right] \quad (6)$$

$$V_{F_S}(nl_0) = V_{F_S} n^{-1/5} \quad (7)$$

$$F_S(nl_0) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} F_S(\infty) = \overline{F}_S(l_0) (1 - 4,2 \cdot V_{F_S})$$

$$\overline{F}_S(nl_0) \xrightarrow{n \rightarrow 0} \infty$$

ahol l_0 [mm] vonatkoztatási- vagy bázishossz,

$V_{F_S}(l_0) = \frac{S_{F_S}(l_0)}{\overline{F_S}(l_0)}$ az $F_S(l_0)$ lokális szakítóerő értékek relatív szórása,

$$n = \frac{l}{l_0}$$

l [mm] – Keresett befogási hossz

$F_S(l)$ [N] – Maximális szakítóerő

$\overline{F_S}(l)$ [N] – Átlag maximális szakítóerő

$S_{F_S}(l_0)$ – Maximális szakítóerő szórása

Azonban egyes vizsgálatokból kiderült, hogy a fenti kifejezés általában jelentősen alábecsüli a hosszabb szakaszokhoz tartozó átlagos szakítóerőt. Ha n értékét $n = \frac{l}{l_0}$ -ként definiáljuk, akkor az egyenletek (6-7) kiterjeszthetők a pozitív valós számokra is. Bevezetve a , b és γ konstansokat, továbbá $0 < c < 1$ állandót, akkor a $0 \leq n < \infty$ értékeknek is megfelelő alakra terjeszthető ki:

$$\overline{F_S}(nl_0) = \overline{F_S}(l_0) \{1 - a + b[(c+1)/(c+n)]^\gamma\} \quad (8)$$

$$V_{F_S}(nl_0) = V_{F_S}[(c+1)/(c+n)]^\gamma \quad (9)$$

A (8, 9) egyenleteket módosított Peirce modellnek nevezik. Amennyiben vesszük a módosított Peirce egyenletet (8-9) és a $\left(\frac{c+1}{c+n}\right)^\gamma$ tényezőt helyettesítjük egy X_n taggal, továbbá γ -t 1/5-nek választjuk [4], akkor további statisztikai módszerek segítségével az átlagos szakítóerők és a mérések szórásának, ill. a befogási hosszok ismeretében egy olyan egyenes fektethető a számolt pontokra, mellyel további befogási hosszokhoz tartozó átlagos szakítóerők becsülhetők.

A módosított Peirce egyenlet átalakítható úgy, hogy szintén ennek az egyenesnek a leírására szolgáljon (10):

$$\underbrace{\overline{F_S}(nl_0)}_Y = \underbrace{\overline{F_S}(l_0)(1 - aV_{F_S})}_A + \underbrace{\overline{F_S}(l_0)bV_{F_S}}_B \cdot X_n \quad (10)$$

$Y=A+BX$ egyenletből pedig már számolható az A és a B értékek, melyek a lineáris trendnek a legjobb illesztéséből adódnak. Ha $A=B=4,2$ és $c=0$, akkor kapjuk a Peirce-féle esetet [4].

A módosítás lényege, hogy míg az eredeti modell egyetlen egy befogási hosszánál mért adatok ismeretében következtet a nagyobb befogási hosszak esetén várható szakítóerőre, addig a módosított modell több befogási hosszánál mért adatokra alapozza a becslést.

3. Szerkezeti vizsgálatok

A fonal elemi szálainak geometriai vizsgálatát elektronmikroszkópon és optikai mikroszkópon is elvégeztük. A vizsgálatok során a kapott értékeket felhasználva további összefüggéseket tudtunk felírni a szálak és a fonal geometriájára vonatkozóan.

3.1 Felhasznált berendezések

Munkánk során a következő berendezéseket használtuk:

Olympus BX 51M típusú optikai mikroszkóp

Az eszköz nagyítása 2-100x, továbbá tartozik hozzá egy C-5060 CAMEDIA típusú digitális fényképezőgép és az AnalySIS képfeldolgozó program. Az Olympus BX 51M (8. ábra) egy számítógép vezérlésű, CCD (Charge-coupled Device; azaz töltéscsatolású képalkotó eszköz) kamerás rendszerrel ellátott optikai mikroszkóp.



8. ábra Olympus BX 51M optikai mikroszkóp

JEOL JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóp

A pásztázó elektronmikroszkóp egy olyan elektronoptikai eszköz, mely egy gondosan előkészített minta felületéről képes akár 200 ezerszeres nagyítást készíteni. Egy vékony elektronnyaláb segítségével végigpásztázza a minta felületét és a kölcsönhatásból származó jeleket detektorok segítségével visszajuttatja egy számítógépnek.

Az elektronmikroszkóp (SEM) (9. ábra) tartozéka egy JEOL JFC-1200 típusú aranyozó berendezés, mellyel a korong próbatestek felületét vontuk be arannyal (10. ábra) a felület vezetőképessé tételének céljából.



9. ábra SEM; forrás: [9]



10. ábra Aranyozó berendezés; forrás: [9]

Struers automata polírozó

Az elektronmikroszkópos vizsgálatokra szánt, a vizsgálati mintákat tartalmazó epoxi gyanta alapú korongok felületét, melyben a vizsgált mintákat helyeztük el, ezzel a polírozó géppel készítettük elő (11. ábra).



11. ábra Polírozó berendezés; forrás: [9]

Ohaus Explorer típusú mérleg

Az elemi szálak és a fonal tömegét ennek az eszköznek (12. ábra) a segítségével határoztuk meg. Paraméterei: A mérési tartomány 0-110 gramm, a mérési pontossága 0,0001 gramm.

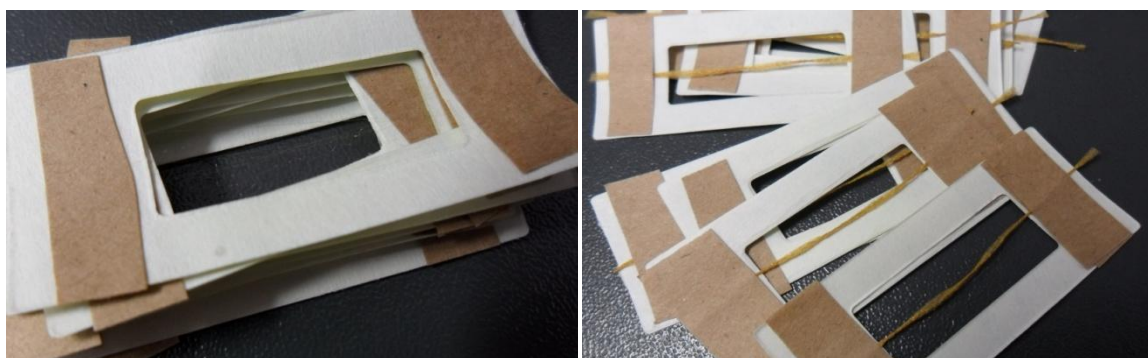


12. ábra Ohaus Explorer mérleg

3.2 Optikai mikroszkópos vizsgálatok

Az optikai mikroszkópos vizsgálatok során közvetlenül a fonal szerkezetét, a fonalátmérőt és az elemi szálak átmérőit vizsgáltuk. Ezekből az adatokból később többféle számítást tudunk elvégezni a fonal és az elemi szál tulajdonságaira vonatkozóan.

A mérések során különböző megvilágítások mellett a fonal fényvisszaverődését és színét is megfigyelhettük.



13. ábra Mikroszkópos vizsgálati minták

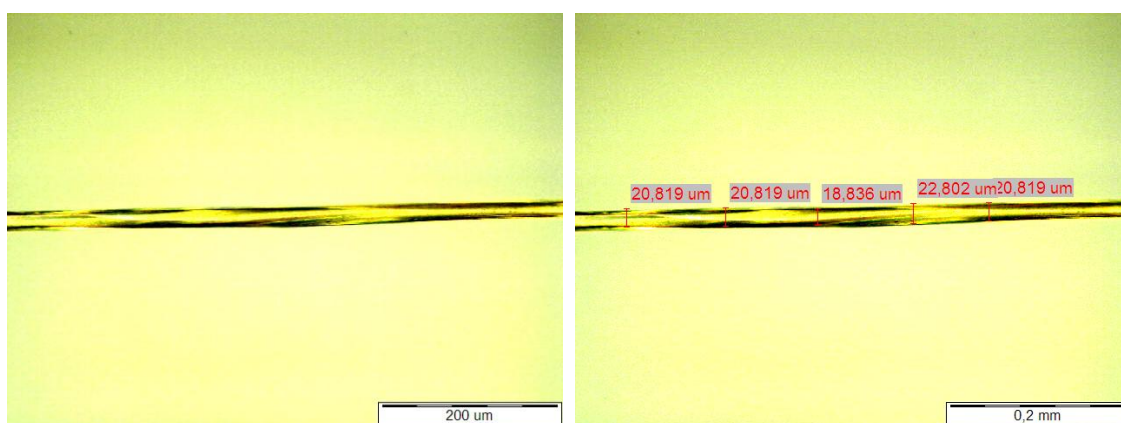
A mérések megkezdése előtt fonal és elemi szál mintákat készítettünk. Egy papírkeretre a 13. ábrán látható módon rögzítettük az elemi szál darabokat, ill. a fonalszakaszokat. Az elemi szárok kinyeréséhez nagy türelem kellett, hiszen nagyon nehéz volt a fonalból kisodorni, majd kihúzni egyetlen szálát.

A mérések során 8-8 elemi szál és fonalszakasz mintát vizsgáltunk meg. A mintákat a mikroszkópban végigvezetve az átmérőket több helyen is megmértük az analýSIS

program segítségével. Ezeket az adatokat később átlagoltuk és a szórásukat is kiszámítottuk, továbbá figyelembe vettük a mérési hibák okozta eltéréseket is. A mikroszkópos vizsgálat során rengeteg érdekességet figyelhettünk meg a szál kialakításáról, a fonalban lévő elemi szálak elrendeződéséről és a fonal struktúrájáról. Végül az elszakított fonalak szerkezetéről is készítettünk felvételeket, melyekből szintén érdekes következtetésekre jutottunk.

Optikai mikroszkópos elemi szál vizsgálat

Az elemi szálak vizsgálata során az AnalySIS Steel Factory nevű képfeldolgozó szoftver segítségével az elemi szálakról készített képeket be tudtuk méretskálázni, és a szál átmérőket meg tudtuk mérni (14. ábra).



14. ábra Elemi szálak és mérések az AnalySIS program segítségével

A vizsgálat során a 8 elemi szál mintát külön-külön több helyen lemértük, majd ezeket az értékeket átlagoltuk. A mérések során azt feltételeztük, hogy az adott elemi szálak kör keresztmetszetűek, így az átmérők meghatározásával és átlagolásával az elemi szálak lineáris sűrűségére jó közelítő értéket kaphatunk az alábbi képletet alkalmazva:

$$q_e = \rho \cdot \frac{d^2 \pi}{4} [\text{tex}] \quad (11)$$

ahol d az átlagos elemi szál átmérő, ρ a poliészterszál sűrűsége ($1,38 \text{ g/cm}^3$) és q_e az elemi szál lineáris sűrűsége.

Az elemi szálakat annál finomabbnak mondjuk, minél kisebb az átmérőjük, minél vékonyabbak. Átmérővel azonban csak olyan szálak vastagsága jellemezhető, amelyek közelítőleg kör keresztmetszetűek. Az elliptikus vagy szalag keresztmetszetű szálak

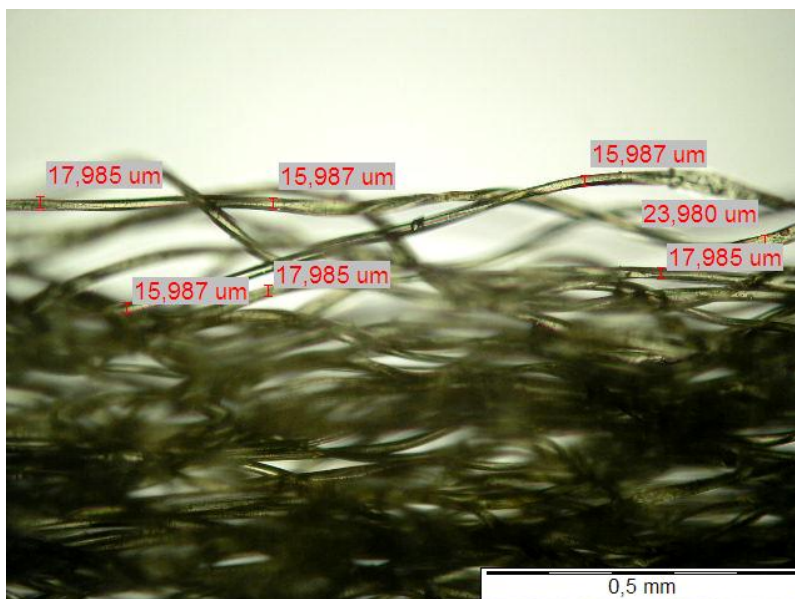
keresztmetszetének jellemzésére már két méret megállapítása szükséges. Ilyenek például az üreges és természetes szálak, ezek keresztmetszetét már nagyon körülményes optikai mikroszkóppal meghatározni. Viszont bármilyen keresztmetszetű szál finomságának jellemzésére valamelyik finomsági számrendszerben kifejezett mérőszám szolgál. Egyik ilyen szám a tex, azt fejezi ki, hogy egy km hosszúságú elemi száldarabnak hány gramm a tömege. Mértékegysége: [tex] [3]

Az elemi szálakhoz tartozó vizsgálatok szorosan kötődnek magának az elemi szálakból felépülő fonalakhoz, így a szakítás utáni fonszerkezetet és az elszakított elemi szálkötegeket a fonal geometriai vizsgálatánál részletezzük. (Az elemi szálról készült további kép a mellékletben található.)

Optikai mikroszkópos fonalvizsgálat

Magát a fonalat is megvizsgáltuk mind optikai mind pedig elektronmikroszkóp segítségével. A mérések során, az optikai mikroszkópon 8 véletlenszerűen kiválasztott szálát vizsgáltunk. A SEM-en pedig további 2 szálszakasz szerkezetét figyeltük meg tüzetesebben. A fonalak esetén már az optikai mikroszkóppal is jó minőségű és kiértékelhető felvételek születtek, ugyanakkor itt is kisebb problémát okozott a gyenge mélységélesség. A vizsgálatok során szál átmérőket határoztunk meg és a szerkezeti felépítést figyeltünk.

A fonalak vizsgálatát szintén az Olympus BX 51M típusú gépen kezdtük el. A kiválasztott 8-8 fonalat több szakaszon is megmértük az AnalySIS képfeldolgozó szoftver segítségével (15. ábra), majd a kapott átmérőket átlagoltuk a 8 fonatra külön. Végül ezeket az átlagokat összevetve megkaptuk a fonal átlagos átmérőjére vonatkozó értéket.



15. ábra Elemi szál átmérők mérése a fonalban

A fonalkötegek esetében azonban nem tudunk pontos geometriai adatokat mérni, ezért a kör keresztmetszet csak közelítő méret. Általában a gyártó cégek is lineáris sűrűséget adnak meg, illetve a rovingban található elemi szálak számát. Esetünkben ezt az értéket kell meghatározni, miután méretre vágtuk és lemértük a levágott fonalszakaszok tömegét.

A fonal lineáris sűrűségének meghatározása céljából a mérés során a fonalsévéről és a megmaradt mintákból véletlenszerűen kiválasztottunk 10-10 db 100 és 200 mm-es hosszúságú szakaszt. Ezek tömegét egyenként mértük le az Ohaus Explorer típusú mérlegen (16. ábra).



16. ábra A mérleg kijelzője a mérés folyamán

A vizsgálat során a hőmérséklet 23 fok volt a teremben. A relatív páratartalomra vonatkozó adat pedig 43,2% volt. A fonalakat a vizsgálat előtt nem szárítottuk, ugyanakkor ez a poliészter szál esetében nem annyira lényeges, mivel a relatív vízfelvevő képessége nagyon alacsony: 0,4% körüli.

A tömeg ismeretében már könnyen kiszámítható a fonatra vonatkoztatott lineáris sűrűség az alábbi képlet alkalmazásával [2]:

$$q_f = \frac{m}{l} [\text{tex}] \quad (12)$$

ahol q_f [tex] a fonal lineáris sűrűsége,
 m [g] a fonal tömege,
 l [km] pedig a fonal mért hossza.

A (11) –es és (12) –es egyenletet felhasználva felírhatjuk a fonal száltartalmát, szálszámát:

$$n_f = \frac{q_f}{q_e} [-] \quad (13)$$

ahol n_f a fonalban található elemi szálak száma.

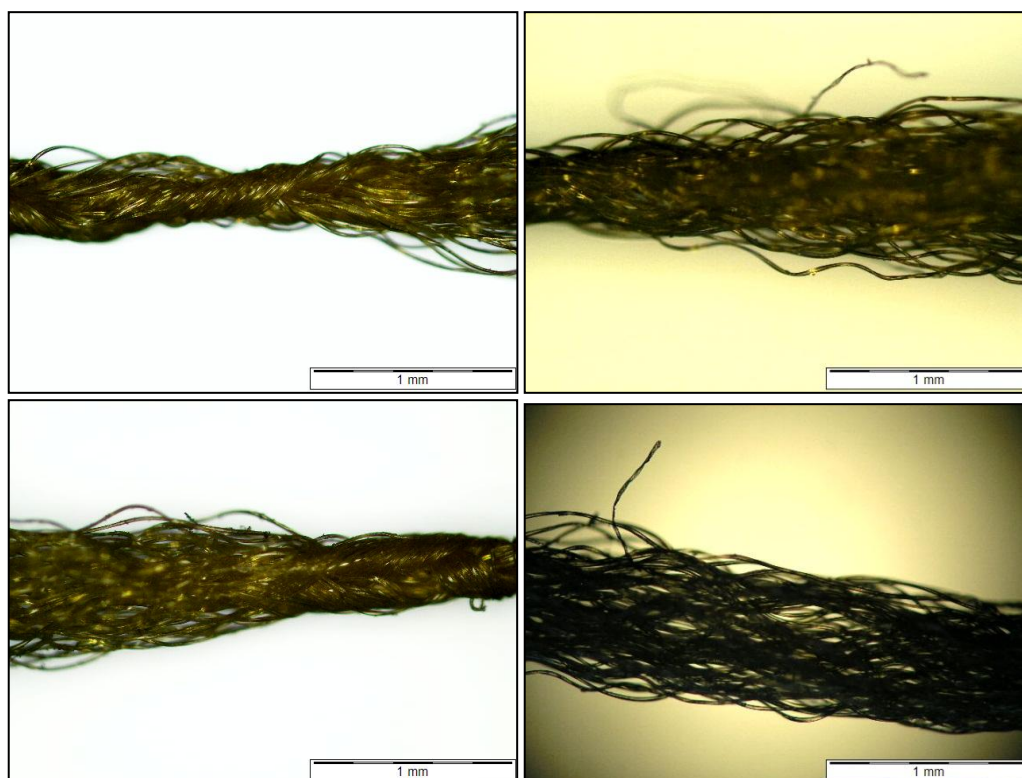
A vizsgált texturált poliészter fonalat a 17. ábra szemlélteti. A fonalvizsgálatok során készített mikroszkópos felvételek alapján, de akár szabad szemmel is jól megfigyelhető volt, hogy a fonalnak periodikusan ismétlődő szerkezete van. A fonal szerkezete (18. ábra) egyrészt lekötött szakaszokból áll, amelyeknél néhol fonatolt szerkezethez megszólalásig hasonló szerkezetet láthatunk. Ezeken a részeken a fonal gyártása során az elemi szálakat 3 tangenciális légsugár segítségével kuszálják és a szerkezetet termikusan rögzítik. Így magyarázható az, hogy a „fonatok” szerkezete helyenként teljesen szabályosnak tűnik, néhol pedig szabálytalan a kialakítása.



17. ábra A vizsgált fonal

A fonalon szintén megfigyelhető másik ismétlődő szakasz egy hullámos szálakból álló, sodrat nélküli rész.

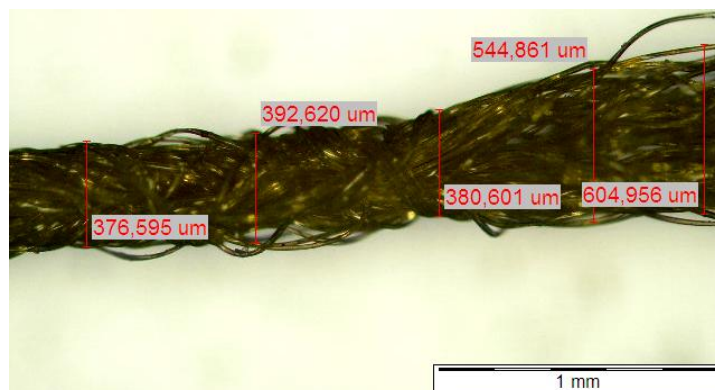
Ezek a szakaszok 12 mm-es (a sodrott szakasz 4 mm; a sodratlan 8 mm) közönként váltják egymást, a két struktúra folyamatosan megy át egyikből a másikba. A 18. ábrán nagyon jól megfigyelhetők az adott szerkezeti kialakításra vonatkozó jellegzetességek.



18. ábra A fonal különböző szerkezeti kialakítású szakaszai (alsó-felső megvilágítással)

A fonaltérőket egy fonalon több helyen is megmértük (19. ábra). Az értékeket átlagoltuk és kaptunk egy összesített szál átmérőre vonatkozó átlagot. Ugyanakkor sokkal célratörőbb megoldásnak tartottuk, ha a szál átmérőt a két különböző struktúrára nézve

számítjuk ki. Így választottunk egy határszámot, amivel megkülönböztettük az erősebben sodort részeket a sodratlan szakaszoktól. Erre a két szakaszra két különböző átlagértéket kaptunk. Az átlagértékek alapján megállapíthattuk, hogy a kevésbé kötött részek átmérője közel a duplája az erősebben sodort részeknek.

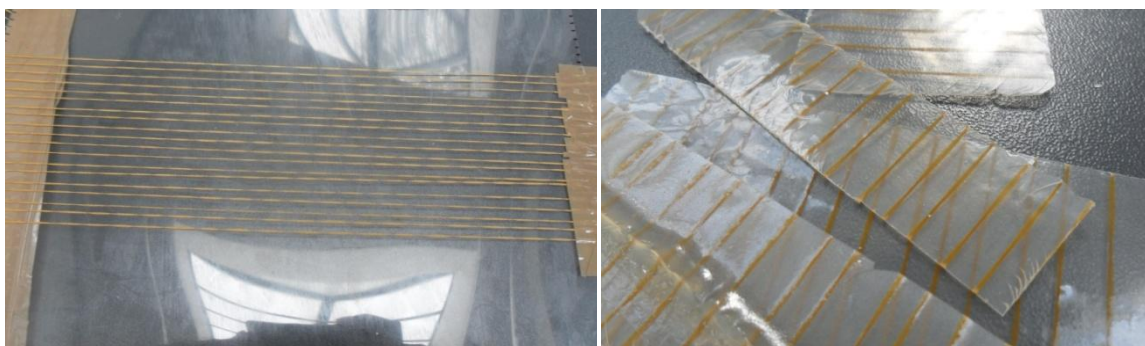


19. ábra Fonalstruktúra és szakaszmérők

3.3 Elektronmikroszkópos vizsgálatok

A pásztázó elektronmikroszkóp segítségével meghatározhattuk az elemi szálak sűrűségét a fonalszerkezetben, továbbá különböző nagyításokban megfigyelhettük a szálak keresztmetszetének jellegzetes formáját és a szálak felületét is behatóbban tanulmányozhattuk az optikai mikroszkópos mérésekhez képest. A berendezés segítségével a fonalstruktúráról is nagyon jó mélységélességű képeket tudtunk készíteni.

Az elektronmikroszkópos felvételeket elkészítéséhez egy már előre elkészített, speciális próbatestre volt szükség. A vizsgált fonalat tartalmazó próbatestet pár nappal a mikroszkópos vizsgálat előtt kezdtük el készíteni.



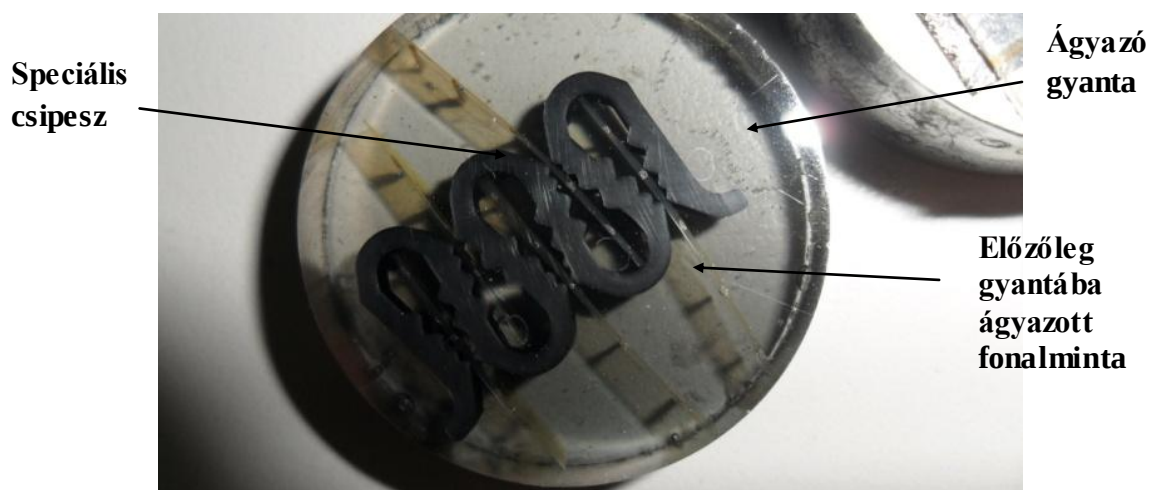
20. ábra Minta előkészítés: gyantába ágyazott fonalak

Első lépésben a vizsgálatra kiválasztott fonalszakaszokat párhuzamosan egymással egy átlátszó műanyag lapra fektettük (20. ábra), majd erre felvittünk egy réteg térhálósító gyantát. Ez a réteg gyanta egy nap alatt kitérhálósodott. Ezt követően a vizsgálandó elemi szálakat tartalmazó gyantalapot leválasztottuk az átlátszó műanyag lapról, majd ebből kis négyzeteket vágtunk ki.



21. ábra Korongformázás

A kis négyzet alakú lapokat egy speciális kigyó alakú csipesz segítségével elhelyeztük egy hengerformában (21. ábra), majd a hengert térhálósodó gyantával feltöltöttük. Másnapra a gyanta kitérhálósodott, és az így elkészült mintát a polírozógép segítségével megfelelő felületűre csiszoltuk.

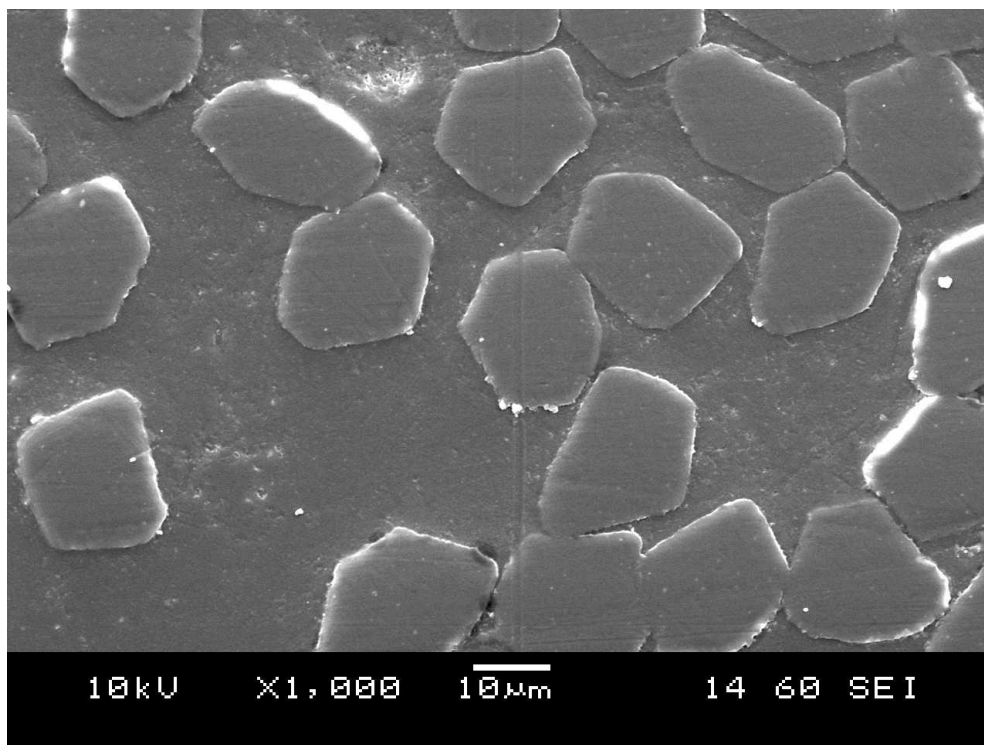


22. ábra Az elkészült gyantakorong próbatestek

A korongok (22. ábra) elektronmikroszkópos vizsgálatra való elő készítéseinek utolsó lépése az aranyozás volt. Az aranyozás során egy katódporlasztó berendezés segítségével néhány nanométer vékony aranyréteget vittünk fel a minta felületére. Ez a vékony réteg nem torzítja a minta felületi viszonyait, viszont elektromosan vezetővé teszi.

Eredmények:

Az elemi szál vizsgálatokat a pontosabb méretek meghatározása és jobb képmélység élesség érdekében elektronmikroszkópon is elvégeztük. Ezek a vizsgálatok sokkal pontosabb képet adtak az elemi szálak keresztmetszetéről és a fonalban lévő elrendeződésről, mint az optikai mikroszkópos felvételek.



23. ábra Elemi szálak keresztmetszete

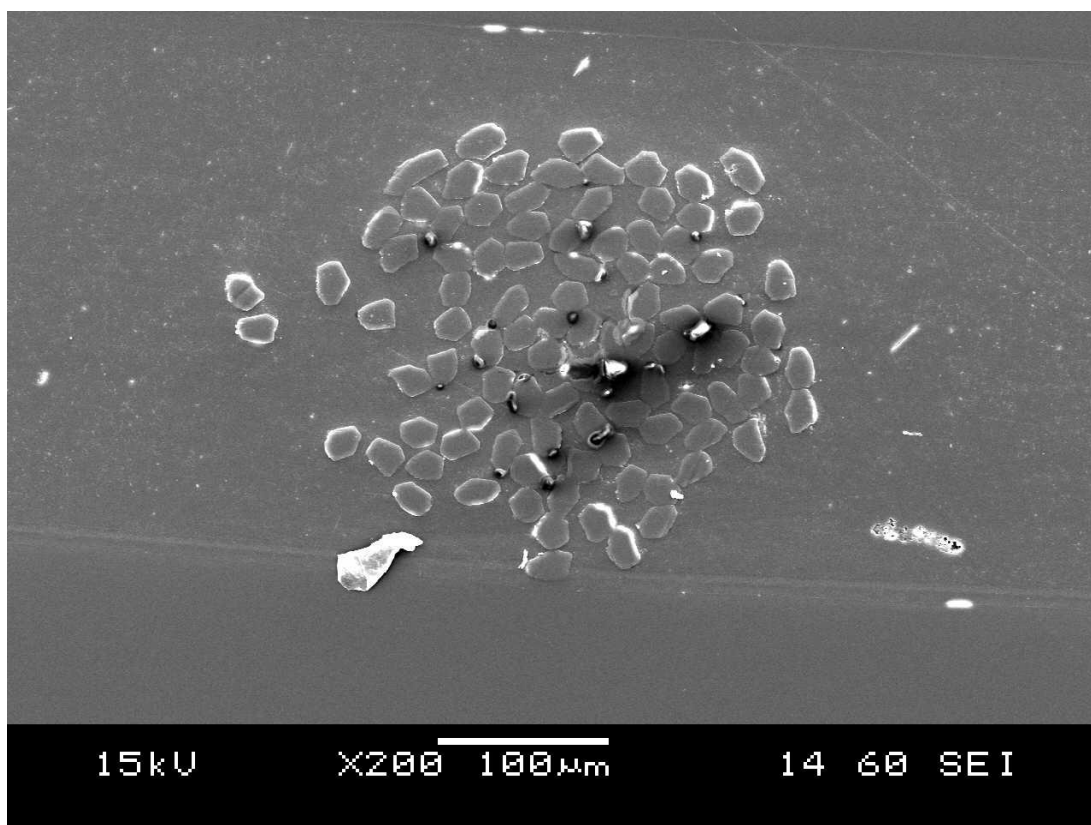
Az elektronmikroszkópos felvételek alapján megállapítottuk, hogy az elemi szálak keresztmetszete konvex sokszög, legtöbbször hatszög formájú (23. ábra). Ezáltal a mérések alapján a szál átmérőt elliptikus módon közelítettük, lényegesen pontosabb értéket kapva az előző optikai mikroszkóppal történő méréssorozathoz képest. A SEM-en megmértük az elemi szál leghosszabb átmérőjét, amely az ellipszis nagytengelye - jelölése: a - és az erre merőleges legkisebb átmérőt, amely az ellipszis kistengelye - jelölése: b - lesz. Ebből a következő egyenlettel számolva, szintén megkaphatjuk az elemi szál lineáris sűrűségét:

$$q_e = \frac{a}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot \pi \cdot \rho \quad (14)$$

ahol a - az ellipszis nagytengelye,

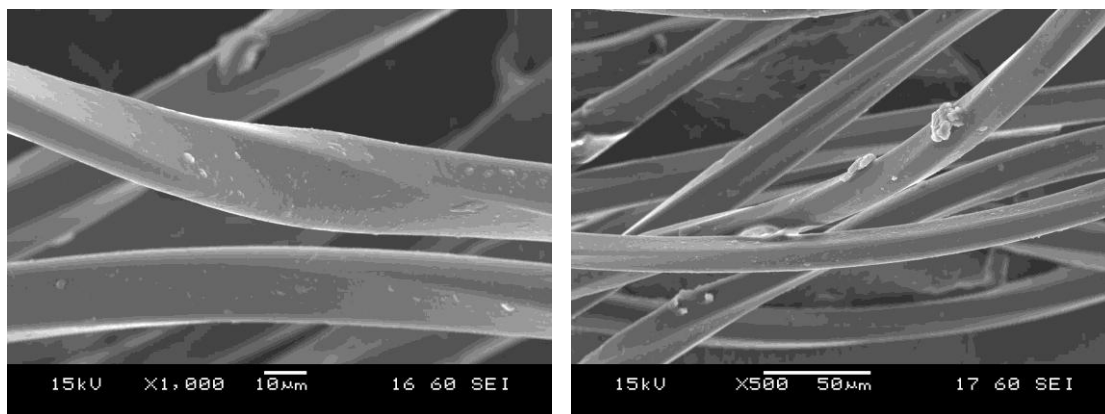
- b - az ellipszis kistengelye,
- q_e - az elemi szál lineáris sűrűsége,
- ρ - a PES sűrűsége (1,38 g/cm³).

A felvételek alapján képet kaphattunk az elemi szálak elrendeződéséről a fonalon belül, a jó minőségű felbontásnak köszönhetően pedig szabad szemmel is meghatározhatóvá vált a szálszám (24. ábra).



24. ábra Elemi szálak sokasága a szálkötegben

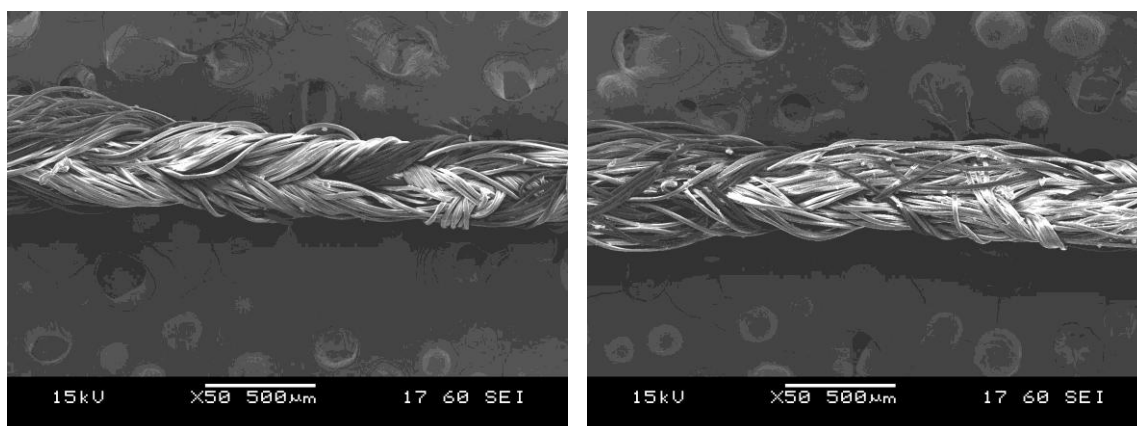
Az elemi szálak hosszirányú csavarodásáról is szemléletes felvételeket (25. ábra) készítettünk a berendezés segítségével. A szálak sokszög keresztmetszete folyamatosan csavarodik, így tűnhetett úgy az optikai mikroszkópos felvételeken (14-15. ábra), hogy a szálak kör keresztmetszetűek.



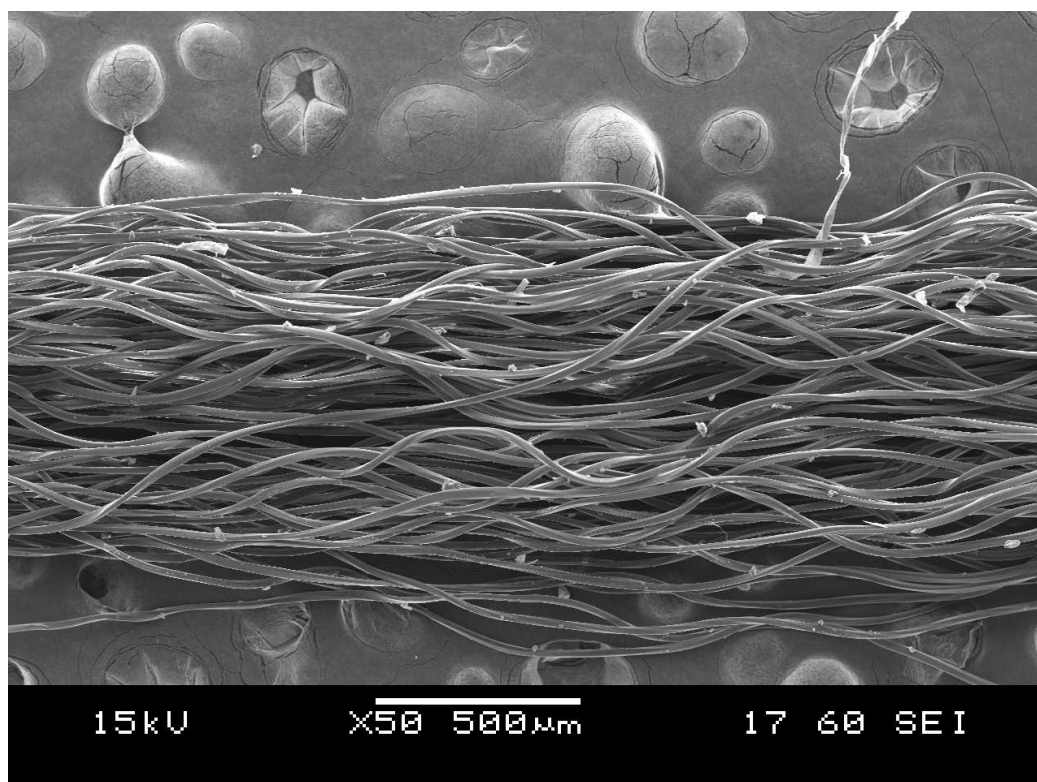
25. ábra Elemi szálak hosszirányú képe

Elektronmikroszkópos fonalvizsgálat

Az elektronmikroszkópos vizsgálatok a fonal esetében már inkább csak a fonal szerkezetének pontosabb bemutatására szolgáltak, hiszen az optikai mikroszkópos vizsgálatok során, minden szükséges adatot meghatároztunk a számításokhoz. A SEM-es felvételeken nagyon jól látszik a sodrott részek hol szabályos, hol szabálytalan kialakítása, és a sodratlan részekben is jól kivehető az elemi szálak szabálytalan elrendeződése (26-27. ábra).



26. ábra Szabályosnak tűnő és szabálytalan sodrott szakaszok



27. ábra Sodratlan szabad szálköteg szakaszok

3.4 Következtetések, érdekességek

Az optikai mikroszkópon megvizsgáltuk az elszakított fonalak és szálak szerkezetét is (28. ábra). Továbbá képeket készítettünk az elszakított fonalakról is. Az elszakadt és megnyúlt elemi szálak érdekes képet mutattak. A fonal gyengébben sodort részei a szakítás hatására összekuszálódtak és hagymakupola szerű alakzatot vettek fel (29. ábra).

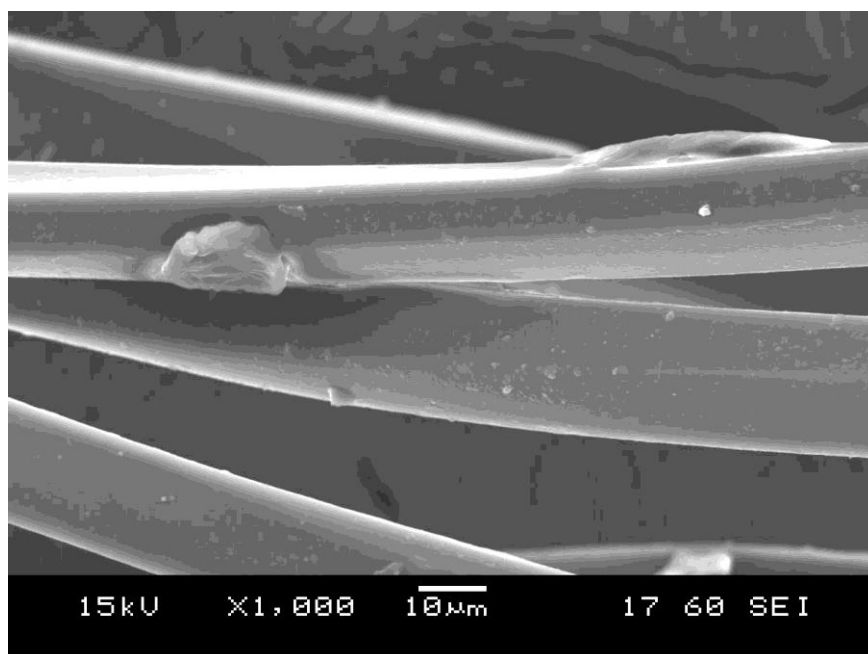


28. ábra Elszakadt fonal mikroszkópos képei 5 és 20-szoros nagyításban



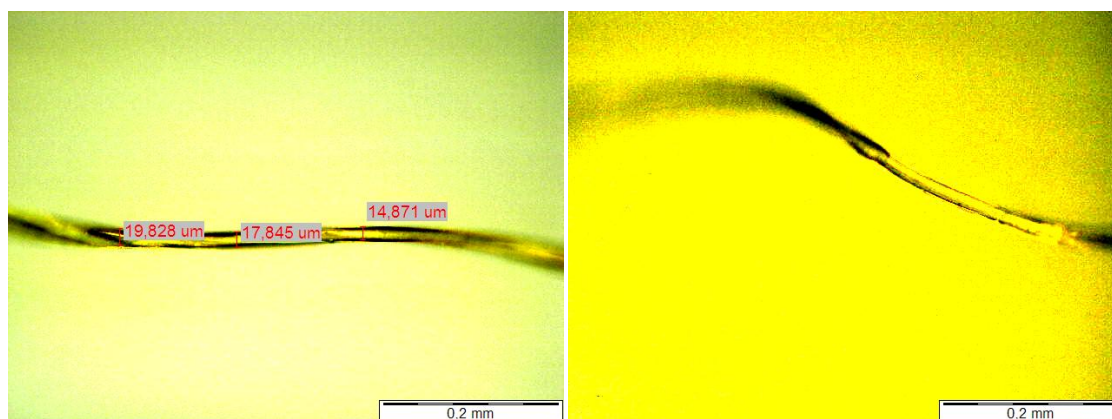
29. ábra A szakítóerővel megerhelt fonal szerkezete

A szálvizsgálatok során sikerült közelítő értékeket kapnunk a szál átmérőre és az elemi szál lineáris sűrűségére vonatkozólag, amiből a későbbiekben a fonal száltartalmára vonatkozó értékeket is kiszámolhatunk. A mikroszkópos felvételek alapján sikerült meghatároznunk a mesterséges poliészter szál pontos geometriai kialakítását. A szálakon találtunk ragasztó vagy kötőanyag jelenlétére utaló apró szemcséket, ami az alábbi ábrán (30. ábra) nagyon jól látható.



30. ábra Szálak felületén lévő ragasztóanyag szemcsék

A szálak csavarodó szerkezetéből következik, hogy az elemi szálak a tér minden irányába kanyarodnak, így ezért volt olyan nehéz az optikai mikroszkópon megfelelő mélységélességű képeket készíteni az adott szálszakaszból (31. ábra).



31. ábra Mélységélességi beállítások az optikai mikroszkópon

Az egyenes szakaszokon megfelelő az élesség, míg a csavarodóknál a mélységélesség torzulása figyelhető meg. Az elemi szálak esetén megpróbáltuk a szálakat két üveglap közé fogni, ekkor viszont a képi minőség romlott jelentősen.

3.5 Kiértékelés

Ebben a pontban az előzőekben bemutatott vizsgálati módszerek és képletek segítségével ismertetjük a mérési eredményeinket.

Vizsgálatainkat az elemi szálak átmérőjének meghatározásával kezdtük, ezeket optikai mikroszkóp segítségével a 8 vizsgált szálon több helyen is megmértük. Az átmérőket itt kör keresztmetszetre becsültük. A 3. táblázat segítségével megállapítható, hogy a legnagyobb mért átmérő 24,78 μm , a legkisebb 13,87 μm volt. Az elemi szálak átlagosan 18,71 μm átmérővel rendelkeztek. Az egyedi értékek átlag körüli ingadozását jellemző négyzetes szórás pedig 2,38 μm volt. Az adatokhoz tartozó részletes táblázat a mellékletben található, a 3. táblázat egy egyszerűsített képet ad a számításokról.

Átlag az összes elemi szálát tekintve	18,71 μm
Szórás az összes elemi szálát tekintve	2,38 μm
Maximum az összes elemi szálát tekintve	24,78 μm
Minimum az összes elemi szálát tekintve	13,87 μm

3. táblázat Elemi szálak átmérőire vonatkozó adatok

Az elemi szálakhoz tartozó lineáris sűrűséget az elliptikus közelítés segítségével számoltuk. Elliptikus közelítő módszerrel az elemi szálak keresztmetszetének területe átlagosan $296,64 \mu\text{m}^2$ volt. A lineáris sűrűség átlag értéke $0,41 \text{ tex}$ volt.

Elemi szálak keresztmetszetének vizsgálata elektronmikroszkópos felvételeken				
Mérés időpontja: 2012.10.18				
Elliptikus módszerrel való közelítés a szálkeresztmetszet nagyságára				
Értékek	Nagytengety hossza [μm]	Kistengely hossza [μm]	A közelítő ellipszis nagysága [μm^2]	Elemi szálak lineáris sűrűsége [tex]
Átlag	21,65	17,51	296,64	0,41
Szórás	1,60	2,00	31,74	0,04
Minimum	19,00	13,10	245,04	0,34
Maximum	25,70	20,80	371,71	0,51

4. táblázat Elemi szálak vizsgálata és kiértékelése

További szál átmérőre vonatkozó táblázatok a mellékletben találhatóak.

A fonalvizsgálatok során a fonalátmérőket és a fonálra vonatkoztatott lineáris sűrűséget számoltuk, melyeket az 5. táblázat tartalmaz.

A 8 db mintafonálra vett átlagok [μm]		
Nr.	Átlagok	Szórás
1	433,39	64,03
2	443,26	66,87
3	463,62	70,00
4	443,25	106,30
5	500,64	10,75
6	508,49	10,98
7	448,67	107,56
8	407,94	124,11
Összesített	456,16	70,08

5. táblázat Fonalátmérők átlaga és az átmérők szórásának átlaga

Fonaltömegre és lineáris sűrűsége vonatkozó adatok			
Mérés időpontja: 2012.10.19.			
Mérés sorszáma	Fonal hossz [mm]	Tömeg [g]	1000 méter fonál tömege [g/km=tex] lineáris sűrűség
1.	100	0,0038	38,0
2.	100	0,0038	38,0
3.	100	0,0037	37,0
4.	100	0,0036	36,0
5.	100	0,0037	37,0
6.	100	0,0037	37,0
7.	100	0,0037	37,0
8.	100	0,0037	37,0
9.	100	0,0038	38,0
10.	100	0,0038	38,0
11.	100	0,0039	39,0
12.	100	0,0038	38,0
13.	200	0,0075	37,5
14.	200	0,0074	37,0
15.	200	0,0076	38,0
16.	200	0,0075	37,5
17.	200	0,0074	37,0
18.	200	0,0074	37,0
19.	200	0,0075	37,5
20.	200	0,0076	38,0
Átlag	-	-	37,47
Szórás	-	-	0,66
Összes	2800	0,1049	37,46

6. táblázat Lineáris sűrűség meghatározása

A 6. táblázatból megállapítottuk, hogy a fonál lineáris sűrűsége átlagosan 37,5 tex körüli értéket vesz fel.

Ebből és az elemi szálak lineáris sűrűségéből már könnyen kiszámíthattuk (13) a fonál átlagos száltartalmát (7. táblázat). A szálszám 91,6~92 lett. Tehát az adott fonalban közelítőleg 92 darab elemi szál található.

Szálszám mérése lineáris sűrűséggel	
Átlagos lineáris sűrűsége a fonalnak [tex]	37,50
Átlagos lineáris sűrűsége az elemi szálnak [tex]	0,41
Szálszám [db]	91,60

7. táblázat Fonal átlagos keresztmetszeti szálszáma

A fonalakban lévő elemi szálakat szabad szemmel is megszámoztuk az elektronmikroszkópos felvételeken. A fonalakra vonatkozó száltartalmat az erősebben sodort részekben számoltuk, hiszen itt nincsenek nagy hézagok a szálak között.

A szabad szemmel történő számlálás során az alábbi értékeket kaptuk 10 fonalkeresztmetszet vizsgálata után (8. táblázat):

Szálszám mérése szabad szemmel	
mérés sorszáma	mért adatok (elemi szál db/fonal)
1	94
2	96
3	95
4	94
5	95
6	93
7	94
8	96
9	97
10	93
átlag	95
szórás	1,34
max	97
min	93

8. táblázat Szálszámok mérése szabad szemmel

A szabad szemmel mért értékek és a lineáris sűrűséggel számított értékek közelítőleg megegyeznek, tehát a mérések pontosnak bizonyultak. Megállapítható, hogy a fonalban átlagosan 91-95 elemi szál található.

A szálak speciális szerkezetére vonatkozóan megállapíthattuk, hogy az erősen sodort részeknél az átlagos szál átmérő értéke 334 μm -es; míg a lazább szerkezetnél 575 μm -es,

több, mint másfélszerese. Ezeket az értékeket az összes mért átmérő alapján számítottuk. A kapott értékeket egy 400 μm -es limittel választottam külön, úgy véltük ez megfelelő számérték a kétféle típusú fonalátmérő számítására és különválasztására. A mért értékek maximuma 1070 μm , a minimuma 240 μm volt. A szórás a sodrott részek átmérőire vonatkozóan jelentősen kisebb volt, mint a sodratlan részek esetében (9. táblázat).

Fonalstruktúra-átmérők [μm]		
Érték	Sodrott	Sodratlan
Átlag	334,42	575,02
Szórás	36,13	176,72
Maximum	396,63	1069,69
Minimum	240,38	400,63

9. táblázat Fonalstruktúrára vonatkozó értékek

Az átlagos fonalátmérő meghatározása esetében a súlyozott átlag alapján, a sodratlan részek kétszeresét vettük, mivel ezek közel dupla olyan hosszúságúak voltak, mint a sodrott részek, hozzáadva az átlagos sodrott rész nagyságát, majd ezt leosztva hárommal. Az így kapott átlagérték: 494,8 μm

A fonalvizsgálat során a fonal sodrott és sodratlan részeinek hosszát is megmértük (10. táblázat). A nem sodort szakaszok átlagos hossza 7,9 mm, több mint kétszerese a sodortakénak (3,71 mm).

Fonalszakaszok [mm]		
Érték	Sodrott	Sodratlan
Átlag	3,71	7,9
Szórás	0,73	1,57
Maximum	5,37	16,0
Minimum	2,35	7,0

10. táblázat Sodratlan és sodrott szakaszhossz

A fonal szerkezeti kialakítására vonatkozó további mérési eredményeket és táblázatokat a melléklet tartalmazza.

4. Szilárdsági vizsgálatok

A fonal geometriai vizsgálatát követően a szilárdsági vizsgálatokat folytattuk le. Elsődleges célunk az volt, hogy megismerjük a fonal átlagos szakítóerejét a különböző befogási hosszaknál, illetve ezen adatokból különböző statisztikai módszerek segítségével bizonyítsuk Peirce elméletét [4].

4.1 Felhasznált berendezések

A fonalszakító vizsgálatot egy ZWICK Z005 típusú szakítógépen folytattuk le (32. ábra).



32. ábra ZWICK Z005szakító gép [2]

A fontosabb jellemzőit a 11. táblázat tartalmazza:

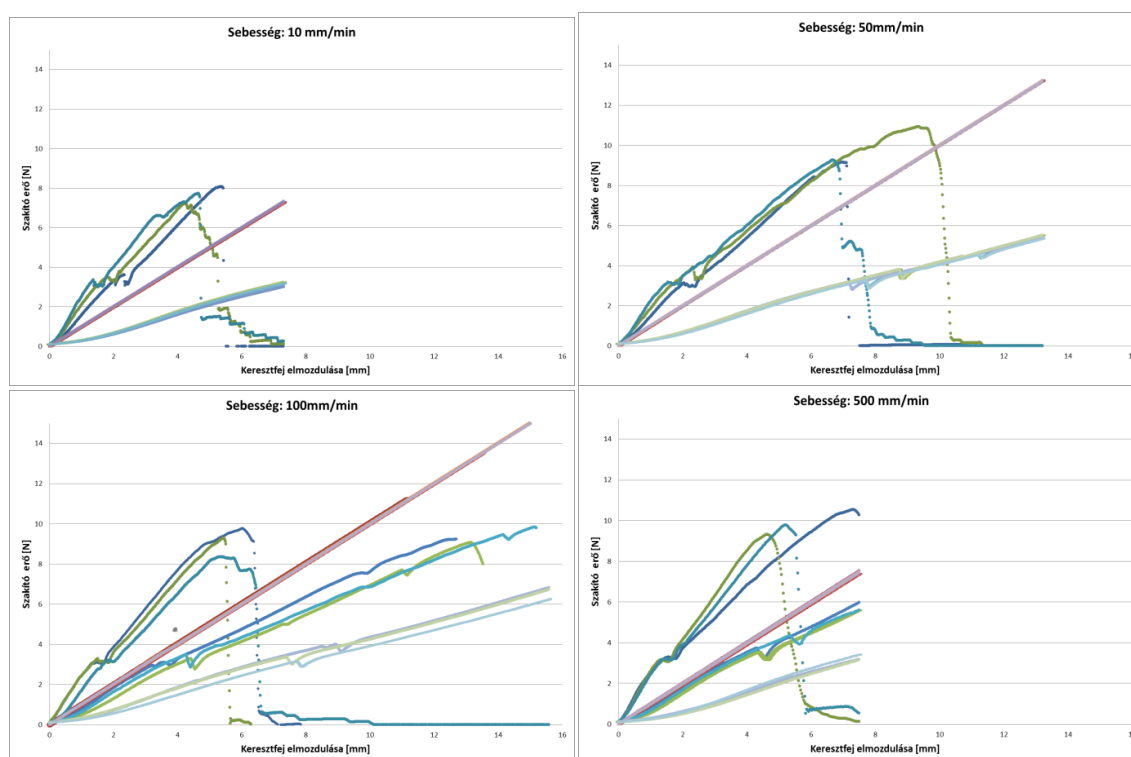
ZWICK Z005 paraméterei	
Sebességtartomány	0,0005-3000 mm/min
Maximális terhelőerő	5 kN
Erőmérő cella érzékenysége	0,00001 N
Erőmérő cella terhelhetősége	20 N

11. táblázat Szakító gép paraméterei

4.2 Vizsgálati sebesség kiválasztása

A szakítósebesség kiválasztásához előzetes méréseket végeztünk. Ennek során 10, 50 és 100 mm befogási hosszak mellett 20-20 mérést végeztünk 10, 50, 100 és 500 mm/min szakítósebességekkel. Az eredményeket a 33. ábra szemlélteti.

A további vizsgálatokat 100 mm/min szakítósebességgel végeztük, mivel az előzetes mérések alapján megállapítottuk, hogy ennél a sebességnél még elegendő idő van a deformációs folyamatokra, ugyanakkor a mérés nem túl időigényes.



33. ábra Szakítósebességek összehasonlítása

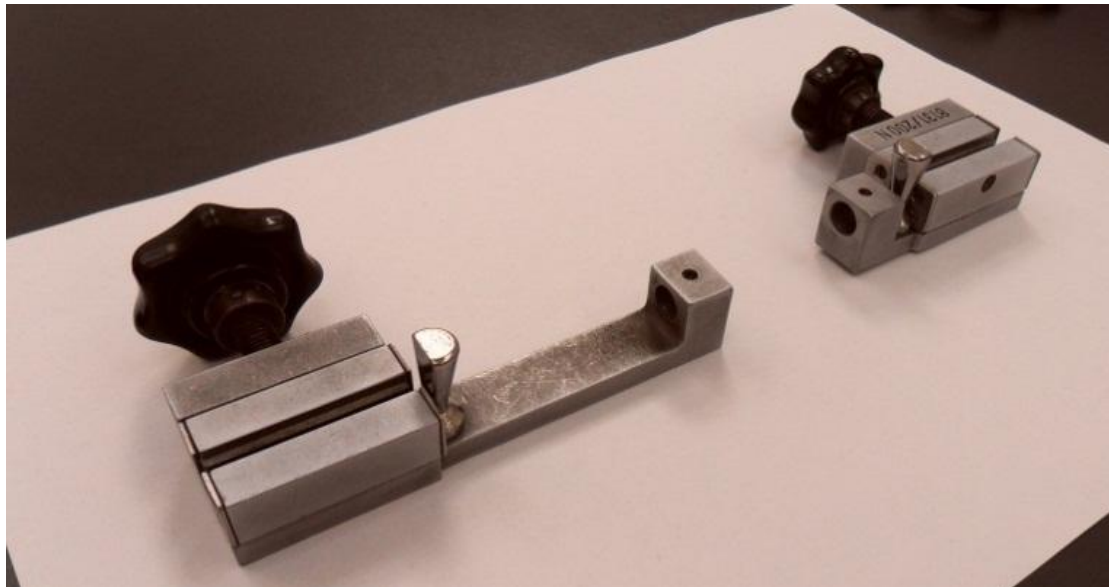
4.3 I. mérésorozat és értékelése

Az I. mérésorozat során a különböző hosszúságú fonalakon más-más mennyiségű mérést végeztünk, melyek számát a 12. táblázatban tüntettük fel:

Mérési hossz [mm]	Mérések száma [db]
1	20
10	100
50	50
100	30
500	20

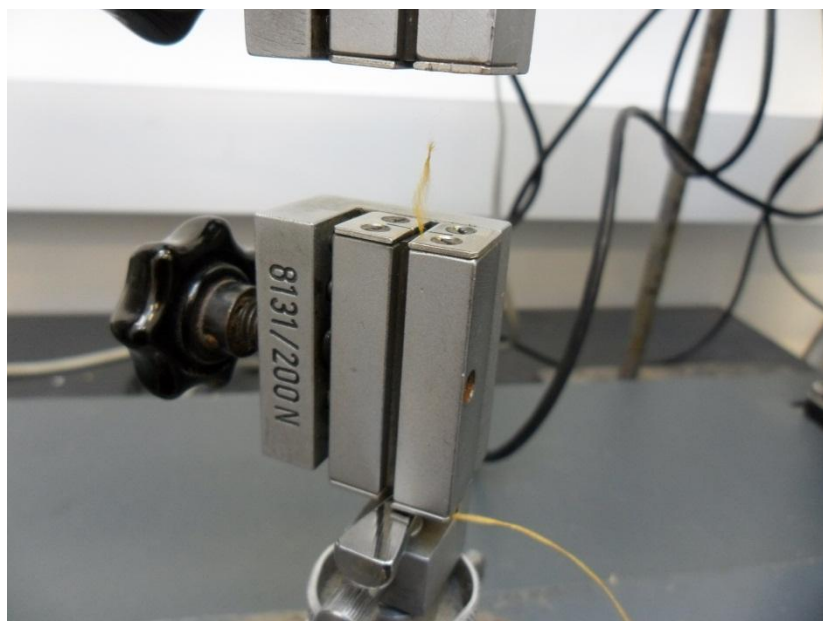
12. táblázat A 100 mm/min-es sebességgel végrehajtott mérések száma a mérési hossz függvényében

A mérések elvégzése során figyelembe vettük a helyiség hőmérsékletét és páratartalmát is, melyeket a *Mellékletben* található mérési jegyzőkönyvekben tüntettük fel. A fonal rögzítéséhez a következő 8121/200N jelzésű befogófejeket alkalmaztuk (34. ábra).



34. ábra Méréseink során használt 8121/200N jelzésű befogópofa

Ügyeltünk, hogy minden mérést megelőzően a fonalakat úgy rögzítsük a két végüknél, hogy az előre meghatározott 0,1 N nagyságú előfeszítési erőt ne haladja meg (35. ábra). A mérés folyamatát erő [N] – elmozdulás [mm] görbén követtük nyomon, majd ezen adatok alapján vettük az átlagos szakítóerőket, a hozzájuk tartozó megnyúlásokat, illetve statisztikai alapparaméterek (négyzetes és relatív szórás, minimum és maximum) számításával kiértékeltek őket.



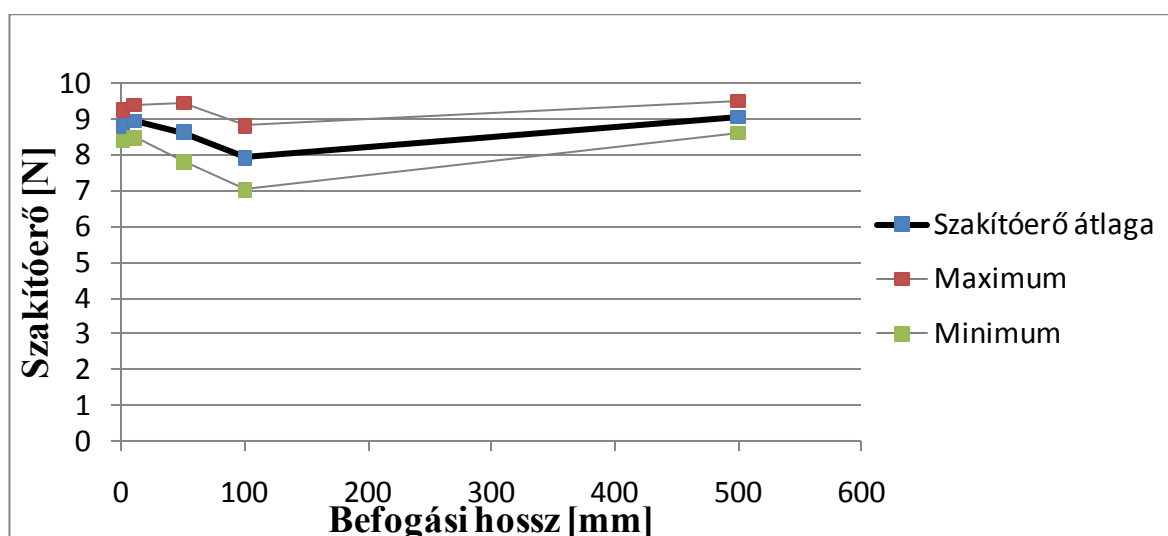
35. ábra Fonalszakítás

Elsőként táblázatba foglaltuk a kapott átlagos szakítóerőket a befogási hossz függvényében, majd vizsgáltuk, hogy milyen trendet mutatnak (13. táblázat).

Befogási hossz [mm]	Átlagos szakítóerő [N]	Átlagos szakítóerő szórása [N]	Átlagos szakítóerő maximuma [N]	Átlagos szakítóerő minimuma [N]
1	8,83	0,87	9,27	8,40
10	8,95	0,92	9,41	8,49
50	8,63	1,64	9,45	7,82
100	7,93	1,80	8,83	7,03
500	9,07	0,90	9,52	8,62

13. táblázat I. mérősorozatban meghatározott átlagos szakítóerő értékek

A 36. ábrán látható, hogy az 500 mm-es befogási hosszhoz tartozó érték meglepően magas lett. Nem követi azt a tendenciát, mint a 100 mm alatt mért szakítóerők. Ismeretes ugyanis, hogy a befogási hossz függvényében általában csökken az átlagos szakítóerő, mivel egy adott hosszúságú fonal mindig a leggyengébb pontján fog elszakadni. Ha az adott fonalszakasz egy hosszabb szakasz része, a fonal szakadása akkor is vagy az adott fonalszakasz leggyengébb helyén, vagy a hosszabb szakasz egy még gyengébb pontján, azaz kisebb szakítóerőnél fog bekövetkezni. Úgy látszik, mintha ez a törvényszerűség itt nem igazán érvényesülne.



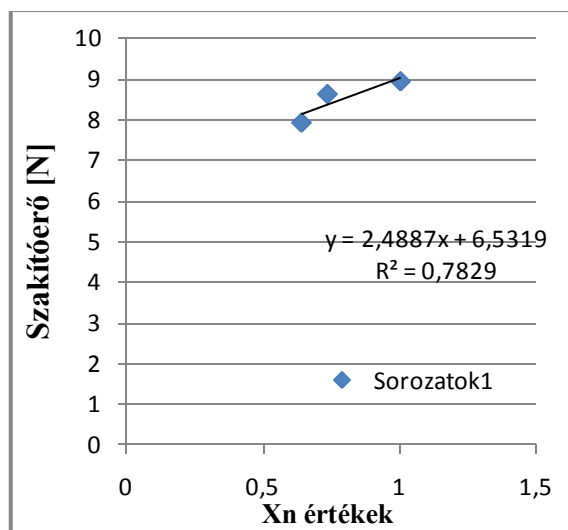
36. ábra Átlagos szakítóerő a befogási hossz függvényében (I. mérősorozat)

Az eredmények értékelése során először azt vizsgáltuk, hogy mennyire illeszkednek a mért adatok az eredeti és a módosított Peirce modellre.

Ennek érdekében kiszámítottuk a (10) módosított Peirce egyenlethez az X_n értékeket a c paraméter 0,1 értéke mellett (15. táblázat). Bázis befogási hosszunk a 10 mm-t választottuk, mivel abból volt a legtöbb mért adat. Az 1 mm-es mérést csupán a tájékoztatás részeként vettük figyelembe, mivel a Peirce modell kimondja, hogy csak a bázis befogási hosszánál nagyobb befogási hosszakra vonatkozó szakítóerő értékek becsülhetők meg kellő pontossággal [4]. A módosított Peirce modellt a 10, az 50 és a 100 mm befogási hosszhoz tartozó adatokból határoztuk meg úgy, hogy az X_n függvényében ábrázoltuk a szakítóerőket (37. ábra), majd a három pontra fektettünk egy közelítő egyenest és kiszámítottuk a paramétereit. Ennek alapján az $Y=A+BX_n$ egyenes paramétereinek értéke $A=6,531$ -re és $B=2,488$ -re adódott.

Befogási hossz [mm]	0	1	10	50	100	500
n	0	0,10	1,00	5,00	10	50
Fs Átlagos szakítóerő [N]		8,83	8,95	8,63	7,93	9,07
X_n [-] ($c=0,1$)	1,62	1,41	1,00	0,74	0,64	0,47
Fs_módosított Peirce [N] ($A=6,531$; $B=2,488$)	10,55	10,03	9,02	8,36	8,13	7,69
Fs_eredeti_Peirce [N]		11,21	8,95	7,88	7,52	6,85

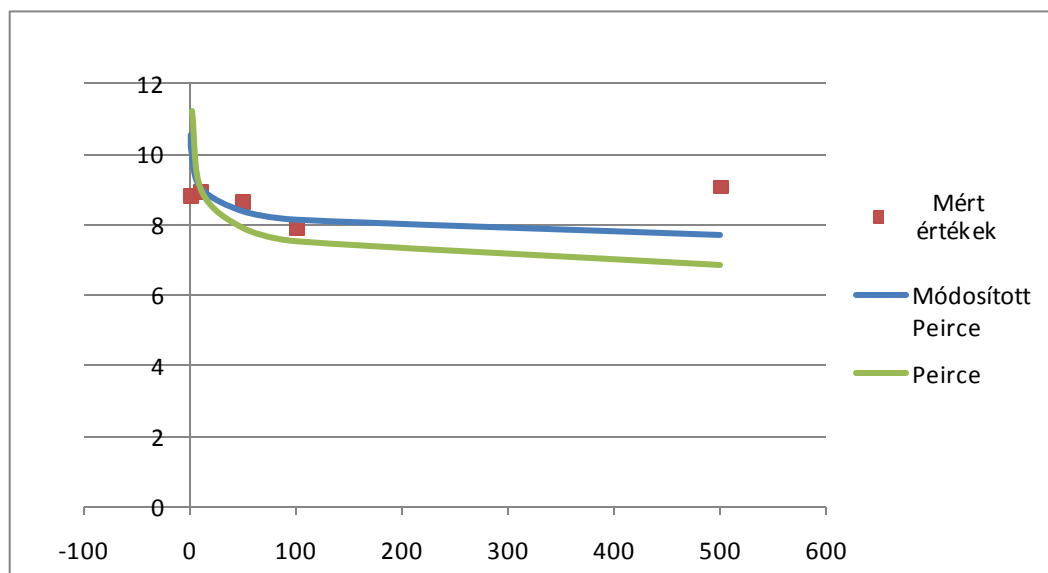
15. táblázat Peirce modellhez szükséges adatok



37. ábra Az A és B paraméter meghatározásához szükséges trendvonal illesztés

Ezek után a meghatározott paraméterekkel már számolhatók mind az eredeti, mind a módosított Peirce modell szerinti szakítóerők. Az értékeket néhány befogási hossz esetére a 15. táblázat tartalmazza.

A mért pontokat, valamint a Peirce modell és az annak módosítása alapján számított görbéket a 38. ábra szemlélteti.



38. ábra Módosított Peirce modell illesztése a mért pontjainkra

Az 500 mm-es adat nagyon eltért a többitől. Ennek okaként először valamilyen mérési hibára gyanakodtunk, valamint az A-B értékek pontosabb számításához több pontra

volt szükségünk háromnál, így tovább folytattuk a mérési sorozatok készítését. További befogási hosszakat vizsgáltunk meg, vajon azok illeszkednek-e a számított görbére.

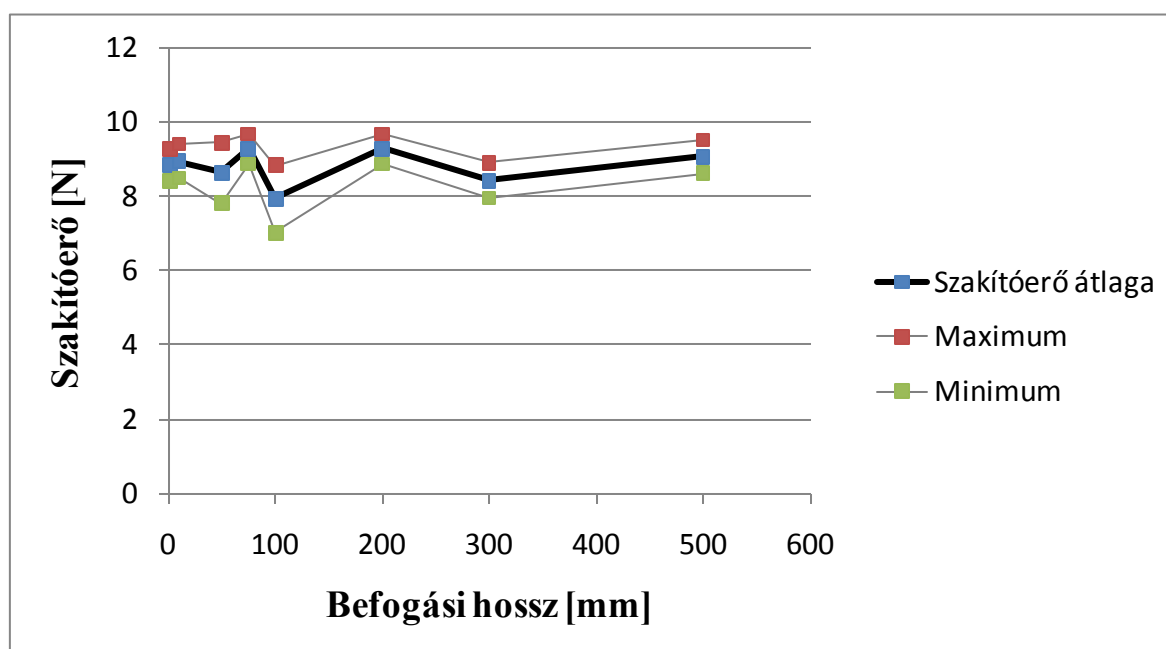
4.4 II. méréssorozat és értékelése

A második részben kerestük a 75 mm-es, a 200 mm-es és a 300 mm-es befogási hosszakhoz tartozó átlagos szakítóerőket. Méréseink körülményei ugyanolyanok voltak, mint korábban. Ugyanúgy 100 mm/min-os szakítósebességet alkalmaztunk, illetve a Zwick Z005 típusú szakítógépet használtuk. A mérések számát a 16. táblázatban foglaltuk össze.

Mérési hossz [mm]	Mérések száma [db]
75	20
200	20
300	20

16. táblázat II. Méréssorozat alkalmával végzett mérések

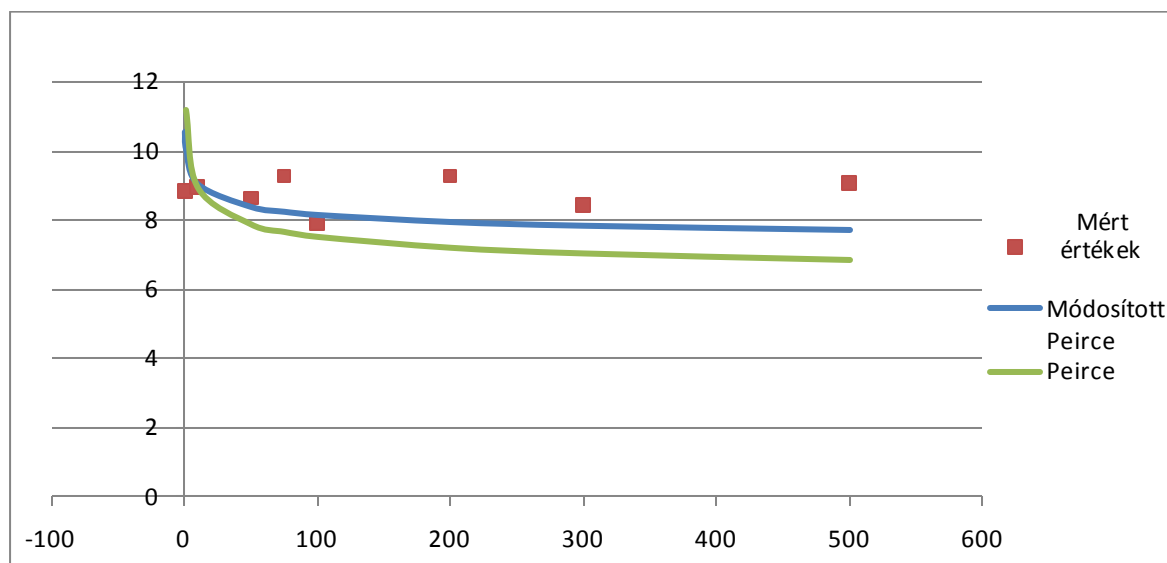
Ezen feltételek mellett ismét elkészítettük az átlagos szakítóerő – befogási hossz diagramot (39. ábra), amelyben a minimum és maximum értékeket is megjelenítettük.



39. ábra Átlagos szakítóerő a befogási hossz függvényében (II. méréssorozat)

Az a feltételezésünk, hogy az 500 mm-es mérés kiugrása valamilyen mérési hibából adódóan történt, nem igazolódott be. A szakítóerő – befogási hossz függvényt (39. ábra) szemlélve úgy látszik, mintha a szakítóerő értékek függetlenek lennének a befogási hosszától. Ez azonban nem lehetséges, mint már korábban indokoltuk.

Az összes mért pontot, valamint a Peirce modell és az annak módosítása alapján számított görbéket a 40. ábra szemlélteti.



40. ábra Peirce illesztése a mért pontokra (II. méréssorozat)

A mérési pontok szemmel láthatóan nem jól illeszkednek sem az eredeti, sem a módosított Peirce modellre (40. ábra). Ránézésre véletlenszerűnek látszanak. Bizonyos, hogy a Peirce összefüggés sem az eredeti, sem a módosított formájában nem teljesül ennél a speciális fonalnál. Az eltérések okainak elemzése során a következők merültek fel :

- Peirce az elméletét *homogén* (egyenmű, azonos elemekből álló) fonalstruktúrára állította fel [4]. Az általunk vizsgált fonal azonban nem tekinthető annak, mivel periodikusan váltakozó, *sodrott és sodratlan* fonalszakaszokból épül fel.
- Nem hagyhatók figyelmen kívül a helytelen befogásból adódó hibák sem. Sokszor előfordult, hogy a fonal közvetlenül valamelyik befogó pofánál szakadt el [1].
- A fonalak befogása során véletlenszerűen került a befogásokba sodrott vagy sodratlan fonalszakasz.

Felvetődött továbbá az is, hogy vajon lehetne-e a Peirce modellt úgy tovább módosítani, hogy mégis csak illeszkedjenek rá a mért eredményeink.

A fentiek tisztázása céljából további elméleti és gyakorlati vizsgálatok elvégzését vettük tervbe. A Peirce modell további módosítása mellett szükségesnek látszott a befogási mód gyakorlati vizsgálata és az elemi szálak szakító vizsgálata is.

4.5 III. mérésorozat és értékelése

A mérési adatokat elemezve felmerült, hogy ha egy görbére nem is, de talán egy sávra illeszkedhetnek a mért, erősen ingadozó szakítóerő értékek. Ezért megpróbáltuk a mért adatok egy alsó és felső becslését előállítani, és az adatokra egy »Peirce-sáv«-ot illeszteni.

Peirce összefüggés szétválasztása

A »Peirce-sáv« illesztéséhez bázispontként az $l_0=10$ mm befogási hosszt választottuk, mivel itt 100 db, azaz statisztikai értelemben is elegendően sok mérési adat áll rendelkezésre. Első lépésként az l_0 befogási hossz mellett mért $F_S(l_0)$ szakítóerő adatokat szétválasztottuk átlagértéken aluli, $F_{S,Bott}(l_0)$ és felüli, $F_{S,Upp}(l_0)$ értékekre, meghatároztuk ezek átlagértékeit és szórásait, majd ezekre az alsó és felső átlagértékekre külön-külön kiszámítva az eredeti Peirce-féle összefüggést, kaptuk az alsó, *Peirce-Bott* és felső, *Peirce-Upp* becsléseket. A 42. ábrán jól látható, hogy az eredeti módosított Peirce becsléshez képest (kék vonal) az alsó és felső Peirce becslések (sötét és világos zöld szaggatott vonal) által határolt sáv már közelebb áll a mért pontokhoz, de még mindig nem foglalja magába az összes mérési pontot.

A mérési pontokat megfigyelve arra a következtetésre jutottunk, hogy annak a »Peirce-sáv«-nak a határai, amely a mérési pontokat magába foglalja, valahol az l_0 befogási hossz mellett mért alsó ill. felső szakítóerő átlagok és a Peirce által becsült alsó ill. felső szakítóerő átlagok között fekszenek. Ezért egy jobban illeszkedő »Peirce-sáv«-hoz juthatunk, ha az l_0 befogási hossz mellett mért alsó ill. felső szakítóerő átlag és az alsó ill. felső Peirce becslés konvex lineáris kombinációját alkalmazzuk.

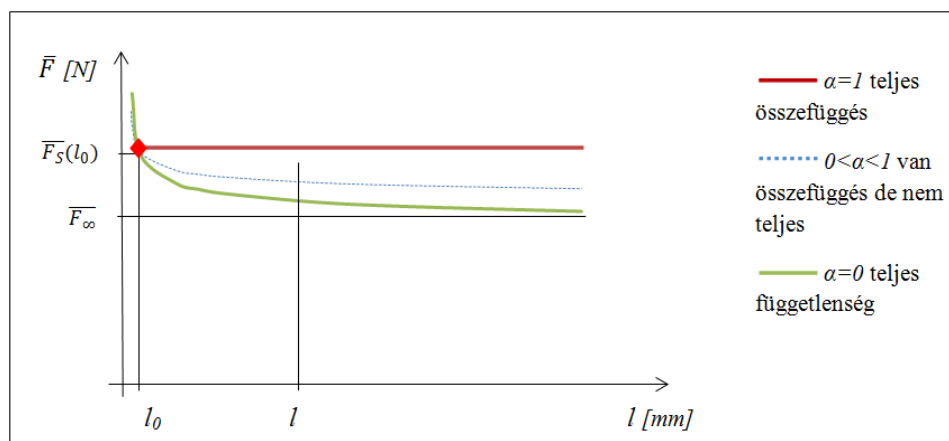
Az $\bar{F}_S(l_0)$ mért szakítóerő átlag és az $\overline{F_{S,Peirce}}(n \cdot l_0)$ Peirce által becsült szakítóerő átlag konvex lineáris kombinációját a következő (16) egyenlettel kapjuk [4]:

$$\hat{F}(n \cdot l_0) = \alpha \cdot \bar{F}_S(l_0) + (1 - \alpha) \overline{F_{S,Peirce}}(n \cdot l_0) \quad (16)$$

ahol az α egyfajta összefüggőségi, míg az $1-\alpha$ egyfajta függetlenségi tényező. Így $\alpha=1$ esetén *teljes összefüggésről* beszélhetünk, vagyis egy $n \cdot l_0$ hosszú fonal minden egyes l_0 hosszúságú szakaszának átlagos szakítóereje azonos lenne (41. ábra).

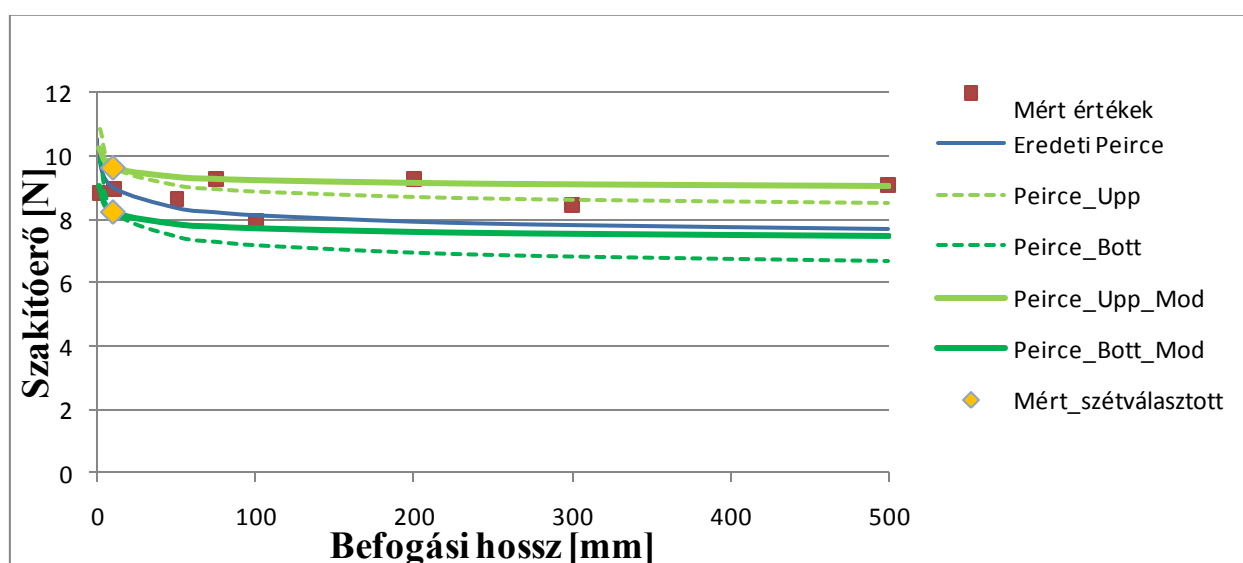
Ha $\alpha=0$, akkor *teljes függetlenségről* beszélhetünk, vagyis egy $n \cdot l_0$ hosszú fonal minden egyes l_0 hosszúságú szakaszának szakítóereje független lenne egymástól, tehát nagy szilárdságú hely után ugrásszerűen nagyobb vagy kisebb szilárdságú hely következhet.

Ha viszont $0 < \alpha < 1$, akkor van valamilyen *összefüggés*, de nem teljes.



41. ábra A konvex lineáris kombináció hatása

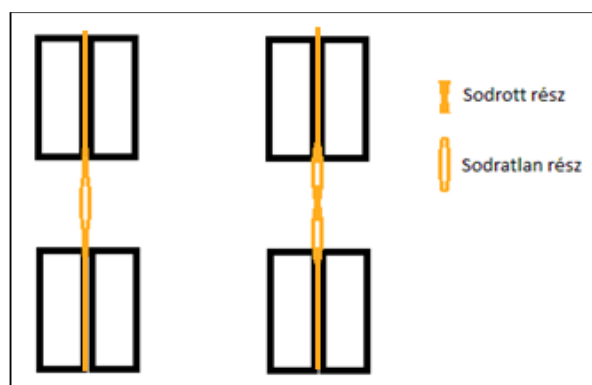
Az $\alpha=0,5$ értéket választva, az alsó ill. a felső Peirce becslések, valamint az l_0 befogási hossz mellett mért alsó ill. felső szakítóerő átlagok konvex lineáris kombinációjával kapjuk az alsó, *Peirce-Bott-Mod* és a felső, *Peirce-Upp-Mod* becsléseket (42. ábra, sötét ill. világos zöld folytonos vonal). Ezzel végre megkaptuk azt a két határgörbét, amelyek között a mérési eredményeink elhelyezkednek. A keresett, a mérési pontokat magába foglaló »Peirce-sáv«-ot tehát ezzel a két határgörbével definiálhatjuk.



42. ábra Peirce-sáv illesztése a mérési pontokra

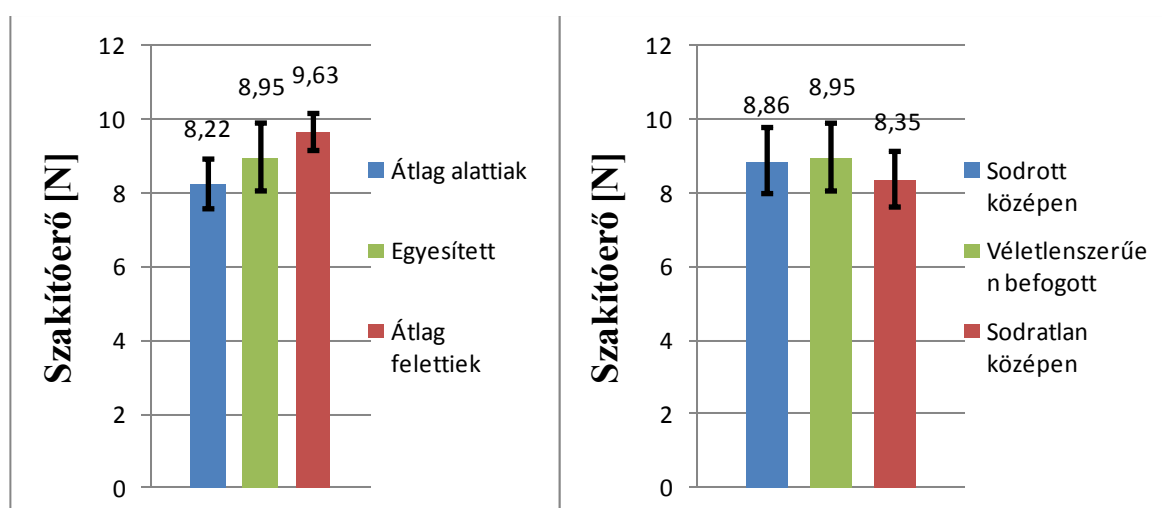
Sodrott – sodratlan részek figyelembevétele

10 mm-es befogási hosszon teszteltük azt a feltevésünket, miszerint befolyással van a szakadásra az a tény, hogy van befogva az adott fonál. 25-25 mérést végeztünk mindegyik esetben úgy, hogy egyszer a sodrott, másszor a sodratlan részt fogtuk be középre (43. ábra).



43. ábra Fonal elhelyezkedése a befogópók között

Előbb a korábbi, véletlenszerű méréseket ábrázoltuk egy oszlopdiagramon (44. ábra). Szétválasztva feltüntettük az átlagérték alatti átlag szakítóerőt illetve az átlagérték feletti szakítóerőt összehasonlítva az összes mérésre számolt átlaggal (egyesített). Végül megnéztük, hogy a véletlenszerűen befogott fonál szakítóereje milyen viszonyban van a szisztematikus befogási mód mellett elszakított fonallal.



44. ábra Átlagérték alatt illetve feletti középértékek, ill. sodrott és sodratlan részek átlag szakítóerejének összehasonlítása 10 mm-es hossz

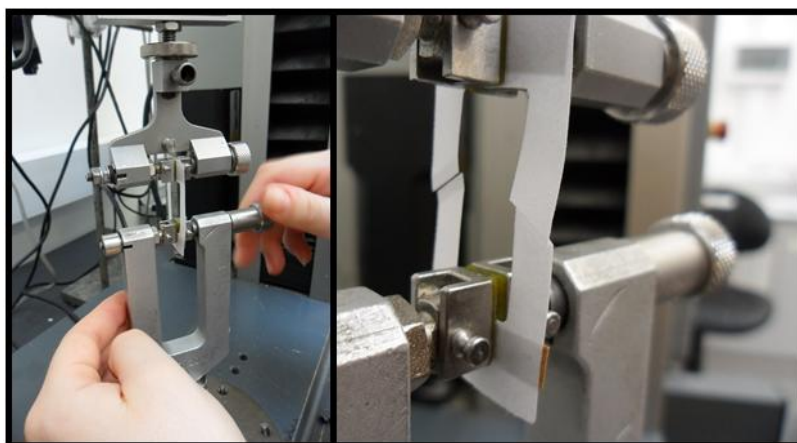
A középen sodratlan szakaszok szakítási eredményei jó közelítéssel a véletlen befogású szakaszok átlag alatti eredményeivel egyeznek meg. A középen sodrottaké viszont a véletlen befogásúak összességének felel meg. A véletlen befogású átlag feletti esetében az feltételezhető, hogy a magasabb szakítóerők a korrektebb szakadásnak tulajdoníthatók (noha általában a befogó pereme környezetében történt a szakadás, azonban az esetben ez a tény kevésbé befolyásolta, csökkentette a szakítóerőt).

Összességében megállapítható, hogy a vizsgálat eredményei alátámasztják korábbi feltételezésünket, miszerint a szakítóerő értékek a befogás módjától függően átlag feletti és átlag alatti csoportokra szétválaszthatók.

A Peirce modell alkalmazása a szálszilárdság-kihasználtsági tényező becslésében

A szálszilárdság-kihasználtsági tényező meghatározásához elemi szál szakításokat végeztünk.

Az elemi szálak befogásához (45. ábra) papírkeretet használtunk, melyre a nagyító alatt kiemelt elemi szálát enyves ragasztó segítségével rögzítettük. Így a befogási hossz adott volt: 20 mm. 10+1 db mérést végeztünk. Elsősorban a szálszilárdság kihasználtsági tényezőre voltunk kíváncsiak. Részletes eredmények a *Mellékletben* találhatók.



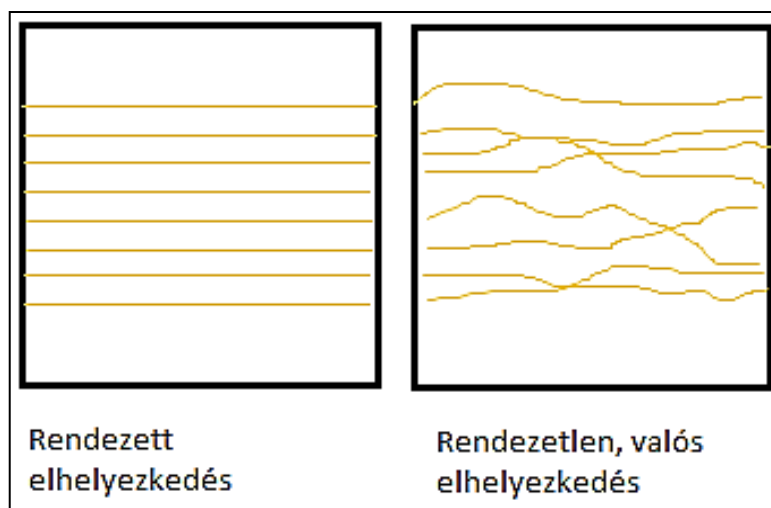
45. ábra Elemi szál szakítása

A szálszilárdság kihasználtsági tényező meghatározására a következő képlet szolgál:

$$\eta_n := \frac{\overline{F_{S, \text{fonal}}}(l_0)}{n \cdot \overline{F_{S, \text{szál}}}(l_0)} \quad (17)$$

ahol η_n a szálszilárdság kihasználtsági tényező, n a szálak száma egy fonalban, illetve $\overline{F_{s,szál}}$ és $\overline{F_{s,foval}}$ az adott hosszön (l_0) számolt átlagos szakítóerő.

η_n értéke sosem érheti el az 1-es, azaz 100%-os értéket, hiszen az azt feltételeznél, hogy a szálak egymással párhuzamosan, rendezetten helyezkednek el a fonalban (46. ábra) valamint a szórás is nulla, azonban a mikroszkópos és a mechanikai vizsgálatok alapján is bebizonyosodott, hogy ez nem így van.



46. ábra Szálak elhelyezkedése a fonalban

Mivel a szálszilárdság kihasználtsági tényező meghatározására ugyanolyan hosszúságú elemi szál és fonal átlagos szakítóértékeire van szükségünk és a méréseink között nem volt azonos befogási hossz, ezért a Peirce görbe segítségével előbb meghatároztuk a 20 mm-es fonalhosszúsághoz tartozó átlagos szakítóerő értékeket, melyeket a 42. ábra alapján becsültünk meg, majd a 17. táblázatban összegeztük eredményeinket.

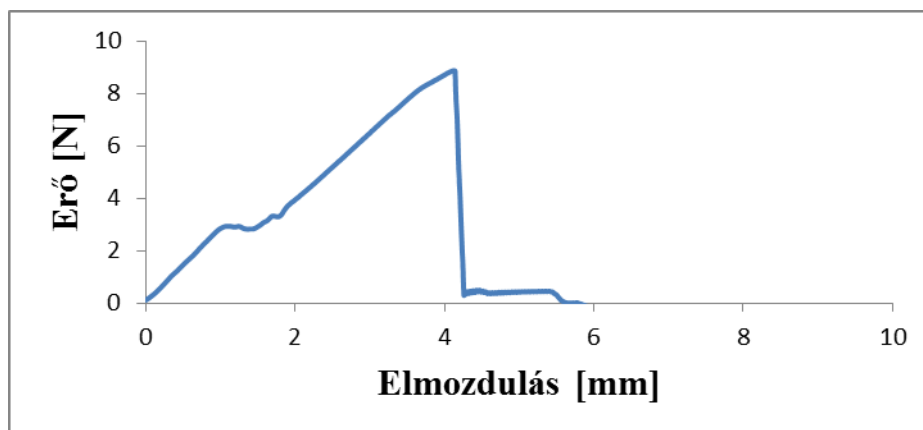
	Peirce_Up_Mod	Illesztett	Peirce_Bott_Mod
Befogási hossz [mm]	20	20	20
Fs_szál_átlag [N]	0,15	0,15	0,15
n szálszám [db]	92	92	92
Fs_fonal_átlag [N]	9,5	8,8	8,1
η_n [%]	68,44%	63,39%	58,35%

17. táblázat Szálszilárdság kihasználtsági tényező becslése

A vizsgált fonalra összességében 60-70 % szálszilárdság kihasználtságot állapítottunk meg.

Egyéb megfigyelések

A mérések folyamán erő – elmozdulás görbéken rögzítettük a szakítás folyamatát (47. ábra). Mint az alábbi ábrán is megfigyelhető, a mérések jelentős részénél, a befogási hosszától függetlenül, megjelenik egy ún. váll a szakítógörbén. Mivel utána még jelentős mértékben nő az erő a teljes elszakadásig, azt valószínűsítjük, hogy itt történik meg a sodrott szakaszok húzás közbeni „kiegyenesedése”.



47. ábra Fonal általános szakítógörbéje

A későbbiekben tervezzük ennek bizonyítását ütemezett CCD kamerás felvételek készítésével.

5. Összefoglalás és további célkitűzések

A dolgozatban megismerhettük egy különleges struktúrájú, poliészter szálakból álló fonál főbb jellegzetességeit, geometriai és szilárdsági tulajdonságait. Célunk az volt, hogy bizonyítsuk a Peirce-féle szilárdságelméleti modell alkalmazhatóságát a vizsgált, speciális szerkezetű fonál esetében is.

A fonalat a Polimertechnika Tanszék Magyar – Marokkói TÉT kutatási programjának keretén belül kaptuk. Anyaga poliészter. Felhasználását tekintve többnyire hajlékony kompozit lap erősítőanyagaként szolgál. Előfordul az építőipartól kezdve a járművek ponyváin keresztül egészen a sátoelemekig történő alkalmazása. Tehát igen széles körben megjelenik. Vizsgálatainkat a Polimertechnika Tanszéken rendelkezésre álló mérőberendezések segítségével végeztük. A vizsgálatokat szabványos légtérben végeztük, mivel nem hagyható figyelmen kívül az alapanyag hőmérséklete és nedvességtartalma.

A fonál szerkezeti és geometriai tulajdonságainak vizsgálata során meghatároztuk a fonalban lévő elemi szálak átlagos számát, a szálak keresztmetszetének alakját és nagyságát, valamint a fonalstruktúra egyéb szerkezeti jellemzőit. Összevetettük a lineáris anyagsűrűségből kiszámolt szálmennyiséget a mikroszkóp alatt megszámlolt értékkel. Elektronmikroszkópos felvételekkel vizuálisan is szemléltettük az elemi szálakat és a kötegeket.

A fonál szakítóvizsgálatának megkezdése előtt szükség volt a szakítási sebesség meghatározására. Négy különböző sebességet teszteltünk (10, 50, 100, 500 mm/min), három különböző befogási hosszon (10, 50, 100 mm). Munkánk során több mérési sorozatot vettünk fel és azokat statisztikai módszerekkel kiértékeltek és elemeztük.

Elsőként 5 különböző befogási hosszt vizsgáltunk. Ezek voltak az 1, 10, 50, 100 és az 500 mm-es fonalszakítások. A szakítások erő – elmozdulás görbáját rögzítettük. Ennek eredményeként kellő mennyiségű és pontos adatot kaptunk a későbbi statisztikai értékeléshez. A statisztikai kiértékelés során alapparamétereket határoztunk meg (átlag, négyzetes és relatív szórás, minimum, maximum).

Vizsgáltuk a szakítógörbék felépítését, majd megkíséreltük a Peirce-féle szilárdságelmélet igazolását a fonalunkra. Ennek során a gyakorlati eredményeket összevetettük az elméleti módosított Peirce modellel, és vizsgáltuk, hogy a szabad befogási hossz függvényében hogyan változott a fonál átlagos szakítóereje. A kiértékelés során azonban több problémával találkoztunk. A várt értékekkel ellentétben a fonál átlagos szakítóereje nem csökkent a befogási hossz növekedésével, az eredmények ránézésre nem

mutattak nyilvánvaló összefüggést. Azonban tudtuk, hogy valamilyen összefüggésnek - a fizikai és statisztikai törvények értelmében - fenn kell állnia, ezért további vizsgálatokat végeztünk 75, 200, 300 mm befogási hosszok mellett. A problémát azonban ezek sem oldották meg, az eredmények továbbra sem mutattak összefüggést a pontok között, ezért sorra vettük a lehetséges hibákat. Fontos megemlíteni, hogy Peirce az elméletét homogén anyagra állította fel, a mi fonalunk pedig periodikus, szakaszonként változó, sodrott és sodratlan részekből áll. Érdekesnek találtuk éppen ezért megvizsgálni a fonalat a befogás szempontjából. 25-25 db mérést folytattunk le 10 mm-es befogási hosszon úgy, hogy egyszer sodrott, másszor sodratlan szakasz volt középen elhelyezve. A sodrott részt középre befogva némileg nagyobb átlagos szakítóerőt kaptunk, de jelentős különbség nem mutatkozott. Peirce elméletét végül nem egy görbére, hanem egy sávra vonatkoztattuk, amelyen belül elhelyezkednek a méréseink. Az átlagos szakítóerőket kettéválasztottuk átlag feletti és alatti értékekre, majd mindkettőhöz kiszámítottuk a Peirce-féle görbét. Majd vettük az átlag feletti és alatti átlagértékek és a Peirce-féle számolt átlagok konvex lineáris kombinációját. Eredményül elfogadható leírást kaptunk a fonalunk szilárdságáról.

Ezzel lényegében az elméleti módosított Peirce modellt egy speciális, szakaszonként változó struktúrájú, multifilament fonal szilárdságának leírására alkalmaztuk.

További célkitűzések

- A kutatásaink során megállapítottuk, hogy a vizsgált fonal struktúrája nagyon bonyolult, így további vizsgálati módszerekkel és még pontosabb mérésekkel szeretnénk a fonalat és szerkezetét elemezni.
- Terveink között szerepel a fonal szakítási folyamatának részletes elemzése videokamerás, vagy CCD kamerás ütemezett képsorozat rögzítésével.
- A szál struktúrájának függvényében további szakítópróbák elvégzése, külön a sodrott és sodratlan részek befogására vonatkozóan, pontosítva ezáltal a fonal szerkezetére felállított modellt.
- Szeretnénk továbbá szakítóvizsgálatokat végezni a 0 mm-es befogási hosszánál. Mivel a Peirce modell leírása szerint itt a szakítóerő végtelen. A valóságban tudjuk, hogy nem lehetséges. A 0 mm-es befogási hosszhoz tartozó szakítóerő meghatározása egy pontosabb módosított Peirce modell létrehozását tenné lehetővé.
- A szálszilárdság kihasználási tényező pontos meghatározása érdekében tervezzük a 10 mm-es elemi szálak szakítóvizsgálatát.

- Későbbi terveink között szerepel a fonalból készült szövet szilárdsági és szerkezeti elemzése, hasonló módon a fonal és elemi szál vizsgálatokhoz.
- Legvégül pedig további feladat a poliészter erősítőszövetű polimer kompozit teljes körű vizsgálata és szerkezeti elemzése.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik segítő munkájukkal és értékes tanácsaikkal, továbbá tapasztalatukkal hozzájárultak első TDK dolgozatunk elkészítéséhez.

Köszönjük fő konzulensünknek Dr. Halász Mariannának a segítségét és támogatását; köszönjük Prof. Dr. Vas László Mihálynak a tudományos közreműködését és külön köszönet Al-Gaadi Bidournak az irántunk mutatott mérhetetlen lelkesedéséért és a gyakorlati feladatok elsajátításában nyújtott segítségéért.

Szeretnénk megköszönni továbbá a Polimertechnika Tanszék minden dolgozójának a támogatást, apró útbaigazítást, a hasznos információkat és legfőképpen azt a becsülendő emberi tulajdonságukat, hogy rendkívül segítőkészek voltak velünk minden tekintetben.

Végül szeretnénk megköszönni családjaink támogatását is legfőképpen azért, mert biztonságos háttérrel adnak tanulmányaink és az adott kutatási feladataink elvégzésére.

A kutatási munkát támogatta az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA), a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség (NFÜ), valamint a Marokkói Királyság Nemzeti Tudományos és Technológiai Kutatási Központja (CNRST) a K68438 (OTKA-NFÜ) és a marokkói-magyar TÉT-10-1-2011-0493 számú kutatási projektek keretében. 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.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Jederán Miklós, Tárnoky Ferenc: Textilipari Kézikönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, (1979)
- [2] Vas L. M.: Polimerek erősítőanyagai és kompozit technológiái, Előadás kézirat, Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék, (2012)
- [3] Gyimesi J.: Textilanyagok fizikai vizsgálata. Műszaki könyvkiadó, Budapest (1968)
- [4] dr. Vas László M. – dr. Halász Géza: Összefüggések különböző szerkezetű fonalak geometriai és szilárdsági jellemzői között II-III., Tanulmányi cikk, Magyar textiltechnika folyóirat, Budapesti Műszaki Egyetem Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszék (1994/5; 1995/1)
- [5] Mezey Zoltán: Természetesszál-erősítésű polimer kompozitok fejlesztése, PhD értekezés, Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem, (2009)
- [6] Hegyi Dezső: Ponyvaszerkezetek és ponyvaanyag nemlineáris vizsgálata numerikus és kísérleti módszerekkel. PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2006)
- [7] Vas L. M.: Textilanyagok szerkezetének elemzése számítógépes modellezéshez. Kutatási tanulmány. Tanulmány kézirat. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (2003)
- [8] Anyagvizsgálók lapja Elektronikus folyóirat 2009/3 HU ISSN 1787-507 (2012.10.17)
- [9] Polimertechnika Tanszék honlapja: <http://www.pt.bme.hu>; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
- [10] Ponyvamester Kft. honlapja: <http://ponyvamester.hu/>
- [11] Spandome Kft. honlapja: <http://www.spandome.hu/egyediproj.php>
- [12] HG cikk: <http://hg.hu/cikk/epiteszet/3893-satrat-huznak-a-sportcsarnok-fole>
- [13] <http://www.olympia-leipzig-2012.de>

Melléklet

Szakítóvizsgálathoz tartozó mérési adatok

I. méréssorozat

1. 1 mm-es szakítás adatai

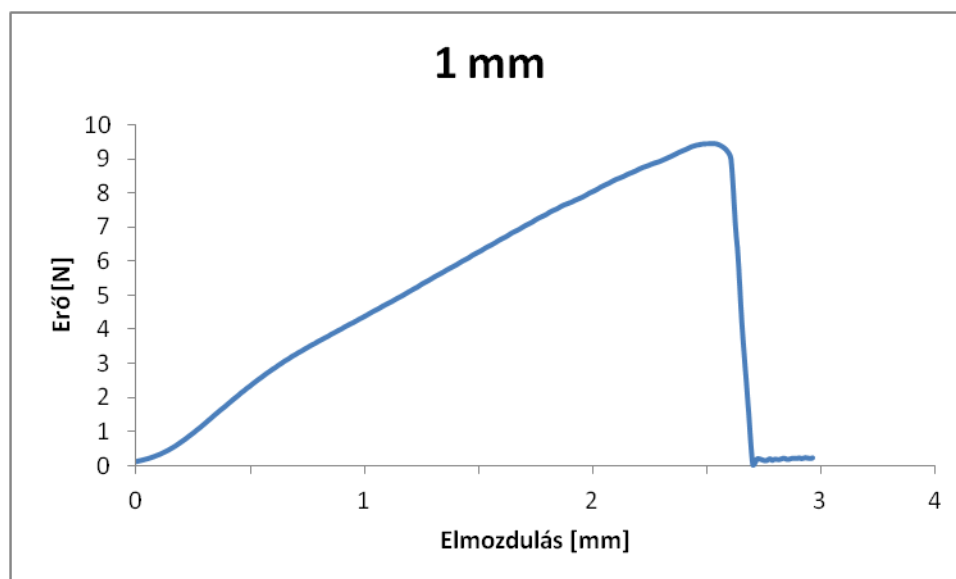
Mérés dátuma: 2012.10.17.

Időpontja: 12.00-18.00

Páratartalom: 44,9 %

Hőmérséklet: 24,5 °C

Jellemző szakítógörbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	9,3049	2,0926
2	9,1050	2,0180
3	7,5520	1,9740
4	9,6490	4,0810
5	9,4220	2,5860
6	9,8270	3,4460
7	8,5910	2,0070
8	8,4800	1,5630
9	8,6360	1,8650
10	9,0940	2,4470

11	9,6510	2,8130
12	9,5520	2,6410
13	6,1670	5,4690
14	8,9780	2,3140
15	9,2000	2,6220
16	8,4500	2,5480
17	7,8410	1,6140
18	8,6380	2,0000
19	9,0680	2,7450
20	9,4460	2,5310
Átlag	8,83	2,57
Négyzetes szórás	0,87	0,91
Maximum	9,83	5,47
Minimum	6,17	1,56
Relatív szórás [%]	9,81	35,26

2. 10 mm-es szakítás adatai

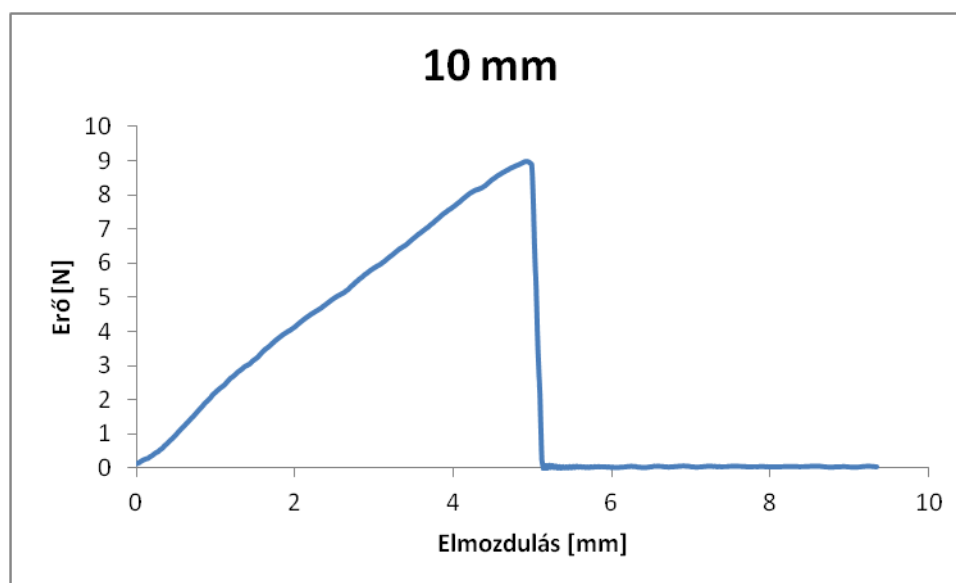
Mérés dátuma: 2012.10.17.

Időpontja: 12.00-18.00

Páratartalom: 44,9 %

Hőmérséklet: 24,5 °C

Jellemző szakítógörbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	4,5817	13,1691
2	9,9616	7,0705
3	9,6765	7,2240
4	8,3720	5,3192
5	8,2208	4,1555
6	8,6108	6,6421
7	9,7319	4,4542
8	8,9880	4,9167
9	9,7266	5,6153
10	8,6078	4,0610
11	7,4499	4,3332
12	7,9427	3,5418
13	8,6915	5,7013
14	8,1706	4,0494
15	9,3914	6,7482
16	8,6819	4,6001
17	7,4928	6,2352
18	8,4994	4,0252
19	9,3601	5,6456
20	9,7984	6,2497
21	7,602	3,686
22	8,281	4,540
23	8,492	3,944
24	7,461	3,639
25	9,132	3,875
26	8,528	4,660
27	9,946	8,984
28	9,279	4,394
29	8,084	6,135
30	9,485	4,155
31	9,032	3,521
32	8,501	3,652
33	8,771	3,597
34	9,383	3,877
35	10,199	6,052
36	9,031	3,887
37	9,621	4,992
38	9,630	4,979
39	9,232	4,527

40	8,392	4,799
41	9,796	5,173
42	8,145	5,094
43	7,928	5,685
44	9,053	5,148
45	9,372	3,786
46	9,281	4,942
47	10,018	9,398
48	9,392	5,242
49	6,801	3,091
50	8,583	4,981
51	9,899	4,334
52	9,441	4,989
53	9,350	4,156
54	9,930	4,492
55	8,904	4,002
56	8,778	3,887
57	7,718	3,098
58	9,959	5,386
59	7,958	4,930
60	9,540	5,045
61	8,474	5,085
62	8,417	3,696
63	9,072	4,308
64	9,054	4,188
65	8,382	4,108
66	9,194	5,055
67	10,782	5,266
68	9,034	4,463
69	10,291	4,750
70	8,213	3,401
71	8,809	4,224
72	8,184	3,788
73	10,278	4,992
74	8,802	4,085
75	9,860	4,623
76	8,440	4,878
77	9,990	4,850
78	8,714	4,428
79	10,736	6,482
80	8,068	6,778
81	7,319	3,742
82	10,336	4,404
83	9,023	4,841

84	8,229	3,587
85	9,011	4,153
86	10,865	7,631
87	9,472	4,698
88	8,657	3,754
89	9,990	5,467
90	8,298	4,025
91	8,475	3,435
92	9,365	4,464
93	8,553	3,415
94	8,075	3,360
95	8,411	4,405
96	8,591	4,724
97	8,629	4,332
98	10,809	6,118
99	9,019	4,187
100	9,103	4,223
101	8,358	3,830
102	8,200	3,663
103	9,060	3,697
104	9,802	4,467
105	9,869	8,902
106	9,659	4,787
107	8,797	4,119
108	9,889	5,533
Átlag	8,95	4,85
Négyzetes szórás	0,92	1,43
Maximum	10,86	13,17
Minimum	4,58	3,09
Relatív szórás [%]	10,29	29,54

3. 50 mm-es szakítás adatai

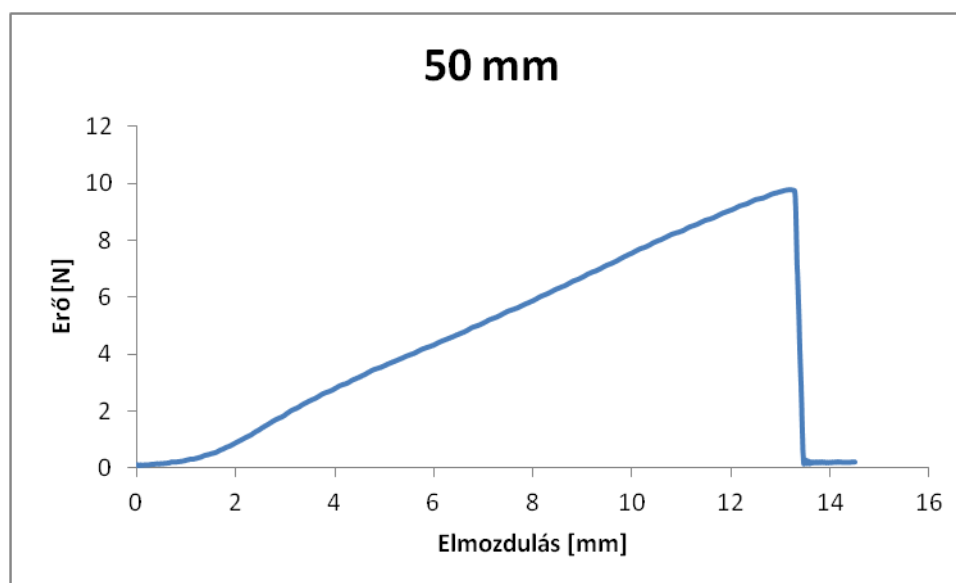
Mérés dátuma: 2012.10.12.

Időpontja: 10.00-16.00

Páratartalom: 36,5 %

Hőmérséklet: 23,3 °C

Jellemző szakító görbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	3,8135	8,9147
2	10,9478	13,0345
3	9,2970	11,5311
4	9,1908	12,0641
5	9,5883	12,1355
6	7,9420	11,0303
7	8,4428	10,4973
8	10,6649	15,1010
9	6,3150	9,9195
10	10,2837	13,2509
11	5,3202	9,3821
12	8,9197	11,5151
13	10,5791	13,9519
14	7,6102	9,7816
15	8,3517	9,8646
16	10,1197	12,9333
17	8,6866	15,7359
18	9,0406	10,4138
19	9,2114	10,8678
20	8,5603	11,0315
21	8,7379	10,8989
22	9,6015	11,2339
23	8,7076	16,0856

24	8,7068	10,9650
25	9,1701	11,9510
26	8,7582	10,8997
27	8,6659	11,0172
28	9,8948	12,8023
29	8,5082	11,8172
30	9,5774	12,7300
31	9,2325	12,3486
32	9,4353	12,2690
33	9,7646	12,5981
34	8,3665	10,8324
35	8,6659	11,0172
36	8,5082	11,8172
37	9,2325	12,3486
38	9,7646	12,5981
39	9,6795	16,8483
40	7,9227	10,3156
41	8,3665	10,8324
42	2,3269	3,8665
43	10,6751	15,1137
44	8,0395	9,9848
45	9,0652	11,2309
46	10,1201	13,0187
47	8,6141	10,5851
48	7,8444	13,2010
49	9,2069	12,2185
50	4,9394	9,2020
51	7,7098	11,0987
52	4,5092	10,6853
53	9,4810	13,7490
54	7,6450	9,2809
55	9,3901	12,5817
56	8,8411	11,1851
57	9,7291	11,9141
58	9,3363	11,1804
59	9,7844	13,1991
Átlag	8,63	11,70
Négyzetes szórás	1,64	1,98
Maximum	10,95	16,85
Minimum	2,33	3,87

Relatív szórás [%]	18,97	16,92
---------------------------	--------------	--------------

4. 100 mm-es szakítás adatai

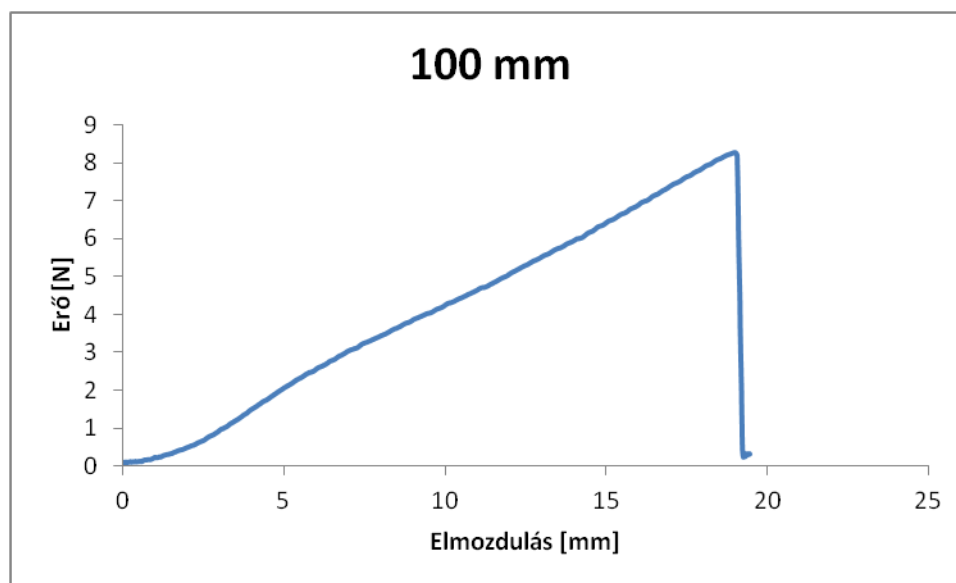
Mérés dátuma: 2012.10.12.

Időpontja: 10.00-16.00

Páratartalom: 36,5 %

Hőmérséklet: 23,3 °C

Jellemző szakító görbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	5,5108	16,4663
2	5,7618	17,1822
3	8,0066	19,1690
4	4,8422	14,1005
5	6,1934	17,9192
6	8,9075	21,9002
7	6,1600	17,5981
8	8,1904	24,0184
9	8,1412	18,9150
10	9,1694	27,9841
11	6,4430	17,4852
12	8,7076	16,0856
13	9,6795	16,8483

14	7,8444	13,2010
15	4,9394	9,2020
16	4,5092	10,6853
17	7,6450	9,2809
18	8,8411	11,1851
19	9,3363	11,1804
20	9,5817	22,1031
21	9,1245	21,6682
22	8,3650	20,7313
23	8,6887	19,7188
24	11,4194	28,0151
25	9,4617	21,1012
26	9,7764	22,0843
27	9,4113	22,5312
28	10,0596	23,6352
29	6,9851	15,3144
30	10,2926	25,7154
Átlag	7,93	18,43
Négyzetes szórás	1,80	5,19
Maximum	11,42	28,02
Minimum	4,51	9,20
Relatív szórás [%]	22,68	28,14

5. 500 mm-es szakítás adatai

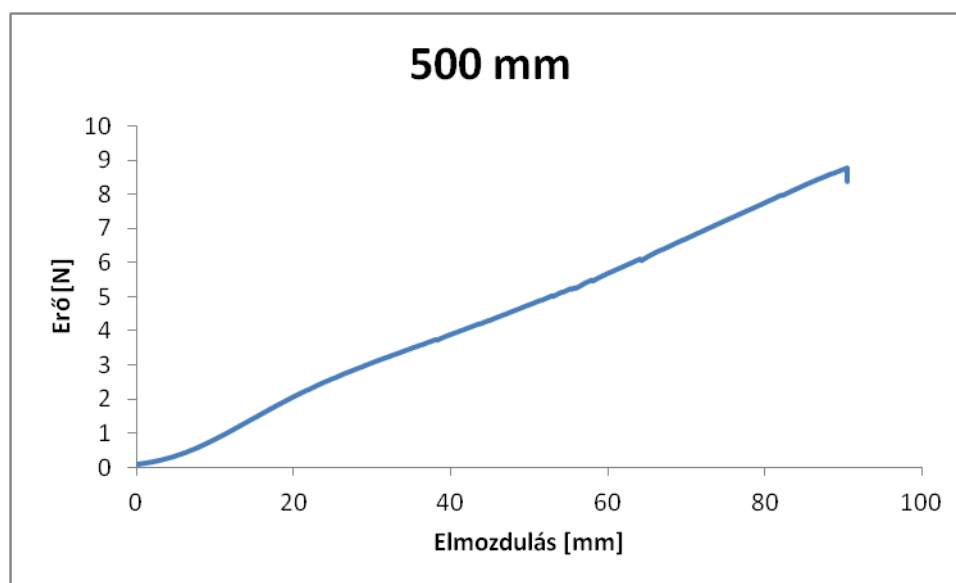
Mérés dátuma: 2012.10.12.

Időpontja: 10.00-16.00

Páratartalom: 36,5 %

Hőmérséklet: 23,3 °C

Jellemző szakító görbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	7,9389	82,9851
2	9,5610	100,9850
3	8,3907	91,2487
4	9,5581	104,2310
5	9,8708	110,0150
6	7,4430	77,9317
7	9,0025	96,0854
8	9,8987	106,5670
9	9,8783	105,7320
10	10,2730	108,3650
11	10,2054	110,5800
12	7,2765	76,5854
13	9,5448	103,3010
14	8,4917	3,9436
15	8,8315	91,2008
16	8,8641	92,9685
17	8,3869	88,1984
18	10,2325	110,0480
19	8,7807	90,4656
20	8,9488	95,1358
Átlag	9,07	92,33
Négyzetes szórás	0,90	23,32

Maximum	10,27	110,58
Minimum	7,28	3,94
Relatív szórás [%]	9,92	25,26

II. méréssorozat

6. 75 mm-es szakítás adatai

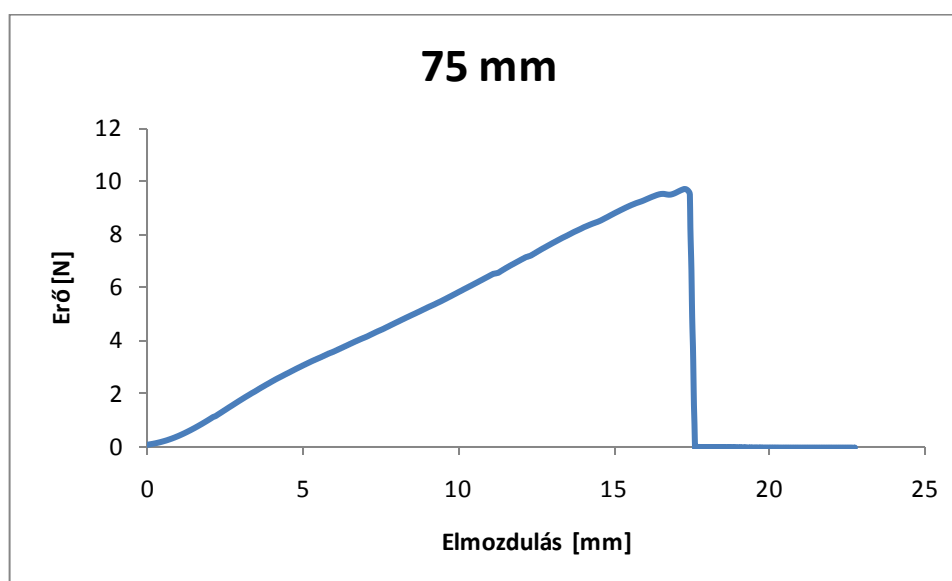
Mérés dátuma: 2012.10.27.

Időpontja: 10.00-13.00

Páratartalom: 42,9-50,1 %

Hőmérséklet: 22,1-24,5 °C

Jellemző szakító görbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	7,79646	13,0327
2	9,28831	16,3648
3	10,3209	19,1806
4	10,1259	18,0647
5	9,06353	15,4329
6	9,65231	18,4181

7	8,68611	19,6352
8	10,4186	18,9805
9	9,2024	17,0177
10	9,36036	16,3296
11	8,61821	15,3813
12	8,48825	14,3147
13	9,67563	16,8016
14	9,20878	16,2516
15	11,007	22,3346
16	9,15736	16,1187
17	9,50177	16,7354
18	8,41936	15,2012
19	9,72965	17,2682
20	8,93143	16,7146
Átlag	9,33	16,98
Négyzetes szórás	0,77	2,06
Maximum	11,01	22,33
Minimum	7,80	13,03
Relatív szórás [%]	8,20	12,16

7. 200 mm-es szakítás adatai

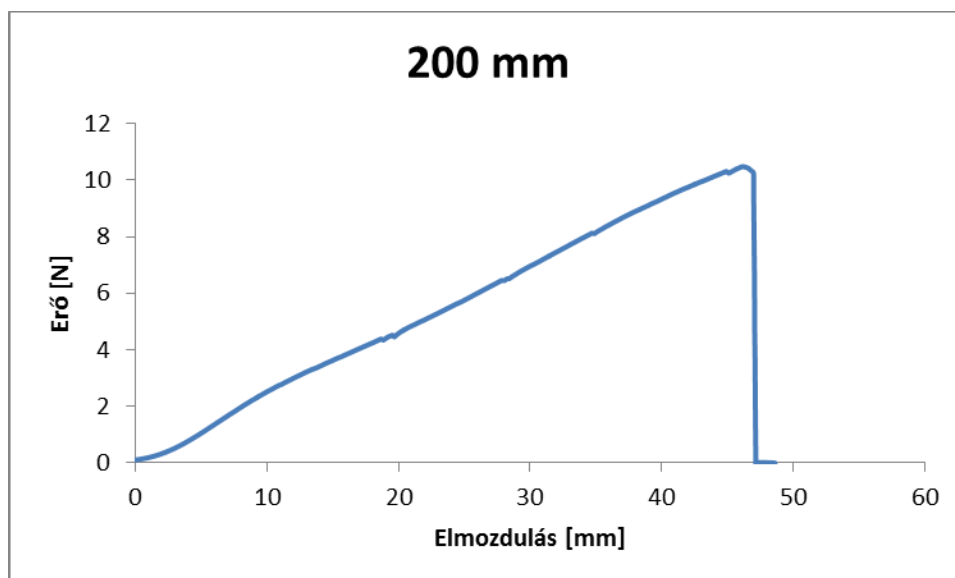
Mérés dátuma: 2012.10.27.

Időpontja: 10.00-13.00

Páratartalom: 42,9-50,1 %

Hőmérséklet: 22,1-24,5 °C

Jellemző szakító görbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	8,99557	39,5471
2	9,07911	39,7347
3	8,25038	33,8859
4	9,98121	44,2844
5	9,29142	40,798
6	10,1386	43,8981
7	10,6337	47,3363
8	7,75675	32,7824
9	9,72118	42,8627
10	9,12286	38,2527
11	9,18819	38,5135
12	8,19358	34,4796
13	8,88982	37,1175
14	8,20095	34,8666
15	8,84511	37,7477
16	10,1691	44,115
17	9,29615	40,9659
18	9,56167	40,2319
19	10,4774	46,1501
20	9,73485	43,0634
Átlag	9,28	40,03
Négyzetes szórás	0,79	4,15

Maximum	10,63	47,34
Minimum	7,76	32,78
Relatív szórás [%]	8,56	10,36

8. 300 mm-es szakítás adatai

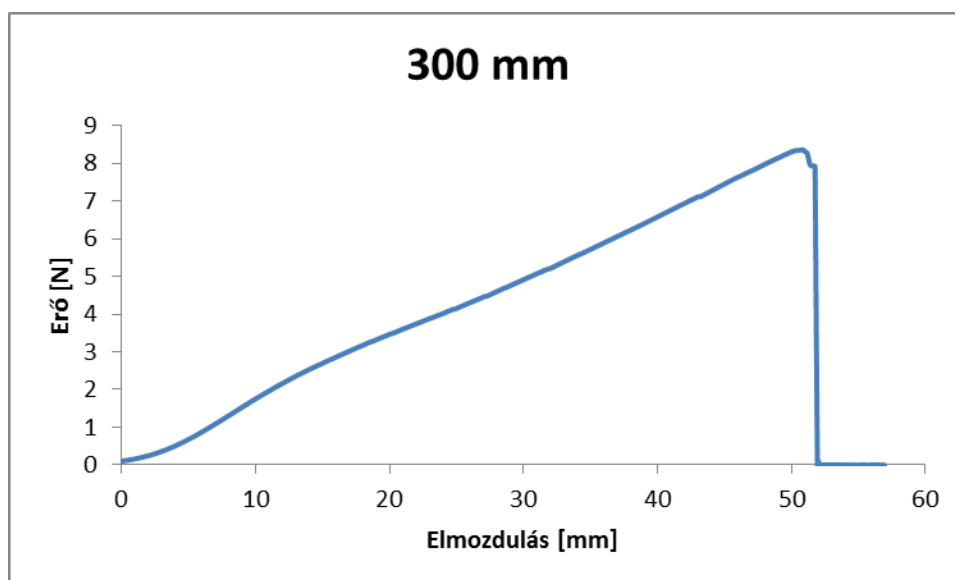
Mérés dátuma: 2012.10.27.

Időpontja: 10.00-13.00

Páratartalom: 42,9-50,1 %

Hőmérséklet: 22,1-24,5 °C

Jellemző szakító görbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	8,95116	56,7145
2	7,12898	49,034
3	9,84829	62,7983
4	9,39411	60,8182
5	8,94311	54,7853
6	7,34548	49,2188
7	9,12446	59,0666
8	9,60993	62,1314
9	8,39091	58,047

10	8,94974	56,7349
11	8,31977	58,7987
12	8,73113	54,8674
13	7,77496	55,8651
14	6,20499	42,5987
15	8,95079	56,5832
16	8,21561	55,2024
17	7,20278	50,8811
18	9,28626	58,7636
19	7,85658	49,6011
20	8,36154	50,831
Átlag	8,43	55,17
Négyzetes szórás	0,94	5,10
Maximum	9,85	62,80
Minimum	6,20	42,60
Relatív szórás [%]	11,18	9,25

III. mérésorozat

9. Elemi szál szakítás eredményei

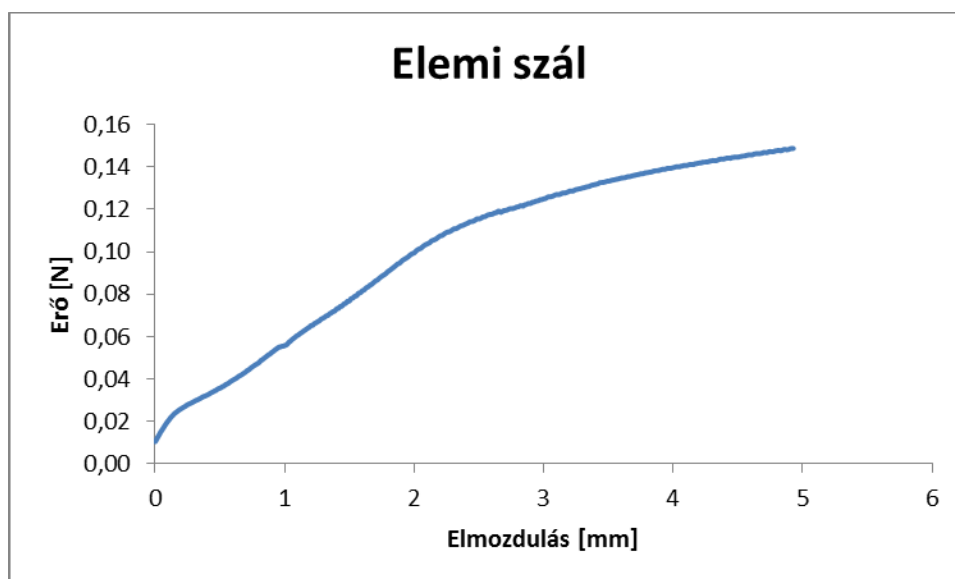
Mérés dátuma: 2012.10.30.

Időpontja: 14:00-17:00

Páratartalom: 32,4 %

Hőmérséklet: 23,6 °C

Jellemző szakító görbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Szakítóerő	Megnyúlás a szakadáskor
	[N]	[mm]
1	0,1593	5,8501
2	0,1441	7,0693
3	0,1525	6,7957
4	0,1491	3,9328
5	0,1538	5,4279
6	0,1538	3,9928
7	0,1426	6,3087
8	0,1487	6,4986
9	0,1509	6,9324
10	0,1487	4,9287
11	0,1562	3,4448
Átlag	0,1509	5,5620
Négyzetes szórás	0,0050	1,3118
Maximum	0,1593	7,0693
Minimum	0,1426	3,4448
Relatív szórás [%]	3,3002	23,5853

10. Sodrott-sodratlan befogású szakítások adatai

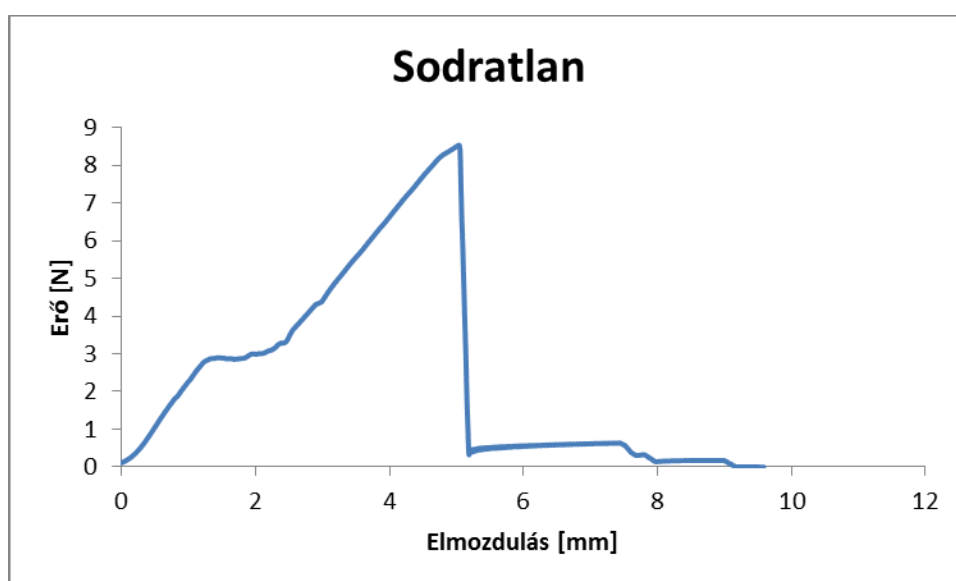
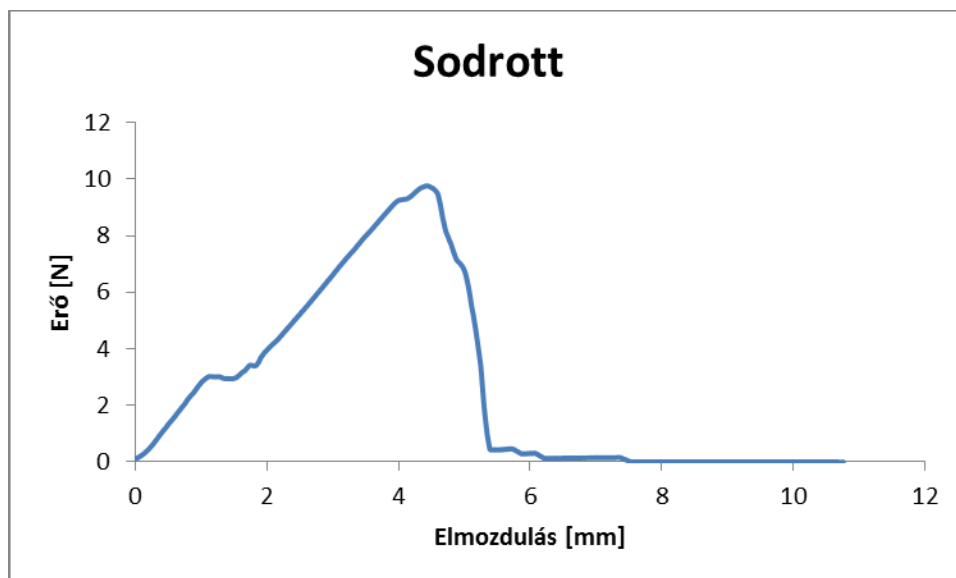
Mérés dátuma: 2012.10.30.

Időpontja: 14:00-17:00

Páratartalom: 32,4 %

Hőmérséklet: 23,6 °C

Jellemző szakító görbe:



Átlagos szakító erők és megnyúlások az egyes méréseknél:

Mérés száma	Sodratlan		Sodrott	
	Szakítóerő [N]	Megnyúlás [mm]	Szakítóerő [N]	Megnyúlás [mm]
1	9,3883	5,1722	9,0778	4,3664
2	8,5350	4,2967	9,4126	4,3822

3	8,8536	4,4772	8,4288	4,0495
4	8,6254	4,8768	9,9159	4,5405
5	7,2342	8,0184	8,3843	3,9097
6	6,7936	7,1937	7,0591	7,1150
7	8,9651	4,6886	9,2268	4,2704
8	9,1433	4,2737	6,8853	6,9286
9	8,1297	3,6525	9,1848	4,5250
10	8,1995	3,6643	9,1965	4,5261
11	6,6033	5,0716	8,2627	7,2355
12	8,6669	5,0305	9,9697	4,6138
13	8,3492	6,3238	9,4240	5,0932
14	8,3368	3,8314	8,8081	4,6127
15	7,8817	3,6201	9,4532	8,7355
16	7,2941	7,8711	8,8705	4,1318
17	8,8415	4,0381	9,2085	6,3661
18	8,7373	8,9845	9,5394	4,6122
19	7,9890	2,7940	9,5619	4,6374
20	8,3124	5,1731	9,7622	4,4297
21	9,6151	10,8346	8,2538	3,7055
22	8,9768	6,3060	9,0512	4,6387
23	8,5327	5,0415	9,6700	4,6271
24	8,8538	4,9422	6,9381	6,9163
25	7,8583	4,7274	7,8391	7,0556
Átlag	8,3487	5,3962	8,8554	5,2010
Négyzetes szórás	0,7561	1,8911	0,8973	1,3475
Maximum	9,6151	10,8346	9,9697	8,7355
Minimum	6,6033	2,7940	6,8853	3,7055
Relatív szórás [%]	9,06	35,05	10,13	25,91

11. Peirce számítás adatai

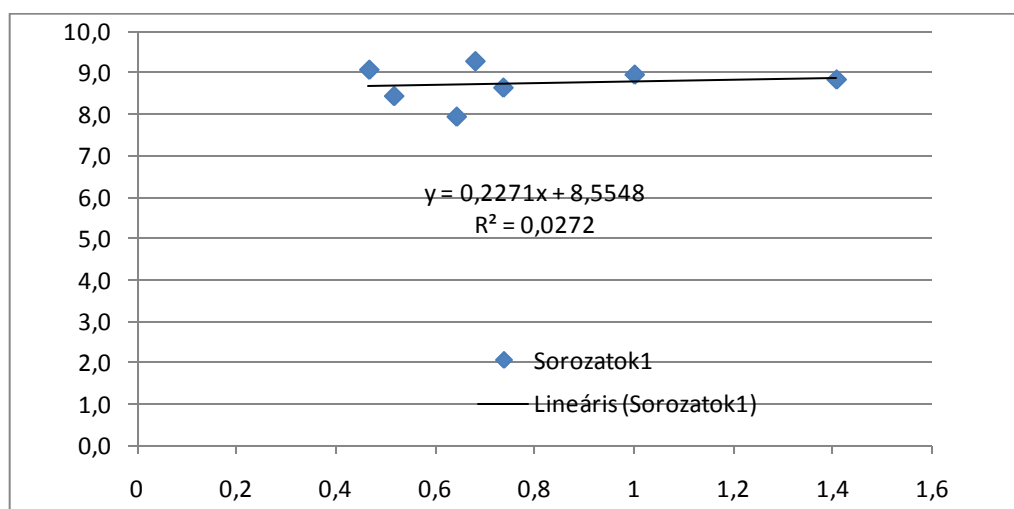
n	0	0,1	1	5	7,5	10	20	30	50
l0_befogási hossz	0	1	10	50	75	100	200	300	500
F_S_átlagos szakítóerő		8,8326	8,9495	8,6341	9,27638	7,9293	9,2764	8,4295	9,0689
Xn	1,615394	1,406282	1	0,735808	0,679385	0,641822	0,559293	0,5159	0,46592
Fs_számított	10,55213	10,03171	9,0206	8,363105	8,222685	8,129201	7,923812	7,815819	7,691434
Fs_számított_ Peirce		11,21167	8,949461	7,884983	7,666631	7,522103	7,206198	7,040719	6,850463
Fs_szám_Peirc e_Upp		10,86338	9,628533	9,047476	8,928286	8,849394	8,676954	8,586625	8,482772
Fs_szám_Peirc e_Bott		9,875301	8,218153	7,438385	7,278435	7,172563	6,941151	6,819932	6,680562
Fs_sz_Peirce_ Upp_Mod		10,24596	9,628533	9,338004	9,278409	9,238963	9,152743	9,107579	9,055652
Fs_sz_Peirce_ Bott_Mod		9,046727	8,218153	7,828269	7,748294	7,695358	7,579652	7,519042	7,449358

c=	0,1	Fá(10)=	8,9495
Gamma=	0,2	S(10)=	0,9209

$Y=A+BX_n$					
	A	B	R2		R
3 pont	2,49	6,53	0,78		0,88
4 pont	0,92	7,72	0,47		0,69

Alfa=	0,5
-------	-----

Az összes mért pontra illesztett egyenes:



Mikroszkópos vizsgálatok adatai

12. Elemi szál átmérő vizsgálatok

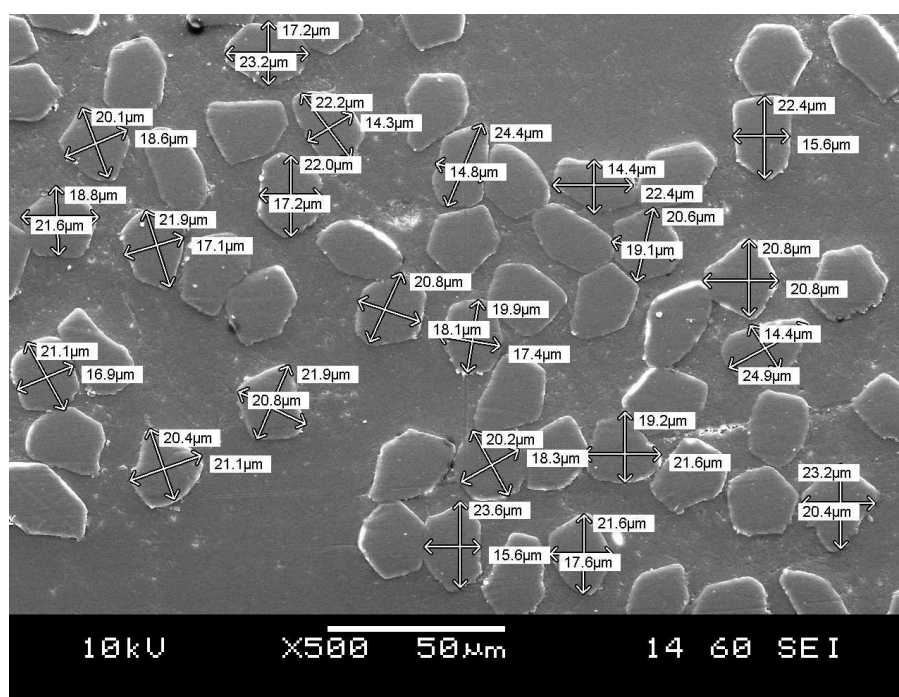
Elemi szálak keresztmetszetének vizsgálata elektronmikroszkópos felvételeken				
Mérés időpontja: 2012.10.18				
Elliptikus módszerrel való közelítés a száلكeresztmetszet nagyságára				
Mérés sorszáma	Nagytengety hossza [μm]	Kistengely hossza [μm]	A közelítő ellipszis nagysága [μm^2]	Elemi szálak lineáris sűrűsége [tex]
1	20,10	19,40	306,26	0,42
2	22,30	17,90	313,51	0,43
3	23,70	17,40	323,88	0,45
4	24,00	14,60	275,20	0,38
5	21,50	19,60	330,97	0,46
6	22,50	19,00	335,76	0,46
7	19,00	17,50	261,14	0,36
8	20,30	16,80	267,85	0,37
9	19,80	17,50	272,14	0,38
10	19,50	16,00	245,04	0,34
11	25,70	13,10	264,42	0,36
12	19,30	17,70	268,30	0,37
13	21,90	17,20	295,84	0,41
14	19,00	17,70	264,13	0,36
15	20,10	18,60	293,63	0,41
16	21,60	18,80	318,93	0,44
17	21,90	17,10	294,12	0,41
18	21,10	16,90	280,07	0,39
19	21,10	20,40	338,07	0,47
20	21,90	20,80	357,76	0,49
21	23,20	17,20	313,41	0,43
22	22,20	14,30	249,33	0,34
23	22,00	17,20	297,19	0,41
24	21,90	17,10	294,12	0,41
25	21,90	20,80	357,76	0,49
26	20,80	18,10	295,69	0,41
27	19,90	17,40	271,95	0,38
28	24,40	14,80	283,62	0,39
29	22,40	14,40	253,34	0,35

30	20,60	19,10	309,02	0,43
31	22,40	15,60	274,45	0,38
32	20,80	20,80	339,79	0,47
33	24,90	14,40	281,61	0,39
34	20,20	18,30	290,33	0,40
35	21,60	19,20	325,72	0,45
36	23,60	15,60	289,15	0,40
37	21,60	17,60	298,58	0,41
38	23,20	20,40	371,71	0,51
39	20,40	19,40	310,83	0,43
40	21,60	14,80	251,08	0,35
Átlag	21,65	17,51	296,64	0,41
Szórás	1,60	2,00	31,74	0,04
Minimum	19,00	13,10	245,04	0,34
Maximum	25,70	20,80	371,71	0,51

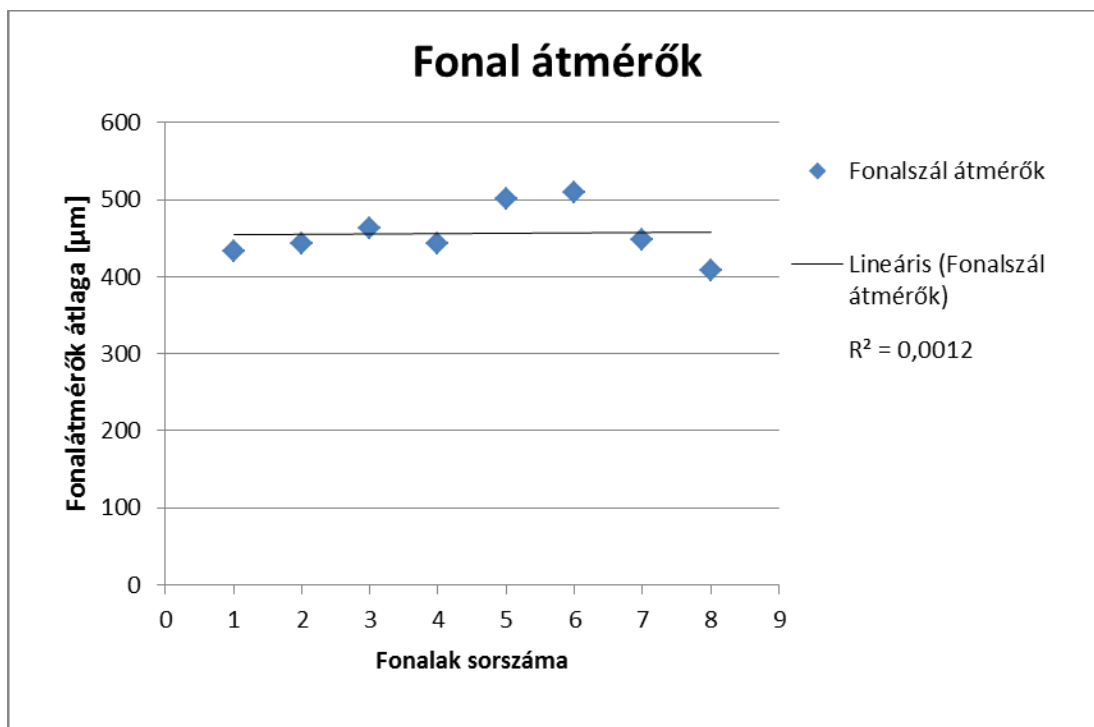
13. Alkalmazott képlet az elliptikus számításokhoz

PI	3,141592654
ellipszis egyenlete	$a/2 \cdot b/2 \cdot \pi$
a	ellipszis nagytengelye
b	ellipszis kistengelye
ρ PES (g/cm ³)	1,38

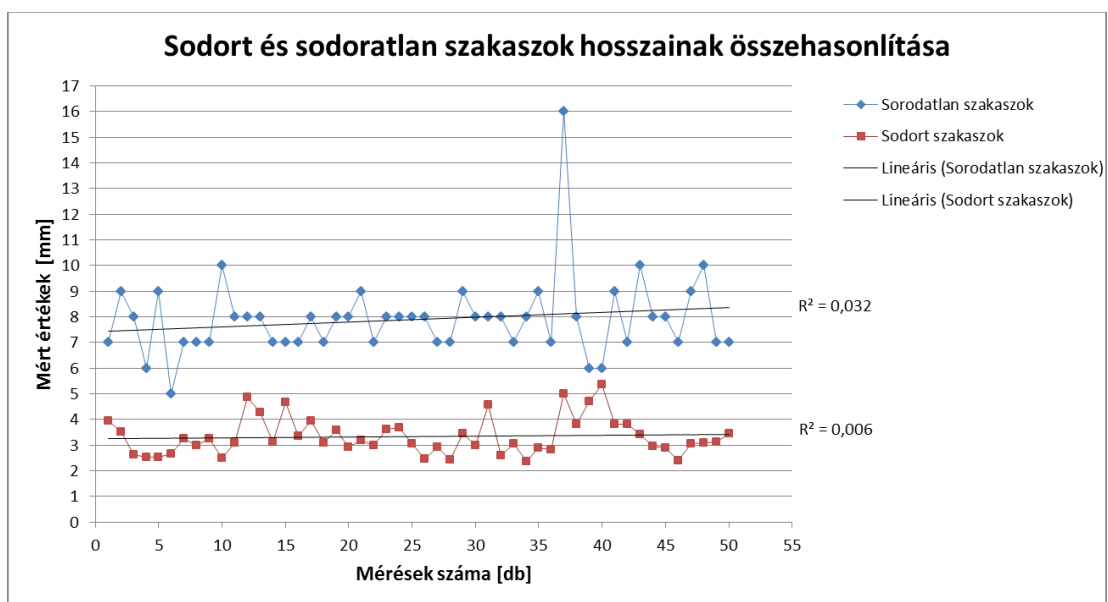
14. Elemi szál átmérők meghatározása az elektronmikroszkópos felvételen.



15. Fonal átmérők átlagának korrelációja.



16. Sodrott és sodratlan szakaszok vizsgálatok



Nem sodort szakaszok hossza [mm]	Nr.	Sodort szakaszok hossza [mm]
7	1.	3,96
9	2.	3,53
8	3.	2,62
6	4.	2,53
9	5.	2,53
5	6.	2,67
7	7.	3,24
7	8.	3,00
7	9.	3,24
10	10.	2,50
8	11.	3,10
8	12.	4,88
8	13.	4,28
7	14.	3,12
7	15.	4,68
7	16.	3,37
8	17.	3,94
7	18.	3,10
8	19.	3,58
8	20.	2,92
9	21.	3,18
7	22.	2,99
8	23.	3,63
8	24.	3,68
8	25.	3,05
8	26.	2,45
7	27.	2,93
7	28.	2,43
9	29.	3,44
8	30.	2,98
8	31.	4,59
8	32.	2,60
7	33.	3,05
8	34.	2,35
9	35.	2,90
7	36.	2,82
16	37.	5,00
8	38.	3,81
6	39.	4,71
6	40.	5,37
9	41.	3,80
7	42.	3,80
10	43.	3,41
8	44.	2,97
8	45.	2,88
7	46.	2,40
9	47.	3,07
10	48.	3,09
7	49.	3,11
7	50.	3,46

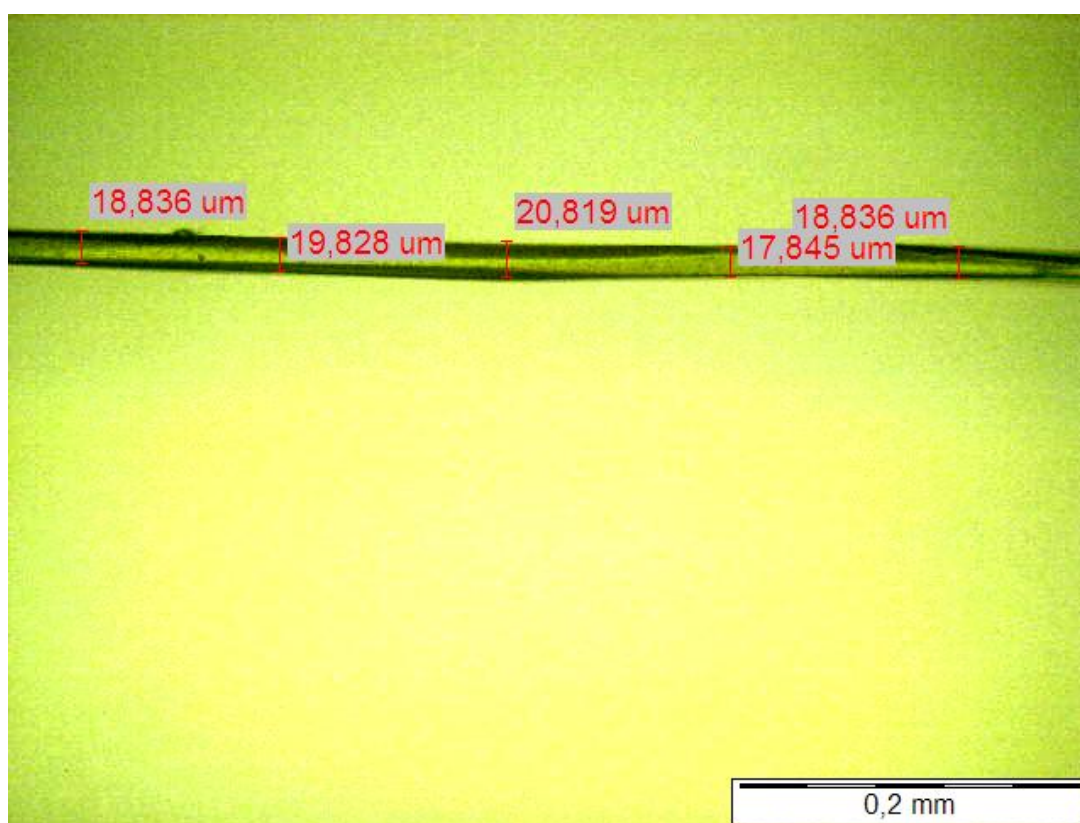
17. Fonal átmérők- Méréssorozat

Fonalszál átmérőjének meghatározása - Átlag számítás, szórás, a fonal struktúrája, csoportosítások (a vizsgálatok száma helyenként eltérő)																								
1.fonal			2.fonal			3.fonal			4.fonal			5.fonal			6.fonal			7.fonal			8.fonal			
Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)			
1.	345,72	1.	324,513	1.	359,705	1.	941,487	1.	507,584	1.	479,607	1.	817,291	1.	361,703	1.	361,703	1.	817,291	1.	361,703			
2.	309,75	2.	320,506	2.	341,720	2.	745,177	2.	343,718	2.	401,670	2.	921,455	2.	359,705	2.	359,705	2.	921,455	2.	359,705			
3.	313,74	3.	288,456	3.	361,703	3.	745,177	3.	345,716	3.	419,656	3.	989,563	3.	403,669	3.	403,669	3.	989,563	3.	403,669			
4.	460,73	4.	332,525	4.	355,708	4.	657,038	4.	604,956	4.	383,685	4.	1069,690	4.	409,664	4.	409,664	4.	1069,690	4.	409,664			
5.	344,54	5.	344,544	5.	379,688	5.	653,031	5.	548,867	5.	405,667	5.	925,462	5.	536,848	5.	536,848	5.	925,462	5.	536,848			
6.	280,44	6.	537,559	6.	376,595	6.	641,012	6.	456,721	6.	380,601	6.	300,475	6.	496,785	6.	496,785	6.	300,475	6.	496,785			
7.	304,48	7.	283,767	7.	392,620	7.	560,886	7.	408,645	7.	404,639	7.	312,494	7.	316,500	7.	316,500	7.	312,494	7.	316,500			
8.	400,63	8.	303,751	8.	544,861	8.	592,937	8.	376,595	8.	360,570	8.	268,424	8.	340,538	8.	340,538	8.	268,424	8.	340,538			
9.	364,58	9.	313,743	9.	380,601	9.	472,747	9.	356,563	9.	240,380	9.	312,494	9.	444,702	9.	444,702	9.	312,494	9.	444,702			
10.	500,79	10.	331,728	10.	604,956	10.	440,696	10.	443,636	10.	356,563	10.	348,551	10.	392,620	10.	392,620	10.	348,551	10.	392,620			
11.	917,45	11.	323,734	11.	331,728	11.	444,702	11.	377,690	11.	540,854	11.	296,468	11.	436,690	11.	436,690	11.	296,468	11.	436,690			
12.	507,58	12.	299,754	12.	323,734	12.	560,886	12.	425,651	12.	288,456	12.	324,513	12.	400,633	12.	400,633	12.	324,513	12.	400,633			
13.	389,68	13.	305,749	13.	321,736	13.	721,139	13.	801,266	13.	336,532	13.	292,462	13.	392,620	13.	392,620	13.	292,462	13.	392,620			
14.	323,73	14.	317,739	14.	327,731	14.	801,266	14.	801,266	14.	424,671	14.	376,595	14.	296,468	14.	296,468	14.	376,595	14.	296,468			
		15.	301,752	15.	347,715	15.	560,886	15.	560,886	15.	572,905	15.	364,576	15.	272,430	15.	272,430	15.	364,576	15.	272,430			
		16.	311,744	16.	456,721	16.	456,721	16.	456,721	16.	729,152	16.	384,607	16.	312,494	16.	312,494	16.	384,607	16.	312,494			
				17.	396,626	17.	396,626	17.	396,626	17.	873,379	17.	540,854	17.	268,424	17.	268,424	17.	540,854	17.	268,424			
				18.	364,576	18.	364,576	18.	364,576			18.	520,823	18.	432,683	18.	432,683	18.	520,823	18.	432,683			
				19.	300,475	19.	300,475	19.	300,475			19.	669,057	19.	432,683	19.	432,683	19.	669,057	19.	432,683			
				20.	300,475	20.	300,475	20.	300,475			20.	865,367	20.	412,652	20.	412,652	20.	865,367	20.	412,652			
				21.	445,634	21.	445,634	21.	445,634			21.	789,247	21.	432,683	21.	432,683	21.	789,247	21.	432,683			
				22.	371,695	22.	371,695	22.	371,695					22.	416,658	22.	416,658	22.		22.	416,658			
				23.	361,703	23.	361,703	23.	361,703					23.	392,620	23.	392,620	23.		23.	392,620			
				24.	279,770	24.	279,770	24.	279,770															
				25.	327,731	25.	327,731	25.	327,731															
Átlag:	411,7034286	Átlag:	327,59775	Átlag:	383,3667333	Átlag:	525,77892	Átlag:	433,0285	Átlag:	446,9992353	Átlag:	556,6889524	Átlag:	389,6726957	Átlag:	389,6726957	Átlag:	556,6889524	Átlag:	389,6726957			
Szórás:	162,5425656	Szórás:	58,29236088	Szórás:	81,61357455	Szórás:	178,0057611	Szórás:	83,96583849	Szórás:	157,7249259	Szórás:	278,6356304	Szórás:	66,89873914	Szórás:	66,89873914	Szórás:	278,6356304	Szórás:	66,89873914			

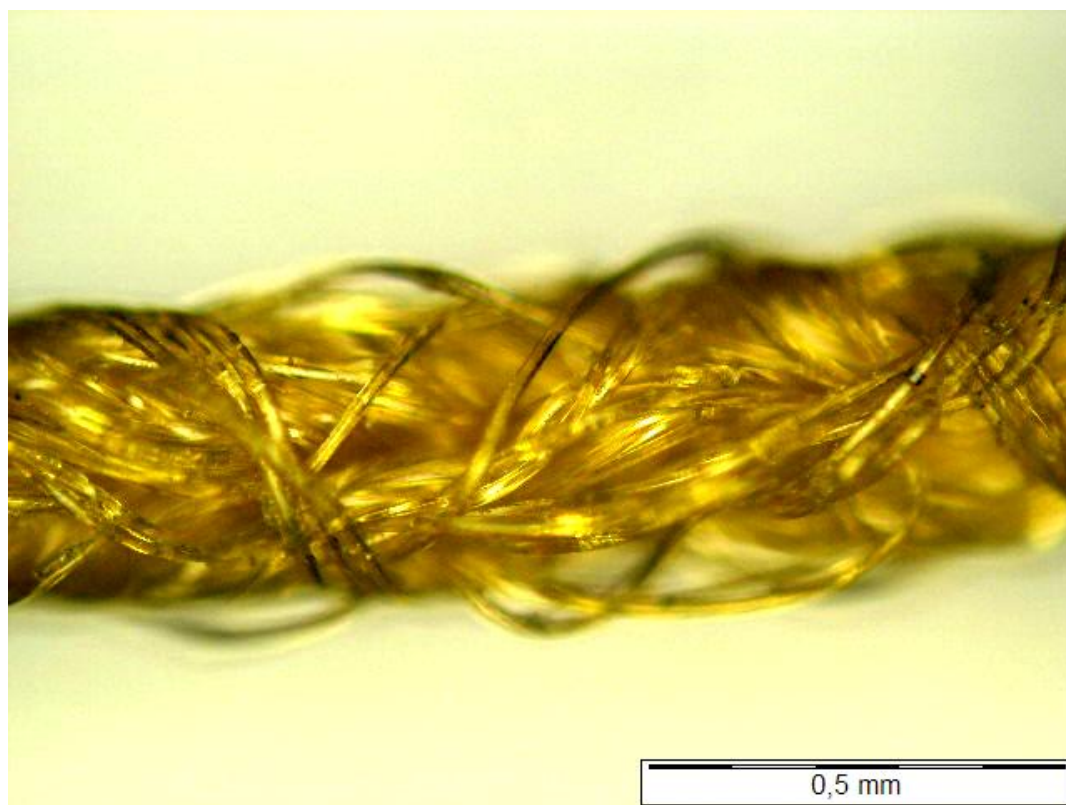
18. Elemi szál átmérők – Méréssorozat

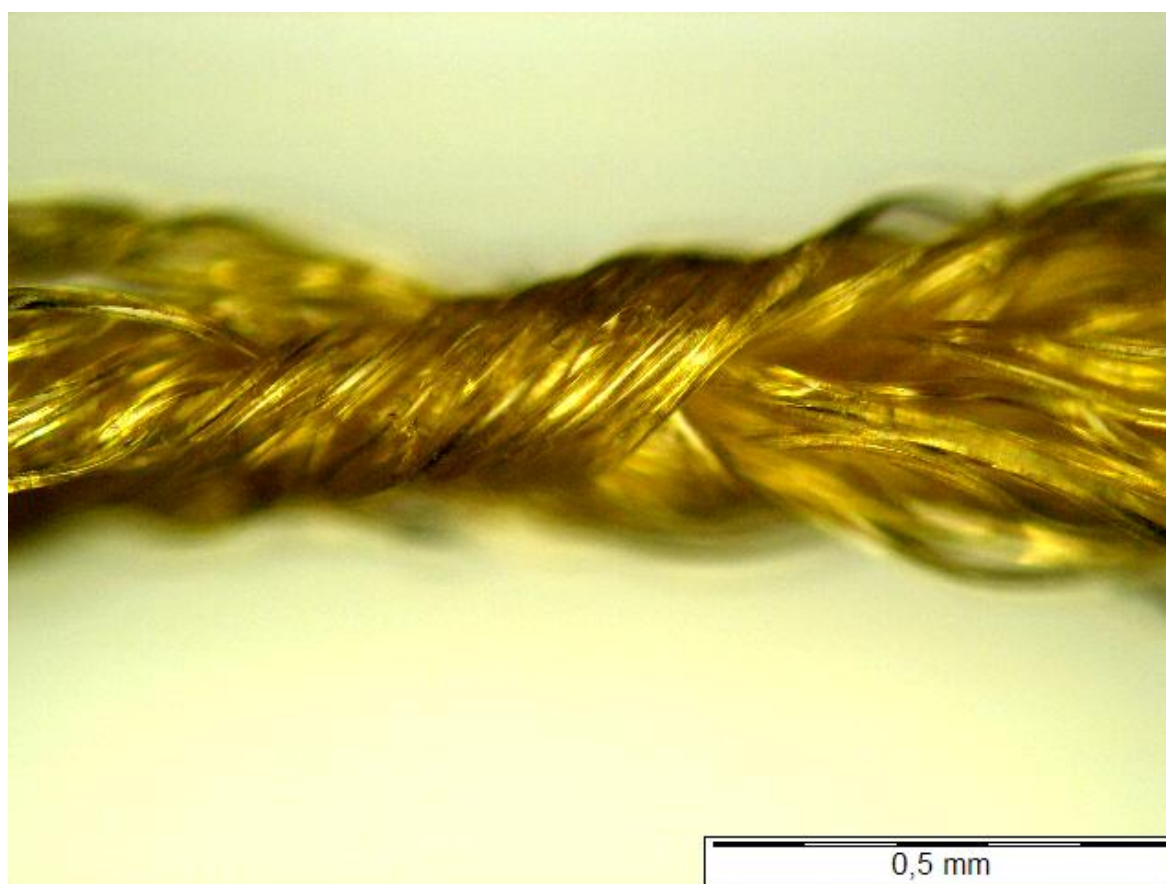
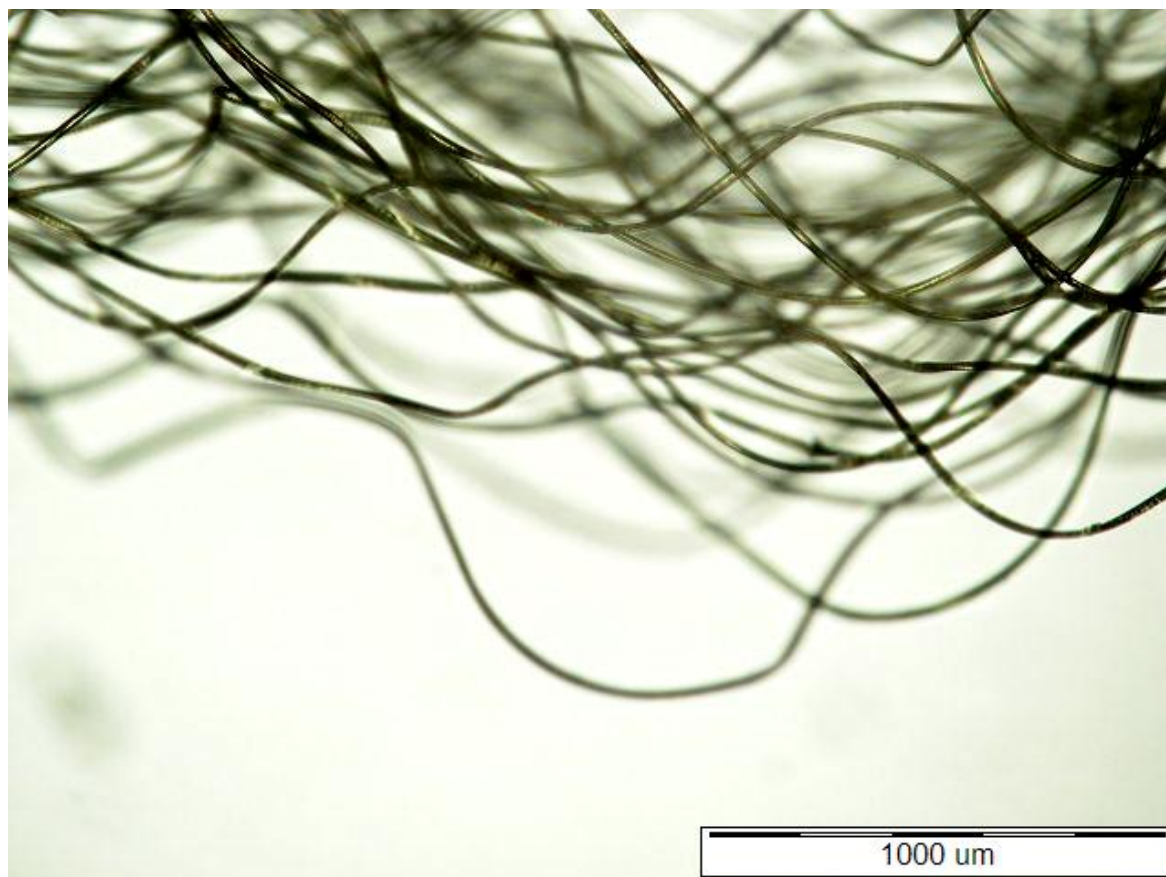
Elemi szál átmérőjének meghatározása - Átlag számítás, szórás, a szál struktúrája, csoportosítások (optikai mikroszkópos mérések, az elemi szál keresztmetszetének közelítése körrel)																			
1.fonal		2.fonal		3.fonal		4.fonal		5.fonal		6.fonal		7.fonal		8.fonal					
Mérési hely Nr.	Az átmérő értéke (µm)	Az átmérő értéke (µm)	Mérési helyNr.	Az elemi szál keresztmetszet e (µm ²)	Az átmérő értéke (µm)	Mérési helyNr.	Az elemi szál keresztmetszete (µm ²)	Az átmérő értéke (µm)	Mérési helyNr.	Az elemi szál keresztmetszete (µm ²)	Az átmérő értéke (µm)	Mérési helyNr.	Az elemi szál keresztmetszete (µm ²)	Az átmérő értéke (µm)	Mérési hely Nr.	Az elemi szál keresztmetszete (µm ²)			
1	20.819	340.416	1	250.105	15.987	1	200.735	308.779	1	278.655	18.836	1	151.288	13.879	1	16.854			
2	20.819	340.416	2	250.105	19.984	2	313.657	340.416	2	19.828	308.779	2	408.353	22.802	2	197.609			
3	18.836	278.655	3	223.098	17.985	3	254.045	340.416	3	20.819	340.416	3	340.416	20.819	3	17.845			
4	22.802	408.353	4	308.779	17.985	4	254.045	408.353	4	22.802	18.836	4	340.416	20.819	4	15.862			
5	20.819	340.416	5	223.098	15.862	5	197.609	223.098	5	16.854	250.105	5	278.655	18.836	5	19.828			
6	22.634	402.358	6	19.828	14.871	6	153.696	373.595	6	21.81	19.828	6	151.289	13.879	6	20.81			
7	24.619	476.026	7	250.105	24.785	7	482.467	340.416	7	20.819	18.836	7	173.688	14.871	7	17.985			
8	23.428	431.082	8	14.871	21.81	8	16.854	373.595	8	22.802	19.828	8	273.098	16.854	8	19.828			
9	22.634	402.358	9	18.836	18.836	9	340.416	340.416	9	278.655	15.862	9	308.779	19.828	9	313.657			
10	22.634	402.358	10	15.862	17.845	10	250.105	408.353	10	22.802	16.854	10	278.655	18.836	10	21.642			
11	18.836	278.655	11	278.655	14.871	11	173.688	197.609	11	15.862	22.802	11	250.105	17.845	11	17.985			
12	13		12	223.098	12	250.105		340.416	12	17.845	17.845	12	197.609	13	12	17.845			
13			13	278.655	13	223.098	13	16.854	13	16.854	223.098	13	15.862	15.862	13	15.862			
14	14	17.845	14	250.105	14	19.828	308.779	14	17.845	250.105	14	15.862	308.779	14	14	19.828			
15	15	17.845	15	250.105	15	15.862	197.609	15	15.862	197.609	15	15.862	340.416	15	15	20.819			
16	16	17.845	16	250.105	16	17.845	250.105	16	16	17.985	254.045	16	278.655	16	16	18.836			
17	17		17		17			200.735	17	15.987		17	308.779	17	17	19.828			
18	18		18		18			313.657	18	19.984		18		18	18				
19	19		19		19			254.045	19	17.985		19		19	19				
20	20		20		20			254.045	20	17.985		20		20	20				
átlag	21.716	372.827	átlag	249.672	18.331	223.662	269.095	298.878	átlag	18.624	275.193	átlag	18.370	269.946	átlag	18.541			
szórás	1.846	62.298	szórás	1.328	2.650	53.471	80.094	72.735	szórás	1.951	58.264	szórás	2.579	72.699	szórás	1.892			
max	24.619	476.026	max	19.828	24.785	278.655	482.467	340.416	max	22.802	340.416	max	22.802	340.416	max	20.810			
min	18.836	278.655	min	14.871	13.988	173.688	153.696	223.098	min	16.854	17.845	min	13.879	151.289	min	15.862			

19. Optikai mikroszkópos felvétel az elemi szárlól, és a szál átmérőjének mérése



20. Optikai mikroszkópos felvételek a fonalról





21. Elektron mikroszkópos felvételek a fonalról

