



Szintetikus makroszálak kihúzásának vizsgálata - És mégis szakad a szál -

Szerző:

Tóth Mária építészmérnök hallgató

Konzulensek:

Dr. Pluzsik Anikó egyetemi adjunktus, BME Építészmérnöki Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Juhász Károly Péter tanársegéd, laborvezető, BME Építészmérnöki Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Tartalom

1.	Bevezetés	3
2.	Problémafelvetés	6
3.	Elméleti háttér	8
	A száلكihúzódás vizsgálata konstans nyírófeszültséggel	9
	A száلكihúzódás vizsgálata változó nyírófeszültséggel	11
4.	Laborkísérletek	13
5.	A szálak viselkedése a hajlított betongerendában	19
6.	Elméleti és kísérleti eredmények összehasonlítása	22
7.	Konklúzió	23
8.	Továbbfejlesztési lehetőségek	24
9.	Összefoglalás	25
10.	Köszönetnyilvánítás	26
11.	Irodalomjegyzék	27
12.	Mellékletek	28

1. Bevezetés

A szálerősítésű beton egy kompozit anyag, amely betonból, mint a szálak ágyazó anyagából (betonmátrix), és a benne egyenletesen elkevert, véletlenszerűen elhelyezkedő szálakból tevődik össze. A szálerősítésű betonokat korábban elsősorban ipari padlókhöz alkalmazták, újabban egyre gyakrabban használják tartószerkezeti elemeknél is a vasalás kiegészítésére, esetenként csökkentésére vagy elhagyására (előregyártott beton elemek, vasúti ágyazat helyett szálerősítésű beton lemezágyazat, lemezalap, pincefal, utak és járdák, medencék). A beton duktilis viselkedésének javításán túl további előnye a repedés tágasságának csökkentése, amely leginkább a hozzáadott szálak típusától és mennyiségétől függ, nagyban hozzájárulva a kész szerkezet élettartamának növekedéséhez. [4]

Hazánkban is egyre elfogadottabbá válik a szintetikus szálerősítésű betonok alkalmazása, habár a szintetikus mikro és makro szálak közötti alapvető különbségeket gyakran még a szakemberek sem ismerik. A különbség azonban jelentős, mind a méretezés, mind a felhasználás tekintetében. A szintetikus szálakat a brit BS EN 14889 [2] szabvány két osztályba sorolja: mikro és makro szálak, a mikro szálakon belül pedig újabb két csoportba: mono szálak és fibrillált szálak (1. ábra). A szabvány egyértelműen megjelöli, hogy csak a makro szálak méretezhetőek statikailag:

Classification of fibres Polymer fibres shall be characterised by the manufacturer in accordance with their physical form.

Class Ia: Micro fibres: < 0,30 mm in diameter; Mono-filamented

Class Ib: Micro fibres: < 0,30 mm in diameter; Fibrillated

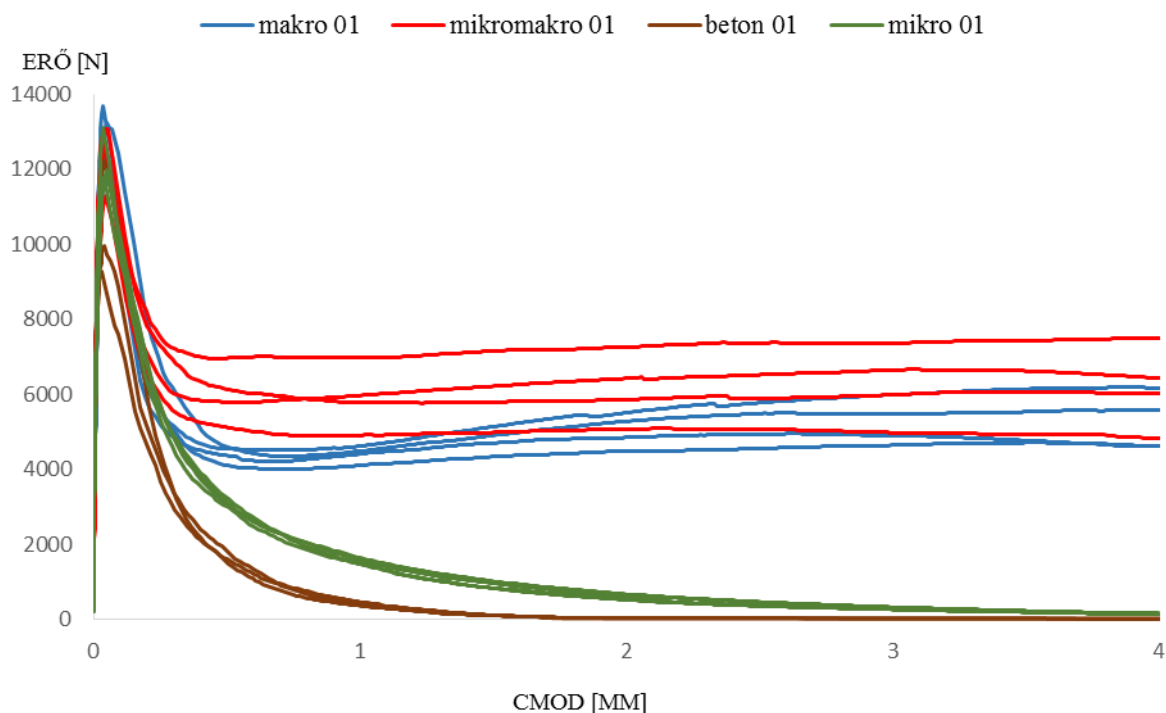
Class II: Macro fibres: > 0,30 mm in diameter

NOTE Class II fibres are generally used where an increase in residual flexural strength is required.



1. ábra: Fotó – Mikro és makro szálak

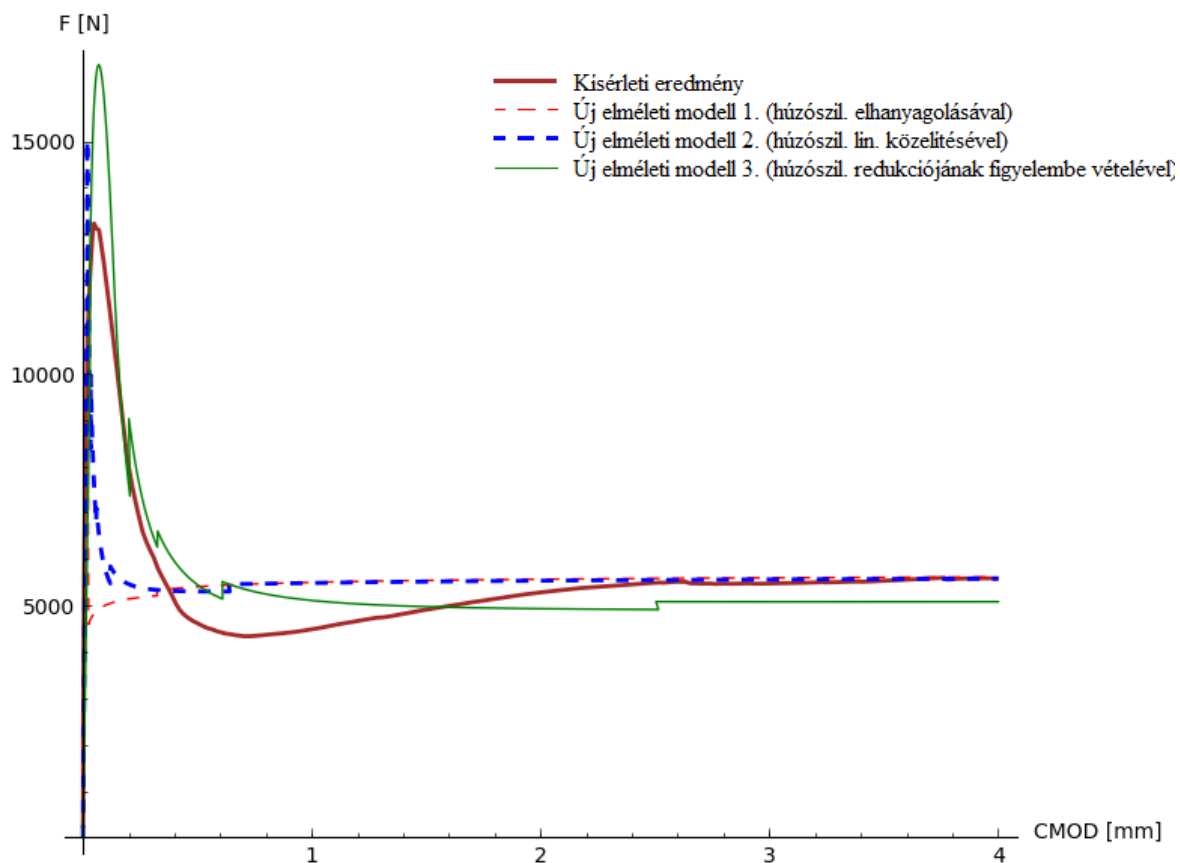
Korábbi kutatásaink során [7] a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék Czákó Adolf Laboratóriumában készítettünk egy gerenda teszt sorozatot, ahol a mikro és makro szintetikus szálak hatását vizsgáltuk a nemzetközi irányelvben ajánlott módon [8]. A gerendákat úgynevezett három pontos (felezőpontos) hajlítási teszttel vizsgáltuk, majd kimértük az erő-repedésmegnyílás értékeket. A repedésmegnyílás (CMOD: Crack Mouth Opening Displacement) a bemetszett gerenda alsó felületén a bemetszés megnyílásának nagysága, melyet egy speciális eszközzel mértünk ki a törés folyamata alatt egészen 4 mm-es repedés megnyílásig. A repedésmegnyílás a gerenda lehajlásával arányosítható.



2. ábra: Korábbi kísérlet F-CMOD ábrái

A 2. ábrán látszik, hogy a kísérleti eredményeknek igen nagy volt a szórása, ez a szálerősítésű betonok jól ismert jellegzetessége. A nagy szórás oka, hogy az egyes próbatestekben ugyanannyi szálmennyiség esetén is nagyon eltérő lehet a berepedt keresztmetszetbe jutó szálak mennyisége és eloszlása.

Az irodalomban található elkent modellek nem veszik figyelembe a szálak valós eloszlását, ezért csak átlagértéket tudnak adni. Ezért a kísérleti eredmények elemzéséhez egy olyan új mechanikai modellt hoztunk létre, mely a szálak valós eloszlását figyelembe veszi. A szálakat a gerendák törési keresztmetszetén számoltuk meg a gerendák törését követően.



3. ábra: Kísérleti és számított görbék [7]

Az így módon létrehozott elméleti, és a kísérleti görbék közelítésével kifejeztük a makroszállakban ébredő fiktív szálerőket. (3. ábra). Végeredményként megállapíthatjuk, hogy a mikro és makro szállal erősített (szálkocktélós) gerendákban levő fiktív szálerők 29%-kal magasabbak, mint a csak makroszállal erősített gerendákban. Új modellünk segítségével kiküszöböltük az eredmények különböző száleloszlásból származó szórását.

Összegzésül tehát, a szálerő a szálerősítésű betonok jellemző paramétere, kísérleti és elméleti értékének meghatározásával közelebb jutunk az anyag viselkedésének megértéshez, modellezéséhez.

2. Problémafelvetés

A hazai forgalomban kapható makroszálakat a gyártók általában a szakítószilárdsági értékükkel jellemzik. Korábbi kutatásaink azonban azt mutatták, hogy a szálak jellemzően kihúzóással mennek tönkre. A tavalyi kísérletben a gerendák tört felületén levő szálak számolásakor kitént, hogy a szálak nagyobb része kihúzóással ment tönkre: a gerendákban levő szálak 77%-a a töréskor kihúzózott a gerendából (1. táblázat). A kihúzózott és szakadt szálakat könnyen meg lehet különböztetni, mivel a szakadt szálak vége roncsolódik, míg a kihúzózottaké ép marad.

	kihúzózott szálak	szakadt szálak	összes szál	kihúzózott szálak aránya [%]
mikromakro1	60	23,5	83,5	72
mikromakro2	44	13	57	77
mikromakro3	69	16,5	85,5	80
mikromakro4	78	32	110	71
átlag:	62,8	21,3	84,0	75
makro1	56	21,5	77,5	72
makro2	103	12	115	90
makro3	64	18	82	78
makro4	69	22	91	76
átlag:	73,0	18,4	91,4	80

1. táblázat: Kihúzózott és szakadt szálak aránya [7]

A gyártók által meghatározott szakítószilárdsági érték a 2. táblázatban található. A szakítószilárdság várhatóan magasabb a szálak kihúzóáshoz tartozó feszültségeinél normál szilárdságú beton ágyazóanyag esetén. Ez problémát jelent a szintetikus szálakkal való tervezés során, így jelen dolgozatban célunk, hogy a kettő közti különbséget felmérjük. Ez fogja meghatározni a szálak tönkremenetelét, és befolyásolja a teljes gerenda viselkedését is.

Tavalyi dolgozatunkban a betongerenda törésekor kihúzózó szálak fiktív szálerejét határoztuk meg a mechanikai modell és a kísérletek közelítésével. [7] (2. táblázat) A számítás során a szálakban ébredő erőt konstansnak feltételeztük. A kérdés, hogy ez az általunk számolt érték hogy viszonyul a szálban fellépő tényleges erőhöz. A 2. táblázat alapján

megállapítható, hogy a szakítóerő és az elméletben a szálakban ébredő erő különbsége 86 %, a szakítószilárdság majdnem a kétszerese az általunk számolt fiktív szálerőnek.

Célunk, hogy megismerjük a lehorgonyzódás fizikai jelenségét és a szálerősítésű betonokra levezetett elméleti modelljeit. A meglévő számítási modellek és laborkísérletek segítségével megvizsgáljuk, hogy ez a szálerő tényleg felvehető-e konstansnak, illetve ha igen, akkor keressünk egy olyan számítási módszert a meghatározására, amit különböző szál- illetve betontípusokra egyaránt lehet alkalmazni.

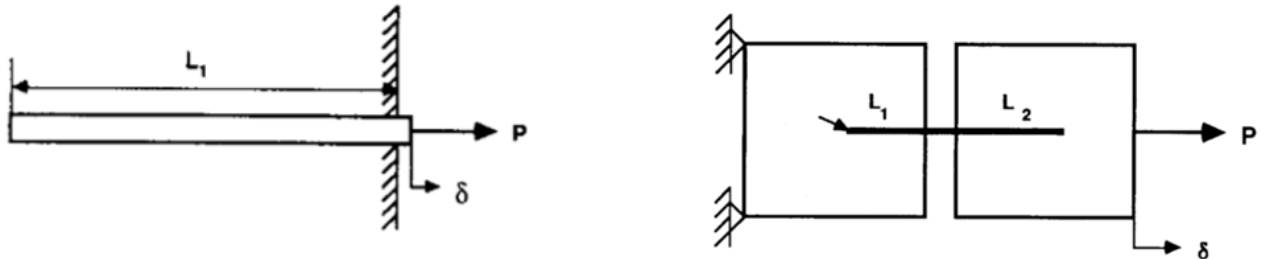
	$F_{szál}$ [N] húzószilárdság nélkül	$F_{szál}$ [N] húzószilárdság lineáris közelítésével	$F_{szál}$ [N] húzószilárdság redukciójának figyelembe vételével		Gyártó által megadott szakító- szilárdsági érték
makro1	138	137	107		
makro2	119	118	105		
makro3	127	125	112	átlag:	
makro4	128	127	117	121,67 N	
mikmak1	176	173	165		
mikmak2	171	170	154		
mikmak3	161	160	151	átlag:	
mikmak4	136	135	127	156,5 N	262 N

2. táblázat: Fiktív szálerők

3. Elméleti háttér

A szálak lehorgonyozódását a különböző anyagoknál, legyen az acél vagy műanyag, már évtizedek óta vizsgálják. A szakirodalomban több módszer létezik a szálak kihúzódnak vizsgálatára. Alapvetően két különböző eljárás létezik (4. ábra):

- a szálát egyik oldalán betonba ágyazva húzzák a másik felét
- a szálát mindkét végén betonba ágyazzák, és a két betonpofát húzzák egymástól

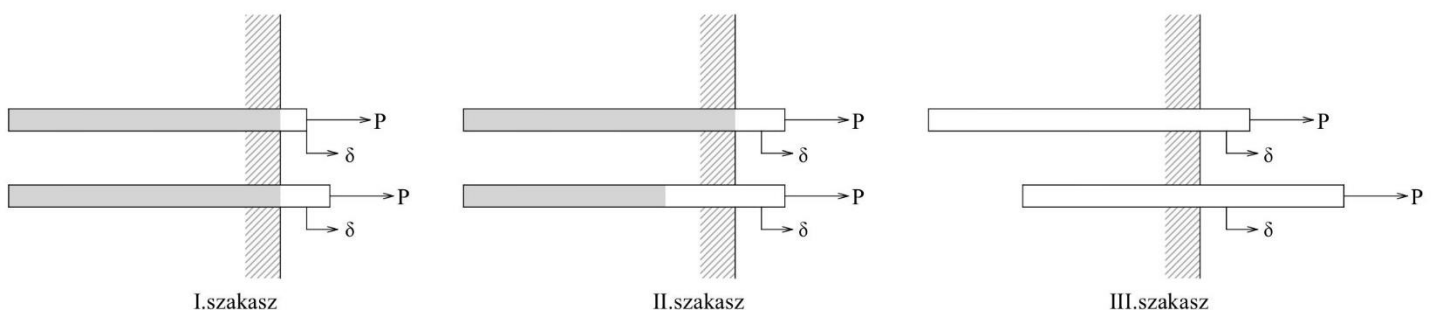


4. ábra: A száلكihúzás módjai [9]

A kétoldali befogás jobban modellezi a betongerendában történő viselkedését a szálaknak, ellenben lényegesen bonyolultabb kísérletet követel, ezért ebben a dolgozatban az egyoldali befogással történő kihúzást vizsgáltuk meg.

A száلكihúzódnak modellezésénél alapvetően három szakaszt különböztetnek meg:

- Az első fázisban a szálnak a cementmátrixból kilógó szakasza nyúlik meg.
- A második fázisban a szál és a cementmátrix közti tapadás szűnik meg. Ez a folyamat addig tart, amíg eléri a maximális erőt, ekkor visszaesik a terhelőerő. Ez a visszaesés a görbében jelzi a tapadást a szál és a mátrix között, hiszen ha pusztán súrlósásos kapcsolat lenne a kettő között, akkor nem esne vissza a terhelőerő. Természetesen itt is jelen van a súrlódási erő a már nem kötött szálszakaszon.
- A harmadik szakaszban végül a szál csak súrlódással kihúzódnak a betonból. (5. ábra)



5. ábra: A kihúzódnak három szakasza [5]

Az egy oldalt befogott szálak viselkedését is többféle módon lehet közelíteni, a különböző modellek a kihúzóadás három fázisából más-más szakaszt hanyagolnak el. Az irodalomban található számos cikk közül mi kettőt vizsgáltunk meg részletesen. Mindkettőre jellemző, hogy a hangsúly az elméleti modelleken van, a kísérletek pontos leírása nem szerepel a cikkben. Magyarországon pedig hasonló kísérleteket mindeztáig nem végeztek.

A szálkihúzóadás vizsgálata konstans nyírófeszültséggel

Z. Lin, T. Kanada és V.C. Li cikkében [5] 14,8 μm -es átmérőjű PVA mikroszálakat húznak ki cementmátrixból. A szálak lehorgonyzási hossza (L_e) 0,46 mm volt.

A szerzők feltételezik, hogy a tapadás alól felszabadult szálszakaszon a nyírófeszültség (τ_0) konstans, továbbá, hogy a szál rugalmas megnyúlása a tapadás megszűnése után elhanyagolható.

A tapadás megszűnését δ_0 megnyúlási állapotban éri el a szál. Ez az alábbi képlettel számítható:

$$\delta_0 = 2 * \tau_0 * \frac{L_e^2}{E_f * d_f} + \sqrt{(8 * G_d * \frac{L_e^2}{E_f * d_f})}$$

A második szakaszban az erőt a következőképpen számíthatjuk ki:

$$P = \sqrt{\pi^2 * \tau_0 * E_f * d_f^3 * \frac{\delta}{2} + \pi^2 * G_d * E_f * \frac{d_f^3}{2}}; 0 \leq \delta \leq \delta_0$$

A tapadás megszűnése után pedig:

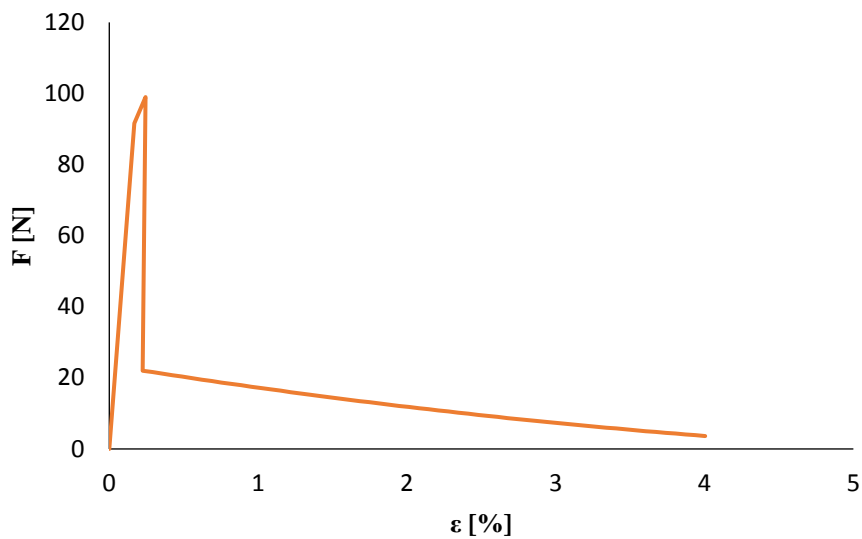
$$P = \pi * d_f * \tau_0 \left(1 + \frac{\beta(\delta - \delta_0)}{d_f} \right) (L_e - \delta + \delta_0); \delta_0 < \delta < L_e$$

ahol:

- τ_0 a nyírófeszültség a szál felületén [N/mm^2]
- L_e a szál lehorgonyzóadási hossza [mm]
- E_f a szál rugalmassági modulusa [N/mm^2]
- d_f a szál átmérője [mm]
- G_d a tapadás erőssége [N]
- β a csúszási-keményedési együttható [-]

A számított értékekből felrajzolt, illetve a kísérleti feszültség-megnyúlás diagramok közelítésével határozták meg G_d , τ_0 , és β értékeket.

Mivel a kísérleti görbéink (4. fejezet) ehhez a modellhez hasonlítottak leginkább, ezért ezzel a modellel közelítettük az eredményeinket. Az általunk vizsgált szál és beton jellemzőit behelyettesítve kapjuk a 6. ábrát.



6. ábra: Modellezett erő-megnyúlás görbe

Mivel a cikkel ellentétben az általunk végzett kísérletekben a beton felület és a befogópofa között jelentős szálszakasz volt szabadon, ezért figyelembe vettük a számításban ennek a szakasznak a megnyúlását is az alábbi képlettel:

$$\Delta l = l_0 * 4 * P / (\pi * d_f^2 * E_f)$$

ahol:

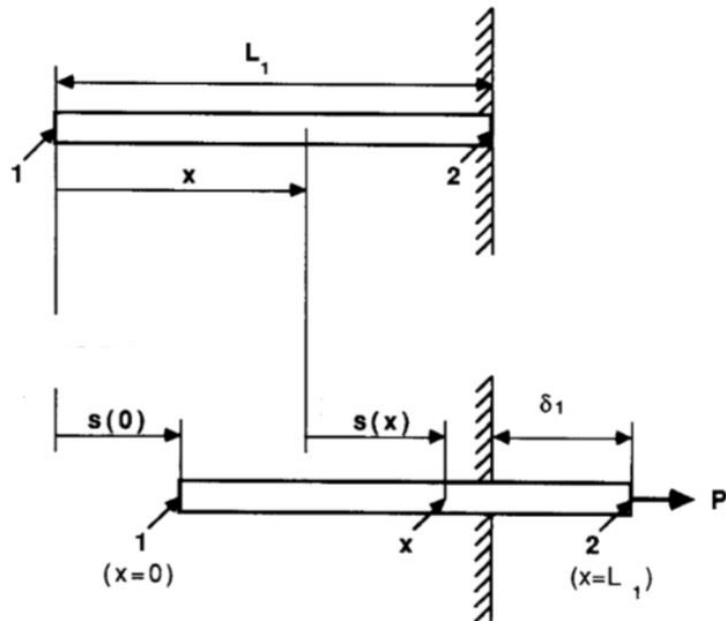
- Δl a szabad szál megnyúlása [mm]
- l_0 a szál betonfelület és befogópofa közötti szabad hossza [mm]
- P a terhelő erő [N]

A száلكihúzóda vizsgálata változó nyírófeszültséggel

Youjiang Wang, Victor C. Li és Stanley Backer cikkében [9] 0,508 mm átmérőjű polipropilén és nylon szálakat vizsgáltak 50 mm lehorgonyozási hosszal. A szálakat cementmátrixba helyezték, és az ágyazóanyag 3 napos korában végezték a kísérleteket.

A számításnál az alapvető feltevések a következők voltak:

- A szálak lineárisan rugalmasak.
- A szálak kellően szívósak ahhoz, hogy szakadás nélkül teljesen kihúzódjanak.
- A beton deformációja elhanyagolható.
- A tapadás elhanyagolható.
- A súrlódási erő (τ) az egységnyi szálszakaszon a szál betonban való elcsúszásának (s) függvénye. (7. ábra)



7. ábra: A szál kihúzóda modellje [9]

Az x koordináta-rendszer mindig az 1-es pontból indul ki, függetlenül a szál aktuális helyzetétől. A csúszási távolság, $s(x)$, meghatározható a szál beágyazott végének elcsúszásának, $s(0)$, és a szál 0 és x közötti szakaszának megnyúlásának, $\varepsilon(x)$, összegével:

$$s(x) = s(0) + \int_0^x \varepsilon(x) dx$$

A szál tengelyirányú megnyúlása egyszerűen az erőből számítható:

$$\varepsilon(x) = \frac{4}{\pi * d_f^2 * E_f} * P(x)$$

A terhelő erő pedig az egyensúlyi egyenletből határozható meg:

$$P(x) = P_0 + \int_0^x \tau(x) * \pi * d_f [1 + \varepsilon(x)] dx$$

ahol:

- $\tau(x)$ a súrlódási feszültség a szál felületén [N/mm²]
- E_f a szál rugalmassági modulusa [N/mm²]
- d_f a szál átmérője [mm]
- P_0 a szálvég lehorgonyzódását képviselő konstans erő [N]
- $\varepsilon(x)$ a szál tengelyirányú megnyúlása
- $s(x)$ a szál csúszási távolsága, ami végeredményben egyenlő az elmozdulással (δ)

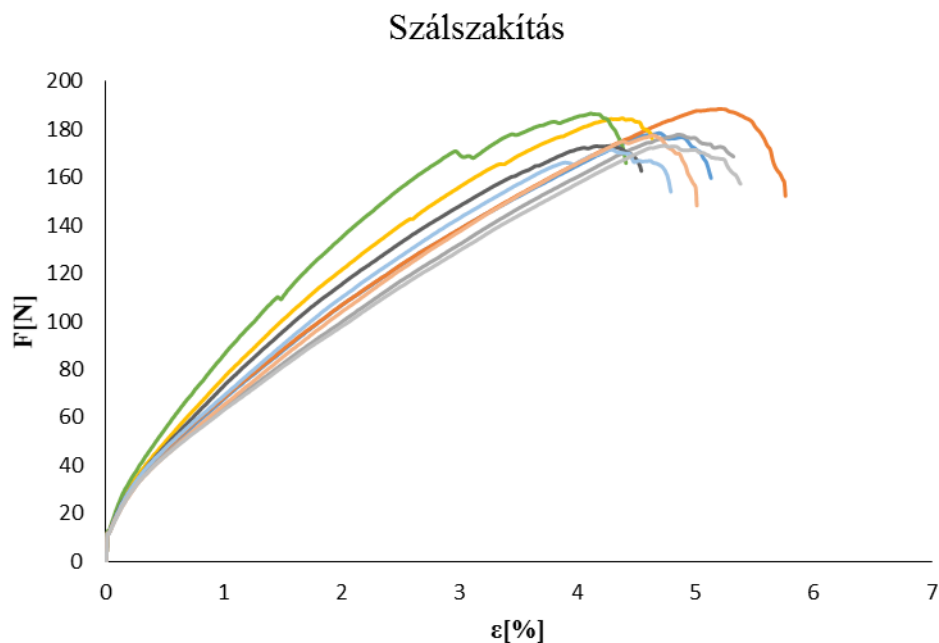
A számított értékekből felrajzolt, illetve a kísérleti feszültség-megnyúlás diagramok közelítésével határozták meg P_0 és $\tau(x)$ értékeket, ahol $\tau(x)$ -et empirikusan meghatározott τ - s függvénnyel írták le.

A szakirodalomban a vasbetonra is hasonló számítási módszert használnak [1,3]: a súrlódó feszültséget differenciál-egyenlettel számolják a tapadást teljesen elhanyagolva.

4. Laborkísérletek

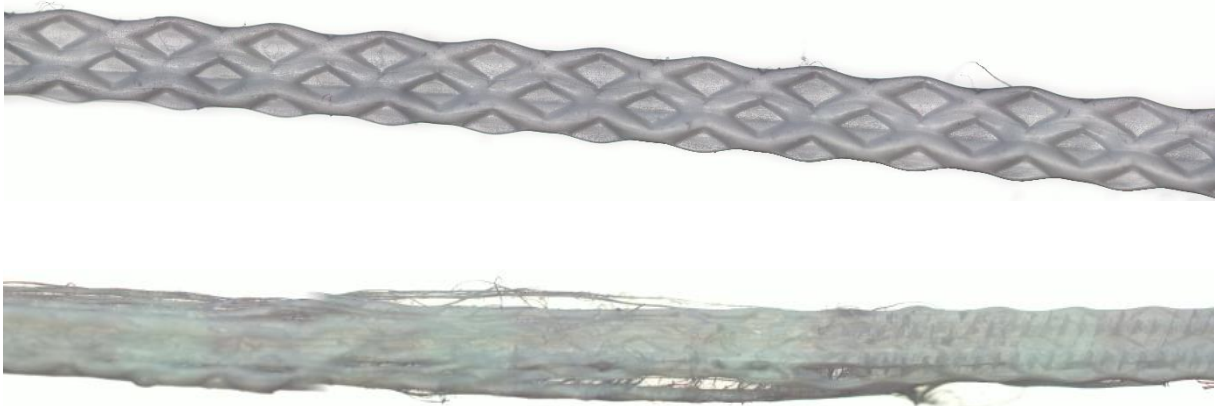
A kísérleteinkben Barchip típusú 0,4 mm x 1,19 mm-es négyzetes keresztmetszetű, 7 cm hosszú polipropilén szálakat vizsgáltunk. A szálak hosszúsága kereskedelmi forgalomban 5 cm, ez az építőipari léptékhez viszonyítva is kicsi, de a kísérletek befogásához sem túl kedvező. Ezért egyrészt Angliából rendeltünk hosszabb, 7 cm-es és 1 m-es szálakat, másrészt kapcsolatba léptünk a Polimertechnika Tanszék kompozit laborjával, ahol már vizsgálták elemi szálak gyantából történő kihúzódsát.

Először megmértük hús szálnak a szakítószilárdságát egyszerű húzással a Polimertechnika Tanszék laboratóriumában.



8. ábra: Szálszakítás erő-elmozdulás diagramja

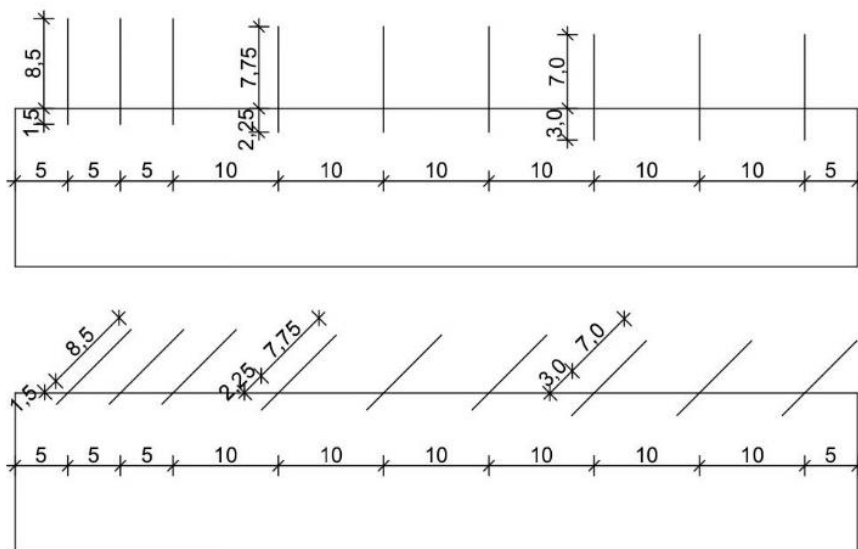
Az átlagos szakítóerő: 169 N volt. Így a szálak szakítószilárdságára átlagosan $f_t = 355 \text{ N/mm}^2$ -es értéket kaptunk. (A gyártó által megadott érték ennél magasabb, 550 N/mm^2 , az ebből az értékből számított szálszakító erő: 262 N) [10] A 8. ábrán látható, hogy a szálak anyaga jó közelítéssel lineárisan rugalmas, a tönkremenetel rideg, képlékeny szakasz nem ábrázolódik.



9. ábra: Szál tönkremenetel előtt és után

Ezek után négy betongerendát öntöttünk: kettőt 0-4-es (A típusú gerenda), kettőt 0-8-as (B típusú gerenda) adalékanyag szemeloszlással. A gerendák 80 cm hosszú, 6 cm széles és 15 cm magas zsaluban készültek C25/30 minőségben.

Minden gerendába 9 darab 10 cm hosszú szálát helyeztünk el, három különböző bemelegítési mélységben: gerendánként három 15mm-es, három 22,5 mm-es és három 30 mm-es mélységben berakott szál került. További különbség, hogy egy-egy A és B típusú gerendába egyenesen, egy-egybe pedig 45°-os szögben ferdén helyeztük el a szálakat. A szálak közti távolságnál figyelembe vettük a bemelegítési mélység függvényében, hogy a különböző szálak kihúzóda ne zavarja a mellettük levőket. (10. ábra)



10. ábra: Szálak elhelyezkedése a gerendákban



11. ábra: Fotó - Betonozás

Az így elkészített gerendákat (11. ábra) 21 napos korukig hagytuk szilárdulni. A szálak kihúzása bonyolultabb volt, mint számítottunk rá: bár a Polimertechnika Tanszék laboratóriumában volt megfelelő berendezés a szálak kihúzására, az általunk készített gerenda (ami nálunk kicsinek számít...) túl nagy volt, így az ottani géppel nem tudták befogni. Ezt a problémát viszonylag könnyen áthidaltuk, mert a kísérletünk erejéig megkaptuk a Polimertechnika Tanszéktől a száلكihúzásra alkalmas befogópofát, és a ZWICK Roell gépek egyformasága folytán a Czakó Adolf laboratórium ZWICK/ROELL Z150 típusú univerzális anyagvizsgáló gépével tudtuk elvégezni a kísérletet. Ehhez szükség volt egyedi acél elemre, amivel a géphez tudtuk rögzíteni a próbatestet, nehogy annak elmozdulása befolyásolja az eredményeinket. (12. ábra)



12. ábra: Fotó - Szálak kihúzása

A következő probléma a gerenda befogásánál adódott: az első gerenda a túl erős leszorítás hatására eltört, így az egyenes elhelyezkedésű szálakkal készített B típusú gerendát elvesztettük, hiszen a repedés befolyásolta volna az eredményeket. A ferde szálas B-s gerendán kezdtük meg tehát a kihúzási kísérleteket 0,2 mm/sec terhelési sebességgel. Ez a sebesség azonban gyorsnak bizonyult, mert a szálak kihúzódás helyett beleszakadtak a betonba, illetve a befogópofába, mert az erősen módosította a szálszerkezetet. (13. ábra)

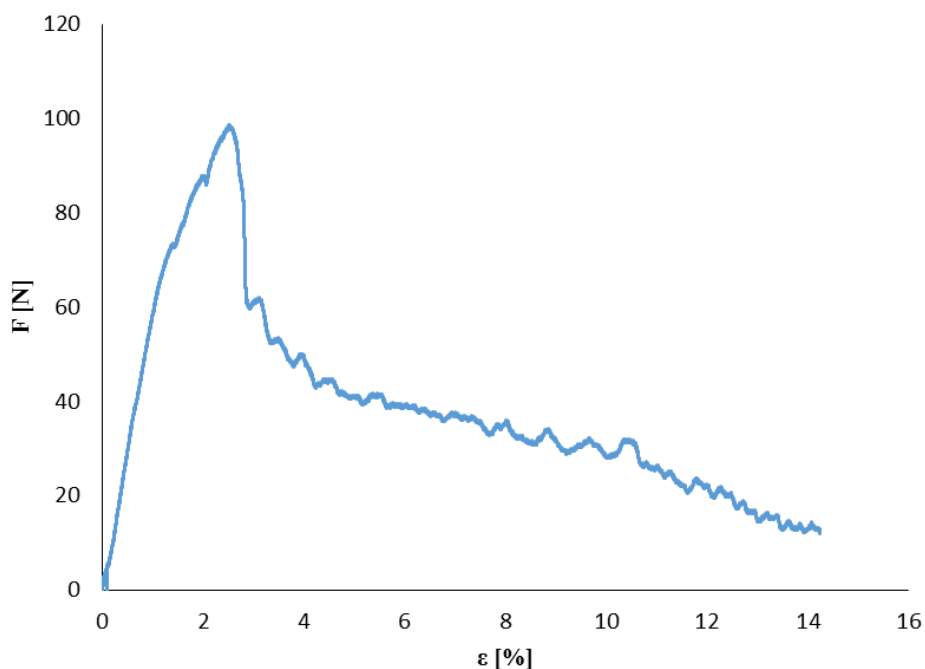


13. ábra: Fotó - Szálszerkezet roncsolódása a befogásnál

Ezt a gerendát végül a különböző terhelési sebességek közül a megfelelő kikísérletezésére áldoztuk, ezért mértékadó eredményt innen sem kaptunk. A sebességet 1 mm/perc-re állítottuk.

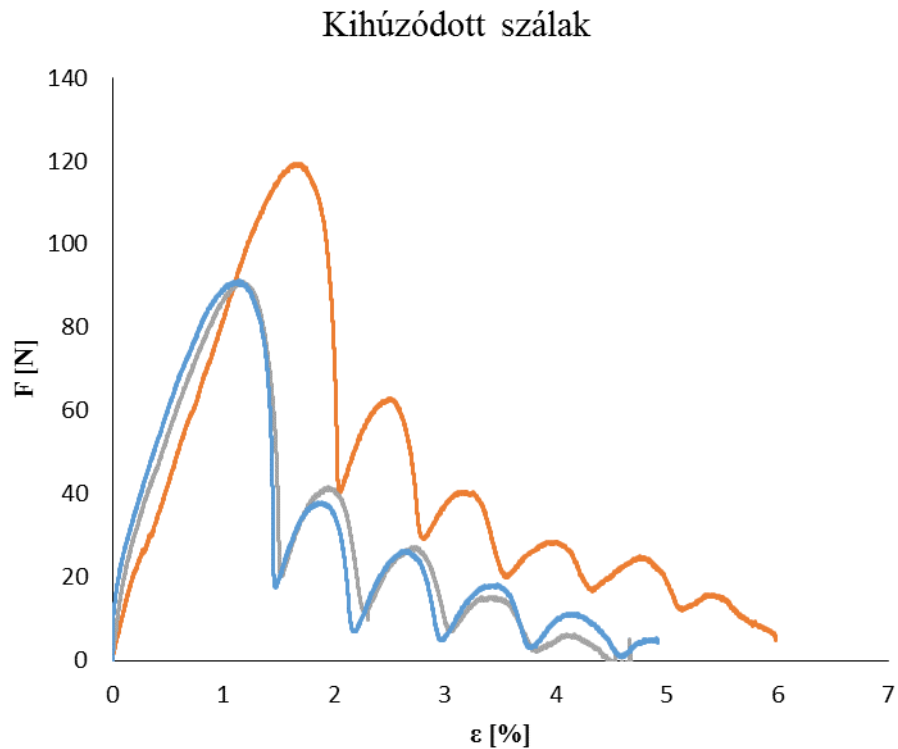
További nehézségek adódtak a befogás kialakításából: ha túl szorosra húztuk meg, akkor a szálszerkezet roncsolódása miatt elszakadt a szál, míg ha nem húztuk meg eléggé, akkor a befogópofából húzódott ki a szál a beton helyett. A 14. ábra a betonpofából kihúzódott szál erő-megnyúlás diagramját mutatja. Ez a kihúzódási alak hasonlít ahhoz, mint amelyet a továbbiakban a betonból való kihúzódásra szeretnénk kapni...

Betonpofából kihúzódott szál



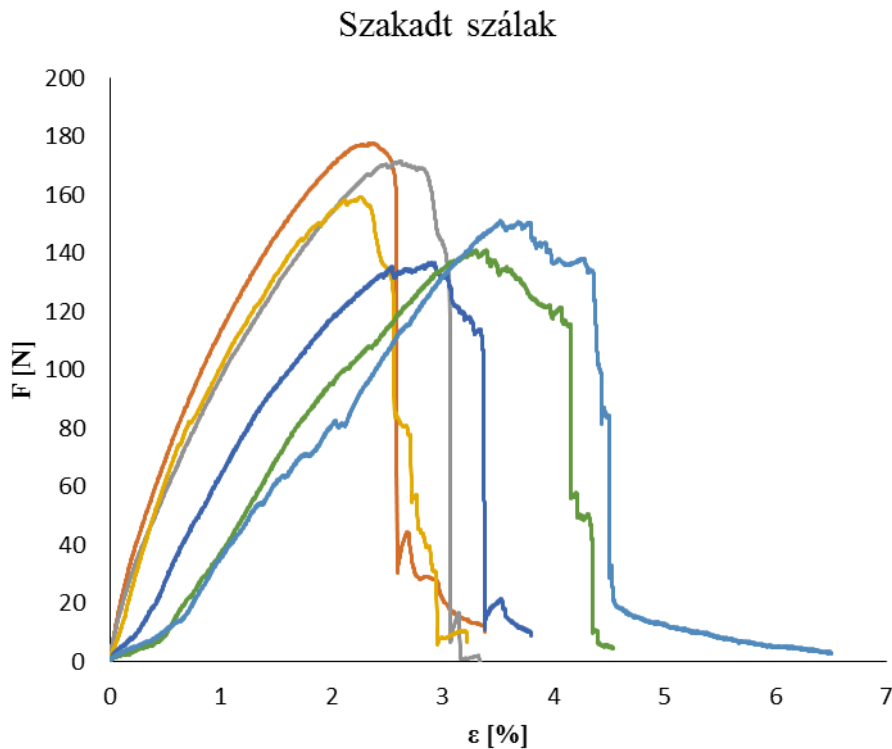
14. ábra: Betonpofából kihúzódott szál erő-megnyúlás diagramja

A 15 mm hosszan lehorgonyzott szálak közül egy ferde és két egyenes szálát sikerült kihúzni. (15. ábra) A ferde szál jól láthatóan elkülönül, ennek a kihúzódáshoz tartozó szálereje 15%-kal nagyobb, mint az egyenesen húzott szálaké. A diagram visszaesései a szálak bordázottságából adódnak: miután a szál felületén levő borda megakad egy-egy kavicsban, a szál „ugrik” egyet kihúzódás közben, ez okozza a terhelő erő visszaesését. Másrészt a makroszál több összesodort szálból áll, és a húzás során elszakadó egy-egy szál is befolyásolhatja az eredményt. Tehát ezek az ábrák is kevert tönkremenetel hatását mutatják.



15. ábra: Kihúzódott szálak erő-megnyúlás görbéje

A 30 mm-es illetve 22,5 mm-es bemelegítési mélységű szálak közül egyet sem sikerült kihúzni a gerendákból, ezek következtében elszakadtak. (16. ábra) A szálak átlagosan 157 N-nál szakadtak el, ami közel azonos a szálak szakítóvizsgálatakor mért 169 N-os értékkel.



16. ábra: Szakadt szálak erő megnyúlás diagramja

Mivel a hasonló betonminőséggel készülő hajlított gerendákban (száltípustól függetlenül) a szálak többnyire kihúzódnak, ez az eredmény meglepett minket.

A 3. fejezetben említett irodalmakban azért jártak sikerrel, mert az első cikkben mikroszálakat teszteltek tized ekkora lehorgonyzódással, a másodikban pedig 3 napos betonnál húzták ki, mi 21 napos betonnal és jóval nagyobb bemelegítési mélységgel dolgoztunk, ráadásul erősen bordázott felületű szálakat vizsgáltunk. További oka lehet a szakadásnak, hogy a szálak a hajlított beton gerendában másképp viselkednek, mint az ilyen egyoldali húzáskor. Egyrészt kétoldali a befogás, másrészt a terhelt gerendában a repedés két oldalán mikrorepedések alakulnak ki, melyek módosítják a súrlódásos kapcsolatot a szál és beton felületén.

5. A szálak viselkedése a hajlított betongerendában

A kísérletek és a számítási modellek alapján látható, hogy a szálak egyirányú kihúzóerőhöz tartozó erő nem modellezhető konstansként. Azonban az eredeti célunk a szálak betonban való viselkedésének modellezése volt. A tavalyi TDK-ban konstanssal közelítettük a szálban fellépő erőt, ami meglepően jó eredményt adott (3. ábra) [7]. A kérdés, hogy miért van ekkora különbség a szál törés közbeni, illetve gépi kihúzóerő között.

Mi erre a következő okokat látjuk:

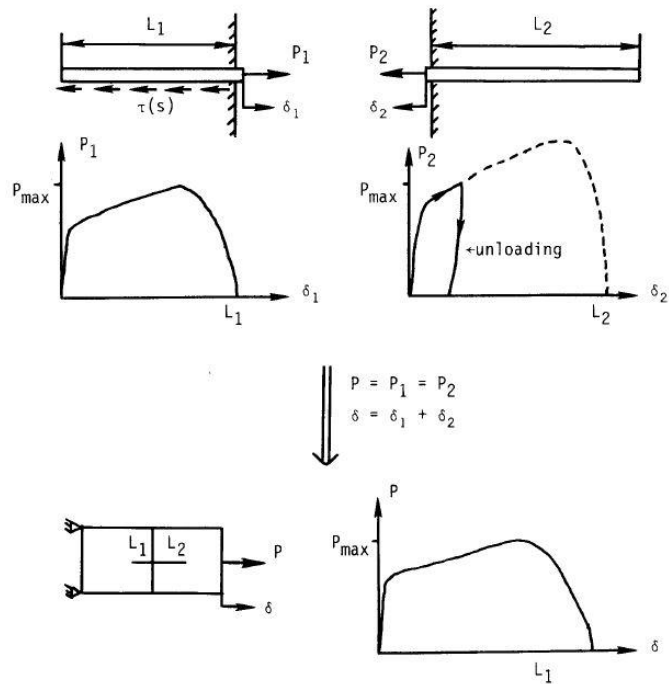
- Amíg a betongerenda be nem reped, a makroszálaknak lényegében nincsen hatása, ezért a görbe első szakasza elhanyagolható, a szálak kihúzóerőhöz tartozó ereje a számított görbe visszaesés utáni szakasza alapján vehető fel.
- A kísérleteinkben egyoldali befogás volt. A gerendában az egyik oldali kihúzóerő megkezdése után a másik oldal is elkezd kihúzóerővel, így a kettő hatása összeadódik.

Mivel kísérletünk célja nem az egyoldali szálkihúzóerő, hanem a szálak betonban való viselkedésének modellezése, és a két oldalról befogott szál a külföldi kísérletek szerint [9] jobban közelíti ezt a viselkedést, ezért megpróbáltuk modellezni ezt is. A 17. ábra az egyoldali eredmények alapján számolt kétoldali kihúzóerőt mutatja [9] alapján. Ezzel a módosítással és a tapadási súrlódást elhanyagolva Lin, Kanada és Li [5] (6. ábra) megoldását mutatja a 18. ábra. A tapadási tag várhatóan nem befolyásolja a gerenda viselkedését, hiszen a beton gerendában a repedés előtt a szálak hatása elhanyagolható, erőjátékuk vizsgálatára csak a repedés lokalizációja utáni duktilis szakaszon van szükség. A 17. és 18. ábra alapján látható, hogy a kétoldali befogás esetén a görbe csúszási súrlódáshoz tartozó szakasza kisebb hibával közelíthető konstanssal, mint egyoldali befogás esetén. A közelítően konstans kihúzóerő értéke feltételezésünk szerint meghatározható pusztán a szál felületén ébredő nyírószilárdság integrálásából. Ezt első körben konstans nyírófeszültséggel próbálhatjuk modellezni Lin, Kanada és Li [5] cikke alapján. Ez a 18. ábra ε_0 -hoz tartozó értéke:

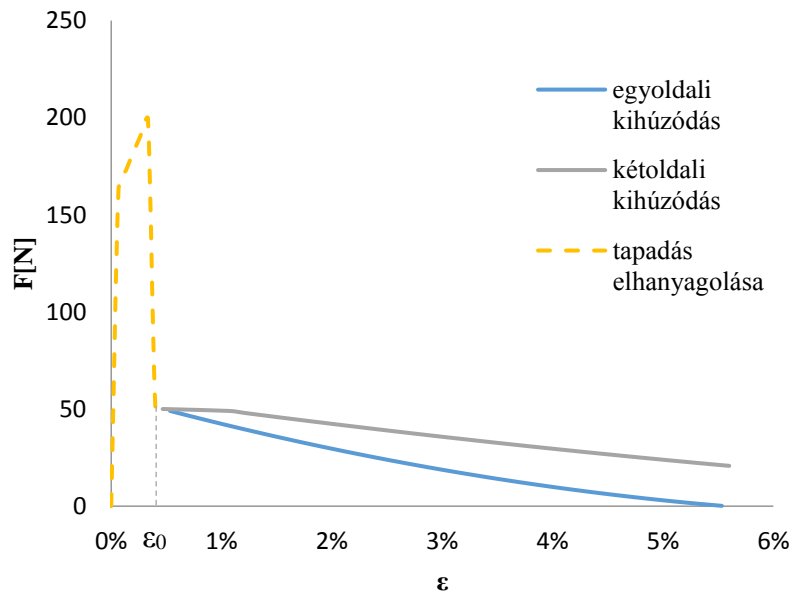
$$P = \pi * d_f * \tau_0 \left(1 + \frac{\beta(\varepsilon - \varepsilon_0)}{d_f} \right) (L_e - \varepsilon + \varepsilon_0) = \pi * d_f * \tau_0 * L_e; \varepsilon_0 = \varepsilon$$

Ha a további kísérletek alapján ez nem adna jó eredményt, úgy lehet a nyírófeszültség eloszlását lineáris vagy másodrendű felvett közelítéssel (Wang, Li és Backer cikke alapján [9]), illetve az elcsúszási kapcsolat differenciálegyenletéből számolt függvényvel (vb-ra vezetett megoldás [1]) tovább pontosítani. A konstansnak feltételezett kihúzóerő értéke ekkor:

$$P = \pi * d_f * \int_0^{L_e} \tau(x) dx$$



17. ábra: Két oldalról befogott szál modellezése [9]

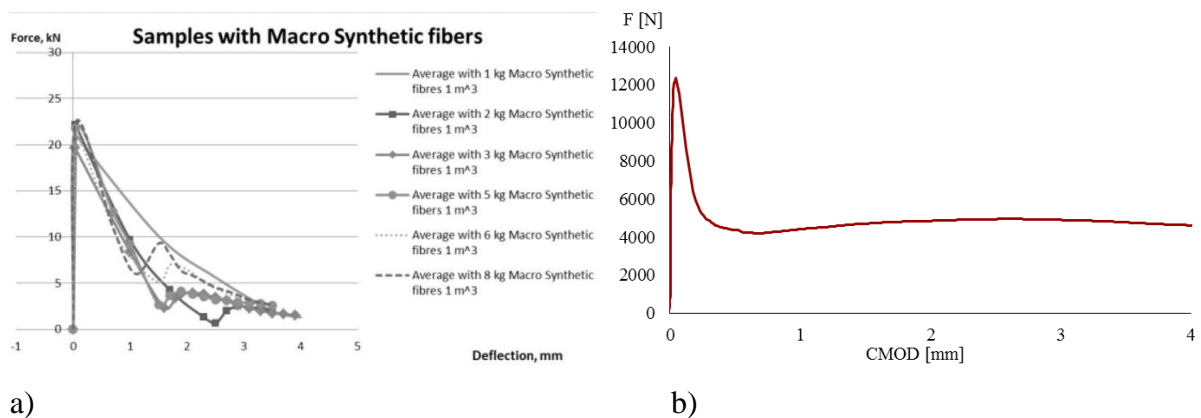


18. ábra: Lin, Kanada és Li modelljének módosítása két oldalról befogott szál esetén [5]

Ezek a felvetések jelenleg kísérletekkel nem bizonyítottak, vizsgálatukra további kísérletek folytatása szükséges.

Keressük későbbiekben azt a határpontot ahonnan a szálak szakadással és nem kihúzóással mennek tönkre a gerendában. Ez a betonminőség és a száljellemzők együttes függvénye. Ismerete alapvető fontosságú lenne, hiszen a szálerősítésű beton gerenda tönkremenetelének jellegét alapvetően befolyásolja. Ha a szál szakad, a tönkremenetel rideg, hiszen a szálak nem képlékenyednek. Ha kihúzódnak a szálak, a gerenda duktilissá válik, ez az egyik oka a szálak alkalmazásának a beton szerkezetben.

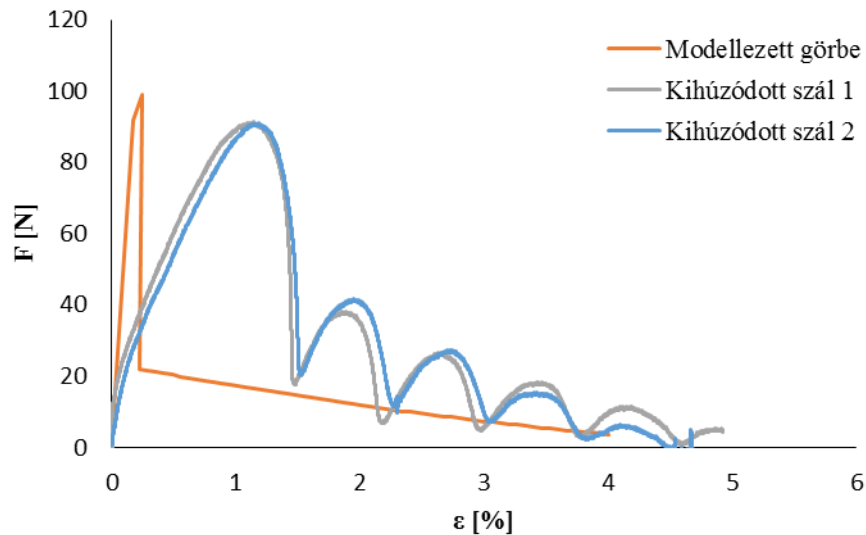
A Riga Technical University cikkében nagyszilárdságú betonnal végeztek a kísérleteket. Azt tapasztalták, hogy a tört felületen a szálak nagy része szakadással ment tönkre. Ábráikon látszik, hogy a beton viselkedése rideg maradt. [6] A nagyszilárdságú és a normál szilárdságú szálerősített beton viselkedése közti különbséget mutatja a 19. ábra, melyen: a Rigai Egyetem (a) és az általunk korábbi kutatásaink során felrajzolt (b) görbéket ábrázoltuk. [7]



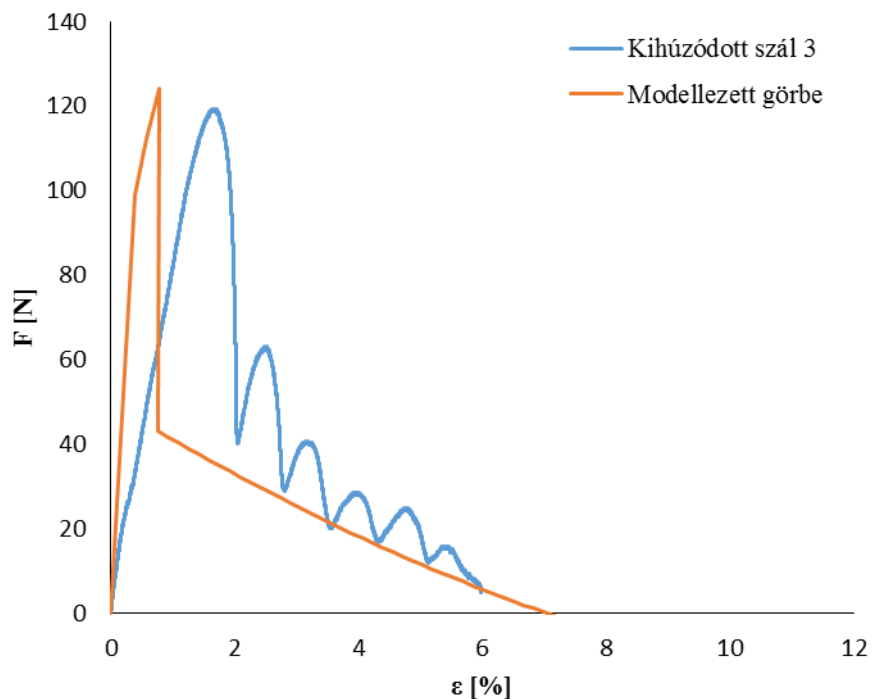
19. ábra: Nagyszilárdságú és normál szilárdságú szálerősített beton közti különbség [6,7]

6. Elméleti és kísérleti eredmények összehasonlítása

A 20. és 21. ábrákon láthatjuk az elméleti és kísérleti erő – megnyúlás görbéket. Mivel a kisebb szálpásmák folyamatosan szakadtak, a kísérleti görbék nem tiszta lehorgonyzódási jelenséget mutatnak, de a második szakaszon a leszálló ág jellege hasonló az elméleti megoldáshoz.



20. ábra Kísérleti egyenes szálak és modellezett erő-megnyúlás görbék



21. ábra: Kísérleti ferde szál és modellezett erő-megnyúlás görbék

7. Konklúzió

Alapvető célunk a betongerendában lejátszódó száلكihúzódás modellezése volt. Miután korábbi kutatásaink azt mutatták, hogy ez a kihúzódáshoz tartozó szálerő a szálerősítésű beton jellemző paramétere, közelebb visz az anyag viselkedésének modellezéséhez, ezért alaposabb tanulmányozását kezdtük el.

A laborvizsgálatok során elrontott kísérletről soha nem beszélhetünk. Az viszont előfordulhat, hogy más lesz a kísérletek tanúsága, mint amire előzetesen számítottunk. Jelen esetben is ez történt. A lehorgonyzódás jelenségének tanulmányozása helyett megállapíthattuk, hogy „mégis szakad a szál”. Az előzetes ismereteink alapján jogosan várhattuk volna, hogy ki tudjuk húzni a szálakat a próbatestekből, mert:

- a szálszakító erő a gyártók szerint 262 N
- a várt száلكihúzó erő kb. 120 N (tavalyi kutatásaink alapján számított elméleti érték)
- A tanszéken régóta zajló kísérletek tanúsága, hogy a normál betonminőségek esetén a hajlított gerendákban a húzott szálak többségében kihúzódnak (tavalyi kutatásunk, régebbi tanszéki kísérletek)

Mi lehet az oka, hogy mégis elszakadt a szálak többsége:

- A tényleges szakítószilárdság kisebb, mint a gyártók által megadott érték (gyártó: 262N, mért szakítószilárdság: 169N) [10]
- Az általunk készített próbatestekben a szálak igénybevétele jelentősen eltér a hajlított gerendák húzott szálaitól, mert: nem egyoldali, hanem kétoldali befogás van, és a gerenda középső berepedt keresztmetszete melletti betonzóna mikrorepedésekkel van áthálózva, ami súrlódásos kapcsolati feszültséget jelentősen csökkentheti.

Összegyűjtöttük a szakirodalomban található elméleti modelleket a száلكihúzódására. További kísérletekre van azonban szükség ahhoz, hogy ezen modellek alkalmazhatóságát vizsgáljuk, illetve megállapítsuk, hogy hogyan modellezhető a hajlított betongerendában lévő száلكihúzódása.

Jelen kísérlet összességében jó alapja lehet a további kutatásoknak, kísérleteknek.

8. Továbbfejlesztési lehetőségek

A kísérletet lehet, és érdemes folytatni. Jelen kutatás inkább előkísérletnek tekinthető, hiszen Magyarországon eddig ilyet nem csináltak. A kísérletet meg kéne ismételni kisebb szilárdságú betonnal, kisebb lehorgonyzódási hosszal, illetve érdemes a szálak befogópofába történő rögzítésén finomítani, hogy ott se szakadjanak el a szálak. A terhelési sebességet is érdemes tovább hangolni. Összességében szükséges lenne megkeresni azt az állapotot, amikor a szálak tényleg kihúzódnak, és nem szakadnak el, hiszen így a modellezéshez megbízhatóbb anyag áll rendelkezésre.

Továbbá mind modell, mind kísérlet terén felmerül a két oldalról bebetonozott szál vizsgálata, amelyre jelen dolgozat nem tért ki.

Mindemellett, ha már megvan a megfelelő kísérleti alkalmazás, a szálak szögének, bemelegítési mélységének hatását is jó lenne megvizsgálni.

Sikeres kísérletek birtokában szeretnénk választ találni az 5. fejezet felvetéseire, és egyszerű modellt találni a szálak viselkedésére a hajlított gerendában.

9. Összefoglalás

A szálerősítésű betonok használata napjainkban széles körben terjed. A különböző típusú szálak viselkedésének, betonra gyakorolt hatásának vizsgálata folyamatosan zajlik. A szintetikus szálerősítésű betonokat jellemzően a gerendák törésekor mért erő – repedésmegnyílás diagram jellemző értékeivel viszonyítják egymáshoz. Ezek az értékek azonban a nagy szórás miatt nehezen használhatóak, illetve csak nagyszámú kísérleti eredmény esetén adnak elegendően pontos összehasonlítási alapot. A kísérleti eredmények nagy szórását a szálak különböző elhelyezkedése okozza.

Korábbi kutatásunkban (TDK 2015) úgy hasonlítottuk össze a különböző száltípusokkal erősített gerendákat, hogy a kísérleti és a mechanikai modell számításával felrajzolt görbék közelítésével meghatároztunk egy fiktív szálerőt. Az így meghatározott elméleti szálerő szórása jelentősen kisebb, mint az általánosan használt erő-elmozdulás értékeké, ezért jobban használható különböző típusú szálerősítések összehasonlításához.

Jelen kutatásban azt vizsgáltuk, hogy az elméleti modellünkből levezetett fiktív szálerő mennyiben tér el a terhelt gerendák szálaiban ébredő valódi szálerőtől. A szálak a normál szilárdságú betonban jellemzően nem elszakadnak, hanem kihúzódnak. A szálerő tehát nem a gyártók által megadott szakítószilárdság, hanem ennél kisebb, a kihúzódáshoz tartozó erő lesz.

A száلكihúzóási erő meghatározására a szakirodalomban található elméleti modelleket használtuk fel. Az irodalomban a lehorgonyzáshoz tartozó erőnek három szakaszát különböztetik meg: az első szakaszban a szálnak a betonmátrixon kívül eső szakasza nyúlik meg, második fázisban a mátrix és a szál közötti tapadás szűnik meg, majd végül a szál a felület bordázottságának köszönhetően súrlódással kihúzódik a betonból. Az irodalomban többféle modell található, melyek az egyszerűsítések során a száلكihúzóási más-más fázisának hatását hanyagolják el. A korábbi kutatásunkban a fiktív szálerőt konstansnak feltételeztük. Célunk ezt a feltevést pontosítani, megtalálni azt a legegyszerűbb száلكihúzóási modellt, mely elegendő pontosságú és beilleszthető az elméleti modellünkbe.

A számításhoz Lin, Kanada és Li cikkét vettük alapul, mely a beton és a szálak közötti súrlódási feszültséget konstansnak feltételezve számolja a szálerőt a megnyúlás függvényében. A szükséges ismeretlen adatokat kísérletek segítségével határoztuk meg: beton gerendákba különböző szögben és bemelegítési mélységben szintetikus makroszálakat helyeztünk el, majd ezeket a beton szilárdulása után anyagvizsgáló gép segítségével húztuk

ki, mérve a kihúzó erő- elmozdulás értékeket. A kísérletek nagyszámú sikertelensége miatt kevés használható eredmény született.

Az eredmények azonban így is jól mutatják, hogy a szálak gerendában való viselkedése eltér az egyszerű egyoldali befogással történő kihúzástól. Ennek oka, hogy a betonban a szálak két oldalról befogottak, illetve, hogy a szálaknak a gerendában csak a törés bekövetkezte után van szerepük.

Összességében tehát a kísérletünk jó alapot biztosít a további kutatáshoz, a kísérletek finomításához.

10. Köszönetnyilvánítás

A szerző itt szeretne köszönetet mondani első sorban konzulenseinek, Pluzsik Anikónak és Juhász Károly Péternek a kitartó támogatásukért, hasznos tanácsaikért, továbbá Óvári Vilmos betontechnológusnak és a Czakó Adolf Laboratórium technikusának, Sebestyén Ottónak a betongerendák elkészítésében nyújtott nagy segítségért.

Külön szeretném megköszönni Morlin Bálintnak, a Polimertechnika Tanszék adjunktusának a szálak szakításában, befogási módszereiben való segítségét, tanácsait.

A cementet a LAFARGE Cement Magyarország Kft. szolgáltatta, az adalékanyagokat pedig a York bánya. A szálakat és a keverőgépet a Fiberguru Kft. biztosította. A kísérletekhez használt ZWICK/ROELL Z150 típusú univerzális anyagvizsgáló gépet a TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 pályázat biztosította.

11. Irodalomjegyzék

- [1] Borosnyói A., Kausay T., Tóth E.: Szerkezetek diagnosztikája. *Oktatási segédlet* (2011)
- [2] British-Adopted European Standard: *Fibres for concrete. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity, Standard BS EN 14889-2:2006* (2006).
- [3] Hong, S. and Park, S. K.: Uniaxial Bond Stress-Slip Relationship of Reinforcing Bars in Concrete. *Hindawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2012, Article ID 328570, 12 pages (2012)
- [4] Juhász K.P.: Fibre reinforced concrete calculations in ultimate and serviceability limit state. In: *Innovative Materials and Technologies for Concrete Structures: CCC2011*. (2011) pp. 277-280, paper 55. ISBN: 978-963-313-036-0.
- [5] Lin, Z., Kanda, T., and Li, V. C.: On interface characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites. *Concrete Science and Engineering*, Vol. 1, pp 173-174 (1999)
- [6] Macanovskis, A., Lusiš V. és Krasnikovs A.: Polymer fiber pull out experimental investigation. In: *4th International Conference CIVIL ENGINEERING`13*. (2013) pp. 104-111, ISSN 2255-8861.
- [7] Tóth M.: A száloktélok hatása a beton duktilitására. *BME TDK Konferencia*, (2015)
- [8] Vandewalle, L., et al.: RILEM TC 162-TDF : Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, Vol. 33 (2002), January-February, 3-5.
- [9] Wang, Y., Li, V. C., and Backer, S.: Modelling of fibre pull-out from a cement matrix. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Volume 10, Number 3 (1988)
- [10] [http://fiberguru.hu/letoltesek/BC54_Teljesitmenynyilatkozat_\(HUN\).pdf](http://fiberguru.hu/letoltesek/BC54_Teljesitmenynyilatkozat_(HUN).pdf)

12. Mellékletek

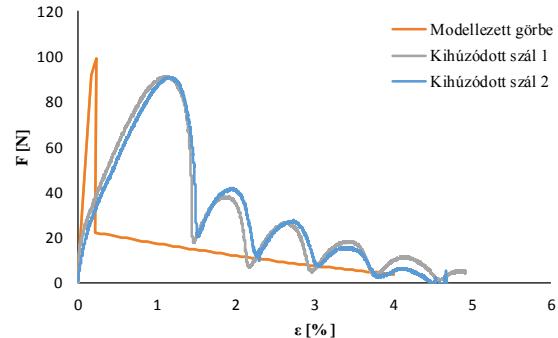
1. Egyenes szál modellezése

δ [mm]	P[N]	δ/Le	terület		megnyúlás			Adatok:	
0	0	0	0		0				
0,1	91,64145	0,169214	9,164145		0,153822			Le	15 mm
0,2	98,98408	0,244098	9,898408		0,166146			df	0,779 mm
0,3	22,01686	0,224637	2,201686		0,036956	0,1		Ef	10000 MPa
0,4	21,58925	0,290825	2,158925		0,036238	0,04		Gd	0,3 Nm
0,5	21,1654	0,357018	2,11654		0,035526			τ_0	0,6 Mpa
0,6	20,74532	0,423214	2,074532		0,034821			δ_0	0,297946053 mm
0,7	20,32901	0,489415	2,032901		0,034123			π	3,14159
0,8	19,91647	0,55562	1,991647		0,033343			β	-0,1
0,9	19,5077	0,621829	1,95077		0,032744				
1	19,1027	0,688043	1,91027		0,032064			keresztmetszet:	
1,1	18,70147	0,75426	1,870147		0,031391		szálméret 1,19mm	0,40mm	0,476
1,2	18,30401	0,820482	1,830401		0,030724				
1,3	17,91032	0,886709	1,791032		0,030063				
1,4	17,5204	0,952939	1,75204		0,029408				
1,5	17,13426	1,019173	1,713426		0,02876				
1,6	16,75188	1,085412	1,675188		0,028118				
1,7	16,37327	1,151655	1,637327		0,027483				
1,8	15,99843	1,217902	1,599843	görbe alatti terület	0,026854				
1,9	15,62736	1,284154	1,562736	65,38524316	0,026231				
2	15,26006	1,35041	1,526006		0,025614				
2,1	14,89653	1,416669	1,489653		0,025004				
2,2	14,53677	1,482933	1,453677		0,0244				
2,3	14,18077	1,549202	1,418077		0,023803				
2,4	13,82855	1,615474	1,382855		0,023211				
2,5	13,4801	1,681751	1,34801		0,022627				
2,6	13,13542	1,748032	1,313542		0,022048				
2,7	12,79451	1,814317	1,279451		0,021476				
2,8	12,45737	1,880607	1,245737		0,02091				
2,9	12,124	1,9469	1,2124		0,02035				
3	11,7944	2,013198	1,17944		0,019797				
3,1	11,46857	2,0795	1,146857		0,01925				
3,2	11,14651	2,145806	1,114651		0,01871				
3,3	10,82822	2,212117	1,082822		0,018175				
3,4	10,51369	2,278432	1,051369		0,017647				
3,5	10,20294	2,344751	1,020294		0,017126				
3,6	9,895962	2,411074	0,989596		0,016611				
3,7	9,59275	2,477401	0,959275		0,016102				
3,8	9,293308	2,543733	0,929331		0,015599				
3,9	8,997636	2,610068	0,899764		0,015103				
4	8,705734	2,676408	0,870573		0,014613				
4,1	8,417602	2,742753	0,84176		0,014129				
4,2	8,13324	2,809101	0,813324		0,013652				
4,3	7,852648	2,875454	0,785265		0,013181				
4,4	7,575826	2,941811	0,757583		0,012716				
4,5	7,302773	3,008172	0,730277		0,012258				
4,6	7,033491	3,074537	0,703349		0,011806				
4,7	6,767978	3,140907	0,676798		0,01136				
4,8	6,506235	3,207281	0,650624		0,010921				
4,9	6,248263	3,273659	0,624826		0,010488				
5	5,99406	3,340041	0,599406		0,010061				
5,1	5,743627	3,406427	0,574363		0,009641				
5,2	5,496964	3,472818	0,549696		0,009227				
5,3	5,254071	3,539213	0,525407		0,008819				
5,4	5,014947	3,605612	0,501495		0,008418				
5,5	4,779594	3,672015	0,477959		0,008023				
5,6	4,548011	3,738423	0,454801		0,007634				
5,7	4,320197	3,804834	0,43202		0,007252				
5,8	4,096154	3,87125	0,409615		0,006875				
5,9	3,87588	3,93767	0,387588		0,006506				
6	3,659376	4,004095	-21,9563		0,006142				

$$\delta_0 = 2 * \tau_0 * \frac{Le^2}{Ef * df} + \sqrt{(8 * Gd * \frac{Le^2}{Ef * df})}$$

$$P = \sqrt{\pi^2 * \tau_0 * Ef * df^3 * \frac{\delta}{2} + \pi^2 * Gd * Ef * \frac{df^3}{2}}; 0 \leq \delta \leq \delta_0$$

$$P = \pi * d_f * \tau_0 * \left(1 + \frac{\beta(\delta - \delta_0)}{d_f}\right) (L_e - \delta + \delta_0); \delta_0 < \delta < L_e$$



2. Ferde szál modellezése

δ [mm]	P[N]	δ/Le	terület		megnyúlás				Adatok:		
0	0	0	0		0						
0,1	98,98408	0,377811	9,898408		0,126687				Le	15 mm	
0,2	112,2374	0,576673	11,22374		0,146004				df	0,779 mm	
0,3	124,0831	0,773362	12,40831		0,164017	0,1			Ef	10000 MPa	
0,4	43,09467	0,763113	4,309467		0,057868	0,04			Gd	0,3 Nm	
0,5	41,68772	0,928089	4,168772		0,056853				τ_0	1,2 Mpa	
0,6	40,29586	1,093001	4,029586		0,055801				δ_0	0,332605874 mm	
0,7	38,91907	1,257851	3,891907		0,054711				π	3,14159	
0,8	37,55737	1,422641	3,755737		0,053585				β	-0,2	
0,9	36,21074	1,587372	3,621074		0,052423						
1	34,87919	1,752045	3,487919		0,051227				keresztmetszet:		
1,1	33,56272	1,916663	3,356272		0,049998		szálméret 1,19mm	0,40mm		0,476	
1,2	32,26133	2,081227	3,226133		0,048736						
1,3	30,97503	2,245738	3,097503		0,047443						
1,4	29,7038	2,410198	2,97038		0,046119						
1,5	28,44765	2,574609	2,844765		0,044765						
1,6	27,20658	2,738972	2,720658		0,043383						
1,7	25,98059	2,903289	2,598059		0,041974						
1,8	24,76968	3,067561	2,476968	görbe alatti terület	0,040537						
1,9	23,57385	3,231791	2,357385	174,8216349	0,039074						
2	22,3931	3,395979	2,23931		0,037587						
2,1	21,22742	3,560127	2,122742		0,036076						
2,2	20,07683	3,724236	2,007683		0,034542						
2,3	18,94132	3,888309	1,894132		0,032986						
2,4	17,82089	4,052347	1,782089		0,031408						
2,5	16,71553	4,216351	1,671553		0,029811						
2,6	15,62526	4,380324	1,562526		0,028194						
2,7	14,55007	4,544266	1,455007		0,026559						
2,8	13,48995	4,708179	1,348995		0,024907						
2,9	12,44492	4,872065	1,244492		0,023239						
3	11,41496	5,035925	1,141496		0,021555						
3,1	10,40009	5,199762	1,040009		0,019857						
3,2	9,400294	5,363576	0,940029		0,018145						
3,3	8,415578	5,527369	0,841558		0,016421						
3,4	7,445941	5,691142	0,744594		0,014685						
3,5	6,491385	5,854898	0,649138		0,012939						
3,6	5,551908	6,018638	0,555191		0,011183						
3,7	4,62751	6,182363	0,462751		0,009418						
3,8	3,718192	6,346075	0,371819		0,007645						
3,9	2,823954	6,509776	0,282395		0,005866						
4	1,944796	6,673467	0,19448		0,00408						
4,1	1,080717	6,83715	0,108072		0,00229						
4,2	0,231718	7,000827	0,023172		0,000496						
4,3	-0,6022	7,164498	-0,06022		-0,0013						
4,4	-1,42104	7,328165	-0,1421		-0,0031						
4,5	-2,2248	7,491831	-0,22248		-0,0049						
4,6	-3,01348	7,655497	-0,30135		-0,0067						
4,7	-3,78708	7,819163	-0,37871		-0,0085						
4,8	-4,54561	7,982833	-0,45456		-0,0103						
4,9	-5,28905	8,146507	-0,5289		-0,0121						
5	-6,01741	8,310187	-0,60174		-0,01389						
5,1	-6,73069	8,473874	-0,67307		-0,01568						
5,2	-7,4289	8,637571	-0,74289		-0,01746						
5,3	-8,11202	8,801279	-0,8112		-0,01923						
5,4	-8,78006	8,964998	-0,87801		-0,021						
5,5	-9,43303	9,128732	-0,9433		-0,02276						
5,6	-10,0709	9,292482	-1,00709		-0,02451						
5,7	-10,6937	9,456248	-1,06937		-0,02625						
5,8	-11,3014	9,620033	-1,13014		-0,02798						
5,9	-11,8941	9,783838	-1,18941		-0,0297						
6	-12,4717	9,947665	-1,24717		-0,0314						

$$\delta_0 = 2 * \tau * \frac{Le^2}{Ef * df} + \sqrt{(8 * Gd * \frac{Le^2}{Ef * df})}$$

$$P = \sqrt{\pi^2 * \tau_0 * Ef * df^3 * \frac{\delta}{2} + \pi^2 * Gd * Ef * \frac{df^3}{2}}; 0 \leq \delta \leq \delta_0$$

$$P = \pi * d_f * \tau_0 * \left(1 + \frac{\beta(\delta - \delta_0)}{d_f}\right) (L_s - \delta + \delta_0); \delta_0 < \delta < L_s$$

