

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Tudományos Diákköri Konferencia 2016.

Szintetikus szálak hosszúságának hatása a szálerősítésű betonokban

Szerző: **Kis Vivien**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építészmérnöki Kar

építész (osztatlan) képzés, szerkezeti szakirány

Konzulens: **Juhász Károly Péter**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építészmérnöki Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

tanársegéd, laborvezető

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	2
2.	Problémafelvetés	3
3.	Szálerősítésű betonok	4
4.	Laborkísérletek	7
5.	Kiértékelés	11
5.1.	Szálak elhelyezkedése, mennyisége a keresztmetszetben	11
5.2.	A zsaluzat hatása a szálak irányára.....	13
5.3.	A szálhossz hatása a törési munkára.....	17
6.	Konklúzió	21
7.	Összefoglalás	22
8.	Továbbfejlesztési lehetőségek	23
9.	Köszönetnyilvánítás	23
10.	Irodalomjegyzék	24
11.	Mellékletek	25

1. Bevezetés

A szálerősítésű betonok tömeges alkalmazása az 1990-es években kezdődött. A szálerősítés kezdetben acélszál volt, de a polimer technológia fejlődésének köszönhetően elkezdtek szintetikus szálakat is alkalmazni a betonban. A műanyag szálerősítéseknél az acélszálból nyert tapasztalatokat használták fel a beton szívósságának növelésére [6]. A szintetikus szálakkal erősített betonokat számos előnyös tulajdonságuk miatt egyre szélesebb körben alkalmazzák különféle építészeti feladatokban.

A szálerősítésű betonokat többek között 3 vagy 4 pontos hajlított gerendateszttel lehet vizsgálni. A gerendatesztek problémája a teszteredmények nagy szórása. A nagy szórás miatt nehezen lehet definiálni az anyagjellemzőket. A gerenda kis keresztmetszete (referencia felület), a szálak inhomogén eloszlása, a repedések kialakulásának véletlenszerűsége lehetnek okai a teszteredmények nagy szórásának. Ez a kijelentés igaz mind az acél, mind a szintetikus szálakra [6].

Kísérletünkben szintetikus makroszálakkal foglalkozunk. A szintetikus szálak alacsony rugalmassági modulussal (9-12 GPa) rendelkező viszko-elasztikus anyagok, azonban a speciális kialakításuknak köszönhetően teljesítményükben mégis képesek felvenni a versenyt a magasabb rugalmassági modulusú (210 GPa) acélszálakkal [5]. A makroszálak különböző méretekben kaphatóak, jelenlegi kutatásunk során ugyanabból az anyagból készült 30 és 70 mm közötti hosszúságú szálakat vizsgálunk. Felmerül a kérdés, hogy azonos anyagú szálakból a rövidebbet vagy a hosszabbat érdemes használni, melyik növeli nagyobb mértékben a beton duktilitását? Ennek kapcsán végeztünk hajlított gerendatesztekkel, melyeket kiértékelve megkaphatjuk a kérdésre a választ.

A kísérlet során vizsgáltuk a friss beton konzisztenciáját, majd az eltört gerendákban a szálak elhelyezkedését. Az elhelyezkedés vizsgálatával pontosítottuk a kiértékelést, majd ebből vontunk le következtetéseket. Az elkeveredést egyszerű matematikai modellel is szemléltettük.

A laboratóriumi vizsgálatokból és az elkeveredés vizsgálatával egy ideális szálhosszúságot határoztunk meg, amelynél mind a szálak elkeveredése, mind a duktilitás növekedése optimálisnak mondható.

2. Problémafelvetés

A szintetikus szálerősítésű betonokhoz a gyártók különböző hosszúságú szálakat gyártanak. Kísérletünkben szintetikus makroszálakat vizsgálunk, melyeket a statikai méretezés során figyelembe lehet venni, ezek a keresztmetszet repedése után is képesek feszültség felvételére (maradó feszültség - residual strength), növelve így a beton duktilitását.

Ennek kapcsán több kérdés is megfogalmazódott. Szerettük volna tudni, hogy a szálak hossza hatással van-e a beton duktilitására és ha igen, milyen mértékben? Érdemes növelni a szálak hosszát? A szálhossz növelésével a duktilitás is növekszik? A duktilitás mellett azt is meg kell vizsgálni, hogy a különböző hosszúságú szálak mennyire egyenletesen keverednek el. A szálak homogén elkeveredése függ a szálhossztól, vagy teljesen független? Van-e olyan érték, amire már azt lehet mondani, hogy túl nehezen keveredik el a betonban, problémás az elkeverése?

Korábbi kutatások eredményei és a gyakorlat bebizonyították, hogy az elkeverésnél szál-labdák alakulhatnak ki, azaz egy csomóba állnak össze a szálak. Keverés közben legfontosabb célunk, hogy elkerüljük a szálak egymásba kapaszkodását, mert a kialakuló labdaszerű képződménybe további szálak kapaszkodnak, nem esnek szét, hanem fokozatosan növekszik a csomó. Ezeket a szál-labdákat ki kell venni, mert rontják a beton bedolgozhatóságát, kivételükkel azonban csökken a szálmennyiség, így a szálerősítésű beton duktilitása is [7] [2]. A hosszabb szálak esetében gyakoribb jelenség a szál-labdák kialakulása, így sejthető, hogy a szálak hosszúságának növelése nem arányos a végtelenig a duktilitás növekedésével. A kutatás célja egy olyan szálhossz megtalálása, amely minden szempontból optimálisnak mondható: könnyen és egyenletesen elkeveredik, ugyanakkor magas a duktilitása. Az optimális szálhossz meghatározása száltípusonként különböző, jelen dolgozat a kutatás módszerét kívánja bemutatni az adott szál vizsgálatával. Az ideális szálhossz megtalálásával olyan szálak gyárthatóak, melyekkel a szálak hatékonysága és kihasználtsága maximális - betontechnológiai problémák jelentkezése nélkül. Tágabb értelemben ez optimálisabb szerkezetek tervezéséhez vezet a kivitelezési idő csökkenése mellett.

A zsaluzat is hatással lehet a szálak elhelyezkedésére: általában a széleken és a sarkokon több szál helyezkedik el, mint a keresztmetszet közepén. A szálak a keresztmetszet közepén térben bárhogy állhatnak, de a szélek közelében a zsaluzat jelentősen befolyásolja irányultságukat. Kutatásomban ezeket az állításokat kvalitatív módon szemléltetem egyszerű matematikai modellel.

3. Szálerősítésű betonok

A szálerősítésű betonok a szerkezeti anyagok csoportján belül a kompozitok osztályába tartoznak, azon belül pedig a rövid szálak kompozitok közé, ahol a szálak a szerkezet vagy a keresztmetszet méreteihez képest relatív rövidek, véletlen és homogén eloszlásúak és különféle anyagúak lehetnek [9].

A műanyag szálak egy extrudált, irányított és vágott anyag egyenes vagy deformált darabjai, amelyek alkalmasak a betonban vagy habarcsban való homogén elkeveredésre [3]. A legelterjedtebb szintetikus szálak hosszuk mentén azonosak, hullámosak vagy felületen barázdáltak, lehorgonyzásukat a betonmátrixba ez a kialakítás segíti [6]. A szintetikus szálak között megkülönböztetünk mikro- és makroszálakat. A mikroszálak statikai szerepe elhanyagolható, feladatuk a frissbeton szilárdulási folyamatán belül bekövetkező mikrorepedések meggátlása. A makroszálaknak van statikai hatásuk a szerkezetre, szerepük a beton megszilárdulása után keresendő. A makroszálak a betont duktilisabbá teszik, meggátolják a repedéseket, növelik a beton globális teherbírását, ezzel a berepedt betonozóna is figyelembe vehető húzásra [5].

A szálerősítésű betonok a normál betonokhoz képest számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek: friss állapotukban állékonyabbak, zsugorodási repedésérzékenységük kisebb, gőzölés nélkül is korán kiszaluzhatók, hajlító-húzószilárdságuk, ütőszilárdságuk, dinamikai ellenállásuk, kopásállóságuk nagyobb, vízzáróságuk, korrózióállóságuk jobb, a hálósan vasalt betonnál könnyebben kivitelezhetők, a szálerősítésű lőttbetonok visszahullása az átlagosnál kisebb. E kedvező tulajdonságuk teszik a szálerősítésű betont alkalmassá arra, hogy belőle vékony falú és egyéb monolit vagy előregyártott szerkezetek és elemek készüljenek [8].

A szálerősítések történelmének kezdete az ókorra tehető, amikor állati- vagy növényi szálakat használtak a vályog megerősítésére. A különböző anyagú szálakat a beton valamely tulajdonságának javítása miatt kezdték el használni, pl. törőszilárdság, szívósság, duktilitás, repedésáthidaló képesség. A szálerősítésű betonok közül először az acélszálerősítések terjedtek el. A szabadalmat A. Berard adta be 1874-ben, Kaliforniában szabálytalan acélhulladékkal erősített beton néven. Ezt követte különböző acélszálak megjelenése. A hazai gyakorlatba való bevezetés Polgár László nevéhez fűződik. Az első szintetikus szálakat 1982-ben, Amerikában a Propex nevű cég vezette be Fibermesh néven. A szálak hossza 12,7 mm volt (1/2 inch), azonban még nem töltötték be statikai szerepet, csak a mikrorepedések kialakulásának meggátlásában nyújtottak segítséget. Az 1980-as és 90-es években a textilipar fejlődésével nagy

szilárdságú szintetikus anyagokat hoztak létre, így a megfelelő mértékben kevert makroszálak felvették a versenyt az acélszálakkal. Nehéz megmondani, hogy melyik cég fejlesztette ki ezeket a szálakat, többen a kezdetektől jelen vannak a piacon. Hazai forgalomban először a High Grade fibrillált mikroszál jelent meg, makroszálak közül a Proper Endero HPP és az Elastoplastic Concrete (EPC) Barchip 48 típusú termékekkel lehetett először találkozni[6].

A szálerősítésű betonokat először ipari padlóknak alkalmazták, azonban mára már egyre szélesebb körben terjed el: villamospálya lemezekben, tartószerkezeti elemekben is használják a vasalás kiegészítésére, csökkentésére vagy elhagyására. Magyarországon EPC Barchip 48 típusú szállal készültek 2013-ban a budapesti 69-es villamsvonalon az útjáró lemezek (1. ábra), valamint a debreceni stadion tribünelemei is (2. ábra) [6] [13].



1. ábra: Budapest, 69-es villamospálya [13]



2. ábra: Debrecen, Stadion tribünelemei [13]

A polimer szálak előnyei közé sorolható a teljes korróziómentesség illetve az egyszerű bedolgozhatóság. Az acél szálak mindenképp hátrányban vannak az előbb említett két szempontból, könnyen korrodálnak, a szálak betontakarása nem biztosítható és a legkisebb repedés hatására is fellép a rozsdásodás. A acélszálak megrongálják a keverőgép belső felületét is. A szintetikus szálak előállítása kevesebb környezetszennyezéssel és szén-dioxid kibocsátással jár. Szállításnál a szintetikus szálak tömege mintegy hatoda-nyolcada az ugyanazon teljesítőképesség eléréséhez szükséges acélszálaknak. Az acél szálakból leginkább a kampózott szálerősítés az elterjedt, ez adja a szálak lehorgonyzását. A kampók miatt a szálak keverés, vibrálás során könnyen egymásba kapaszkodhatnak, emiatt úgynevezett szál-labdák alakulhatnak ki. A szintetikus szálakra ez kevésbé jellemző az acéllal szemben. A szálak anyagi tulajdonságai több dologban is hátrányt mutatnak az acélszálakkal szemben: viszkoelasztikusak, alacsony olvadásponttal és alacsony rugalmassági modulussal rendelkeznek. A szálerősítésű betonokat azonban kompozitként kell vizsgálni, ahol a szintetikus szálerősítés már felveszi a versenyt az acél szálerősítéssel. Az egyik legjobb példa erre a kúszás vizsgálata. A Richtlinie Faserbeton osztrák irányelvben [10] előírt kutatás alapján készült vizsgálat eredményei szerint 1000 nap után a szintetikus szálerősítésű beton relatív kúszása kisebb, mint az acél szálerősítésű betoné [1].

4. Laborkísérletek

A különböző hosszúságú szálakat elkeveredését és duktilitását laboratóriumban vizsgáltuk. Kísérletünkben ötféle szálhosszúságot használtunk: 30, 40, 48, 55 és 70 mm. Az egyes szálhosszúságokkal 7 db gerendát készítettünk (1. táblázat).

1. táblázat: Kutatási mátrix

Jel	Beton szilárdsági osztály	Száltípus	Száladagolás (kg/m ³)	Száladagolás (db/kg)
DUR30 1-7	C30/37	Barchip	4,00	93.240
DUR40 1-7	C30/37	Barchip	4,00	69.930
DUR48 1-7	C30/37	Barchip	4,00	58.275
DUR55 1-7	C30/37	Barchip	4,00	50.858
DUR70 1-7	C30/37	Barchip	4,00	39.960

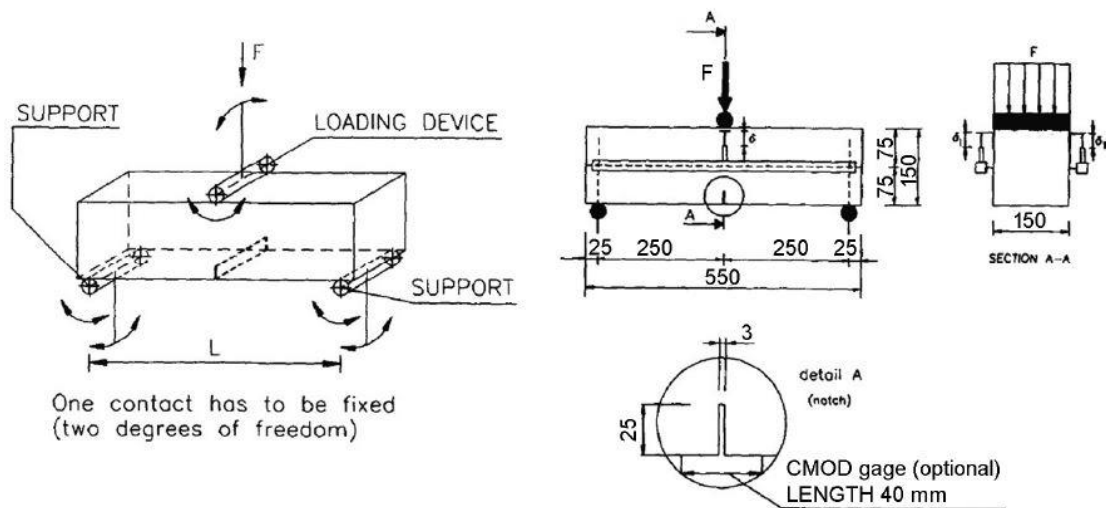
A gerendák 150x150 mm keresztmetszetűek és 550 mm hosszúak, C30/37 szilárdsági osztályú betonból készültek. Minden betongerendához 4 kg/m³ szintetikus makroszál adagoltunk, így az egyes szálhosszúságokhoz tartozó gerendákban a szálak súlya azonos volt, viszont a darabszámuk különbözött. A beton víz/cement tényezője 0,4 volt. A keverést Collomatic XM2 típusú kényszerkeverő gép segítségével végeztük. A kényszerkeverő jól szemlélteti az ipari körülményeket és biztosítja a beton tökéletes elkeveredését. Egy keverés során 2 darab gerendára elegendő betont tudunk előállítani. Először magát a betont állítottuk elő, amelyhez nagyjából 1 perc keverés volt szükséges, majd hozzáadtuk a szintetikus szálakat és további 1 percig kevertük. A keverés nem volt hatással a szálak állapotára, ugyanakkor a szálak homogénebben keveredtek el a betonmátrixban. A zsaluzatot formaelválasztóval bekent acél sablonok biztosították, így a keverés után ezekbe öntöttük bele az elkészült szálerősítésű betont. A gerendák három oldalukon érintkeztek zsaluzattal, a tetejüket simítással egyengettük el. Az anyagot ezután rázóasztalon tömörítettük, amíg a légbuborékok megjelenése a frissbeton felületén abbamaradt, ez körülbelül 15 másodpercig tartott. A beton ezáltal tömör lett és nem kellett tartani az összetevők szétosztályozódásától. A gerendákat 15 napos korukig levegőn szárítottuk 22 °C hőmérsékletű és 65% relatív páratartalommal rendelkező helyiségben.

2. táblázat: A beton összetevői

Összetevő neve	Összetevő típusa	Adagolás
cement	CEM I 42,5 R	400 kg/m ³
víz		160 kg/m ³
homok	0/4	735 kg/m ³
kavics	4/8	294 kg/m ³
kavics	8/16	808 kg/m ³
folyósító	Mapei Dynamon NRG 1012	3,2 kg/m ³
szálak	Barchip 30,40,48,55,70 mm	4 kg/m ³

A gerendákat hárompontos (középpontos) hajlítási vizsgálattal teszteltük. A vizsgálatot a RILEM TC 162-TDF [12] irányelvben meghatározott ajánlások szerint végeztük el (3. ábra). 15 nap után következett a gerendák bevágása a hajlítási teszthez. A gerendák középső keresztmetszetét (150x150 mm) 25 mm mély és 2 mm széles bevágással gyengítettük az oldalsó, zsaluzott keresztmetszeten. Ezáltal biztosítva lett, hogy a gerendák felülete a felfekvésnél és a terhelésnél is zsaluzott legyen. Minden bevágáshoz 2 darab acélkést ragasztottunk be. Az acélkések közé útdadó került elhelyezésre, ennek segítségével az anyagvizsgáló gép folyamatosan mérte az egyes erőhatásokhoz tartozó repedésmegnyílás értékeket, azaz a kések közötti távolságot. A bevágásokra azért volt szükség, hogy a hajlítás során megjelenő repedések irányítottak legyenek, azaz a repedés ott jelenjen meg, ahol mérjük. Ha a gerendát nem vágjuk be, a repedés bárhol elindulhat. Ez a hely nem ismert, így nem tudtuk volna, hova kell ragasztani az acélkéseket, így a repedésmegnyílást sem tudtuk volna mérni.

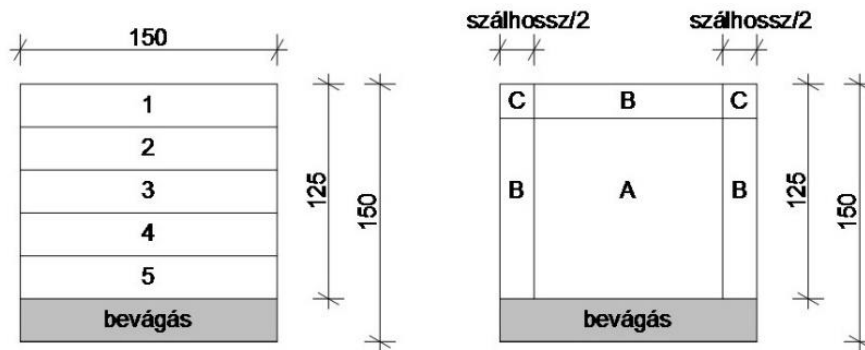
Az 500 mm támaszközü gerendát elmozdulásvezérelt módon 0,2 mm/perc sebességgel terheltük, eközben mértük az erőt és a repedésmegnyílást (CMOD = Crack Mouth Opening Displacement). A kísérletet a repedésmegnyílás 4 mm-es értékéig folytattuk. A CMOD mérésekor a repedést közvetlenül mérjük. Középponti lehajlás mérésekor abból következtetünk a repedésmegnyílásra, feltételezve, hogy a gerenda többi része nem deformálódik. A CMOD mérése ezek alapján pontosabb eredményt ad. A kapott eredményekből előállítható az erő-repedésmegnyílás diagram, amelyből meghatározható a beton és a hozzáadott szálak együttes törési munkája.



3. ábra: A RILEM TC 162-TDF irányelvben ajánlott hajlítási vizsgálat

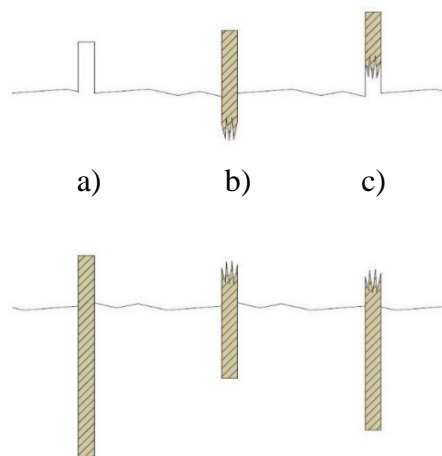
A gerendák és a kísérletsorozat a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszékének Czakó Adolf Laboratóriumában készültek. A terhelő berendezés ZWICK/ROELL Z150 típusú univerzális anyagvizsgáló gép volt.

A gerendákat a hajlítási teszt után ugyanezzel a géppel nagyobb sebességgel kettétörtük, így meg lehetett vizsgálni a középső keresztmetszeten a szálak elhelyezkedését és mennyiségét. A félbetörés folyamán semmilyen adatot nem mértünk. A nagy alakváltozás miatt a szálak kihúzódtak, elszakadtak, vagy beleszakadtak a betonba (5. ábra). Az eltört keresztmetszeteket először 5x25 mm-es sávokra osztottam és megszámláltam a kihúzódtott és a szakadt szálakat. Az utolsó (hatodik) 25 mm-es sáv az volt, ahol a gerendát a hajlítási teszt miatt bevágtuk, itt nem lehetett szálakat számolni. Ezután attól függően osztottam fel a gerendákat, hogy milyen hosszúságú szálakat adagoltam a betonhoz. A keresztmetszet szélétől húztam párhuzamost, a távolság a szálhosszúság fele volt (4. ábra). Ezzel a módszerrel meg tudtam határozni, hogy hány darab szál helyezkedik el a széleken, a sarkokon, valamint a keresztmetszet közepén. A keresztmetszet közepén lévő szálakat úgy számláltam ki, hogy összegeztem a vízszintes sávonként meghatározott szálakat, majd ebből vontam ki a sarkokon és széleken megszámlált szálakat. A szakadt szálakat fél szálként vettem figyelembe, mert minden szakadt szálnak van egy szakadt párja a kettétört gerenda másik felén.



4. ábra: Az eltört keresztmetszet felosztása a szálak megszámlálásához

A számolás során több nehézség is felmerült. Volt olyan hely, ahol a szálak összecsomósodtak, ilyenkor ki kellett bogozni őket és figyelmesen megszámlálni. Az eltört keresztmetszet nem volt teljesen sík, így a felosztások, amelyek filctollal lettek behúzva, nem milliméter pontosak, valamint volt olyan szál, amely éppen a vastag filctoll vonalán helyezkedett el. A kiálló kavicsdarabkák is nehezítették a helyzetet. Az egyes sávokba tartozó szálakat ezen okok miatt nem lehetett teljesen pontosan megszámlálni. A pontatlanságot az is erősítette, hogy nem minden szál szenvedett ugyanolyan tönkremenetelt: volt olyan, ami kihúzódott, elszakadt, vagy beleszakadt (5. ábra). A kihúzódott szálak az eltört gerenda egyik oldalán tapadnak bele a betonba, a másik oldalról kihúzódnak. A szakadt szálak lehorgonyzása mindkét oldalon megtörténik, a tapadás annyira erős, hogy a gerenda kettétörésénél a szálak nem húzódnak ki, hanem szétszakadnak. Elvileg minden elszakadt szálnak kell lennie egy párja a gerenda másik felén, gyakorlatilag nem mindig találtam meg a párját, ezek valószínűleg beleszakadtak a betonba. A beleszakadt szálak esetén is mindkét oldalon megtörténik a lehorgonyzás. Az eredményeket és a kiértékelést emiatt közelítőnek lehet mondani.



5. ábra: Kihúzódott (a), elszakadt (b) és beleszakadt (c) szálak értelmezése

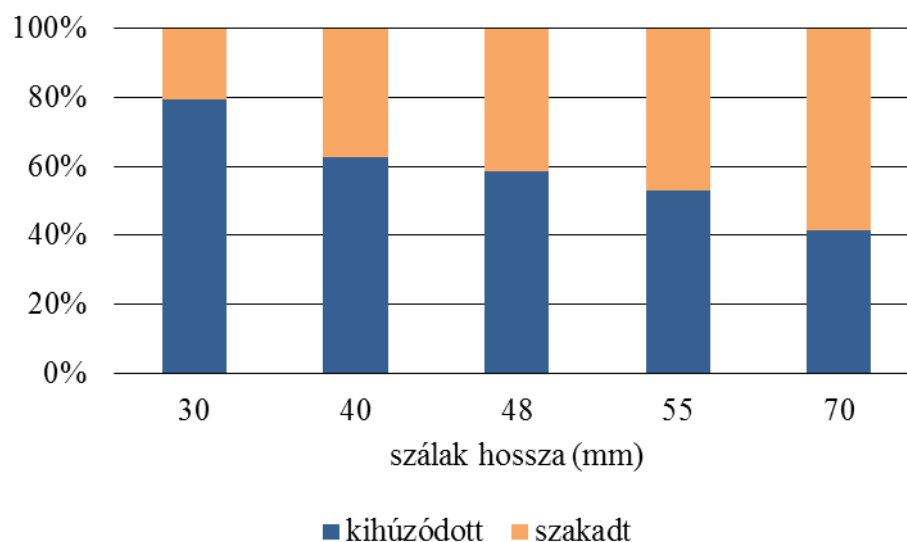
5. Kiértékelés

5.1. Szálak elhelyezkedése, mennyisége a keresztmetszetben

A szálak megszámlálása közben több dologra is figyelmes lettem, mely eredményeket közlök, illetve magyarázatot próbálok adni rá az alábbiakban.

Minden szálhosszúsághoz 7-7 darab gerendát gyártottunk (1. táblázat). A gerendák eltört keresztmetszetén átmenő szálak darabszáma között nagy a szórás, ezért fontos volt, hogy minden egyes gerendán megszámláljuk a szálakat.

Korábbi kutatások több helyen is említik, hogy a szintetikus szálak leggyakoribb tönkremenetele a szakadás [7]. A vizsgálat során számomra az derült ki, hogy a rövidebb szálak nagymértékben kihúzódnak a félbetört gerendákat vizsgálva, azaz nagy repedéstágasságnál, azonban a szálhosszak növekedésével a szakadt szálak száma is növekedett. Az 55 mm-es szálhosszúságnál már majdnem 50%-50% a kihúzódt-szakadt szálak aránya, míg nem a leghosszabb 70 mm-es szálnál megfordul, és a szakadt szálak lesznek többségben (6. ábra). Fontos megjegyezni, hogy ez a tönkremenetel már a gerenda félbetörésénél következett be, azaz nagy repedéstágasságnál, a vizsgált 4 mm-es repedésnél a szálak szakadását egyik gerendánál sem tapasztaltuk.



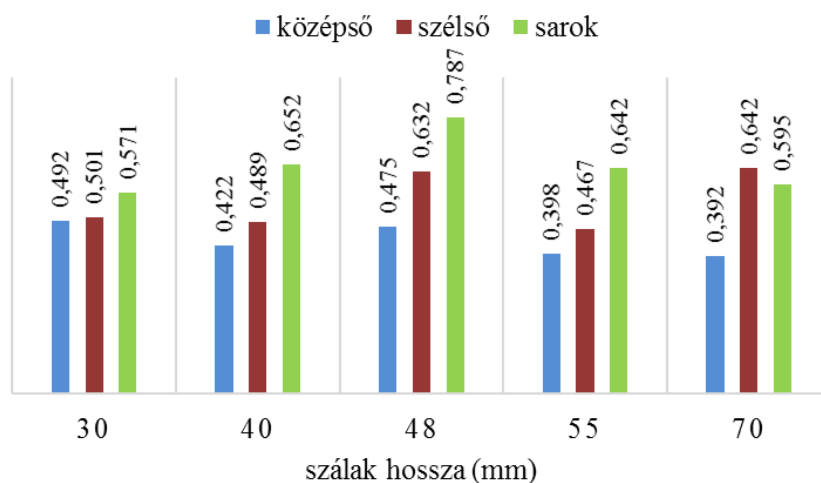
6. ábra: Kihúzódt és szakadt szálak aránya (%)

A jelenség azzal magyarázható, hogy a hosszabb szálak jobban lehorgonyzódnak a betonmátrixban, így a tönkremenetel nem a kihúzódt, hanem a szakadás lesz. Minél hosszabb ez a szál, annál inkább érvényes ez a kijelentés. A rövid szálak nem képesek ennyire beletapadni

a betonba, így ezek könnyebben kihúzódnak a keresztmetszet valamelyik oldalából. Feltételezhető, hogy a rövid szálaknál akkor történik meg a szakadás, ha a szálak a gerenda két oldalán körülbelül azonos hosszúságban horgonyzódnak le. Ezt úgy lehet elképzelni, hogy a törési keresztmetszet éppen az adott szál középpontja, vagy nagyon közel van hozzá. Ha a törési keresztmetszet valamely irányba elmozdul, azaz a gerenda egyik felére a szál kisebb része jut, könnyebben kihúzódhat abból. Ez a feltételezés azonban nem csak az elhelyezkedéstől függ, sok tényező befolyásolhatja, mint például a beton szilárdsága, kora, adalékanyagok típusa, elkeveredése, elhelyezkedése a szálakhoz képest – jelen kutatásban ezeket nem vizsgáljuk.

A következő probléma, amire figyelmes lettem, az a szál-labdák kialakulása volt. A hosszabb (leginkább a 70 mm) szintetikus szálak esetében könnyebben alakultak ki csomók, úgynevezett szál-labdák, mint a rövidebb szálaknál. Ezek a számolást nagyon megnehezítették, szét kellett őket bontani és figyelmesen megszámolni a szálakat. Az összecsomósodásokban kihúzódtott és szakadt szálak egyaránt megtalálhatóak. A szál-labdákat a keverés során ki kell szedni, ezzel is csökken a beton duktilitása. Mi ezt a gerendáinkban nem tettük meg, így beleszámoltuk a kihúzódtott és szakadt szálakba az egy csomóba sűrűsödött szálakat is. A rövidebb szálakkal erősített keresztmetszetekben alig fordult elő ilyen.

Az eltört keresztmetszetben a szálak nem egyenletesen oszlottak el. Bebizonyosodott, hogy a zsálatnak hatása lehet a szálak elhelyezkedésére, hiszen a számolás során kiderült, hogy a széleken és a sarkokon több szál helyezkedik el, mint a keresztmetszet közepén. A legtöbb szál arányaiban a gerenda sarokmezőiben található, a legkevesebb pedig a gerenda közepén. Egyedül a 70 mm-es szálak képeznek kivételt, ezeknél kevesebb szál volt a sarkokon, mint a széleken (7. ábra). A széleket és a sarokmezőket a szintetikus szálak hosszai szerint állapítottam meg, minden szálhossz felét mértem fel a gerenda legfelső pontjától és így határoztam meg a szélek és a sarkok területét (4. ábra).

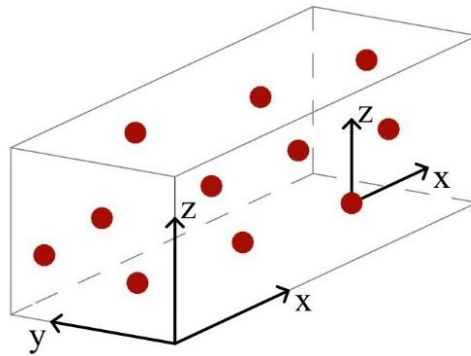


7. ábra: A szálak eloszlása az eltört keresztmetszeten (db/cm²)

5.2. A zsaluzat hatása a szálak irányára

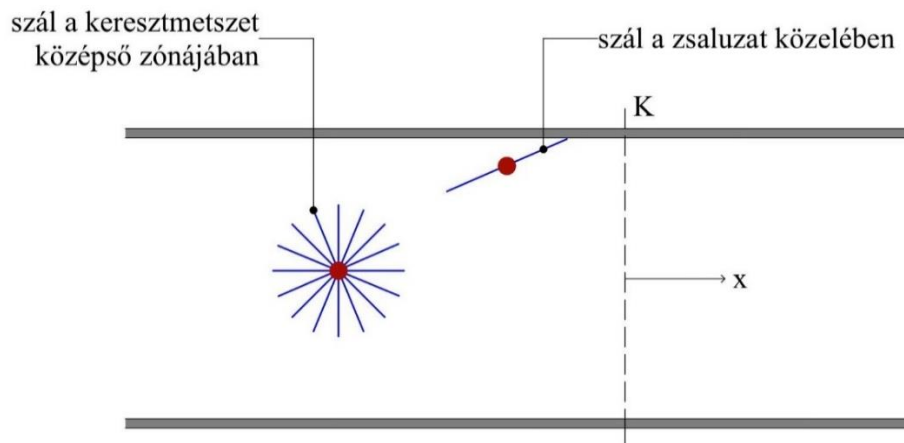
A zsaluzat hatását az előző pontban megszámolással mutattam be. Az alábbiakban ezt a hatást próbálom egyszerű matematikai modellel, kvalitatív módon bemutatni. A matematikai modell, amit használtam síkbeli. A gerendában a valóságban a szálak nem csak síkban állhatnak, hanem térben is bárhogyan orientálódhatnak. Ezek alapján a modell jellemezni tudja a valós állapotot, de számszerű tényeket nem tud közölni.

A vizsgálat most nem a gerenda keresztmetszetén (yz sík) történik, hanem az arra merőleges metszésekben (xz sík). A szálakat a szálhosszúságukkal, a középpontjukkal, valamint a vízszintes tengellyel bezárt szögükkel jellemezhetjük. A továbbiakban a szálak középpontjába felvesszünk egy lokális xz koordinátarendszert, amelynek az origója a szál súlypontjában van (8. ábra).



8. ábra: Koordináták felvétele

A zsaluzat hatásának vizsgálatakor a gerendában két zónát különböztetünk meg: a zsaluzat által befolyásolt zavart zónát, valamint a zsaluzat által nem befolyásolt középső zónát. A középső zónában a szálak bárhogyan állhatnak, bármilyen szögben elfordulhatnak, a zsaluzat nincs hatással az orientációra. A zavart zónákban a zsaluzat a távolságtól függően fogja befolyásolni a szálak irányultságát (9. ábra).



9. ábra: A szálak irányultsága a zsaluzat hatása alapján

Az első esetben (középső zóna) a zsaluzat távolsága nagyobb vagy egyenlő, mint a szál hosszának a fele ($t \geq l_f$) a szál középpontjától, a lokális koordináta-rendszerben $\alpha=0^\circ-90^\circ$ között foroghatnak a szálak. Minden irányhoz tartozik egy x tengelyre értelmezett vetületi hossz ($l_{f,x}$), amelyet egyszerű matematikai összefüggéssel lehet megkapni:

$$l_{f,x} = \cos \alpha \times l_f \quad (1)$$

ahol:

$l_{f,x}$ a félszál x tengelyre értelmezett vetületi hossza, mm

α a szál x tengellyel bezárt szöge, $^\circ$

l_f szálhossz, mm

A vetületi hosszakat kiszámolva meghatározhatunk egy átlag vetületi hosszt ($l_{f,x,m}$), amelynek ismeretében – tökéletes elkeveredést feltételezve – megkaphatjuk az egységnyi keresztmetszeten áthaladó szálak darabszámát Romualdi és Mandel levezetése alapján [11]:

$$n = \frac{2 l_{f,x,m} N}{V} \quad (2)$$

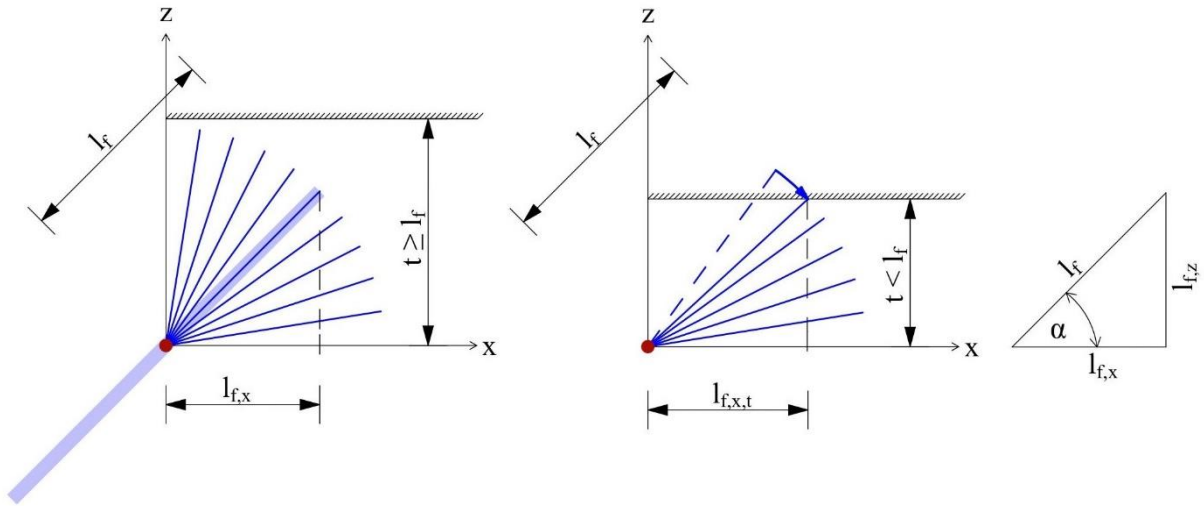
ahol:

n szálak darabszáma a keresztmetszeten, db/mm²

$l_{f,x,m}$ x irányú átlaghossza a félszálnak, mm

N szálak darabszáma a térfogatban, db

V térfogat, mm³



10. ábra: Vetületi szálhossz értelmezése a lokális koordináta-rendszeren a zsaluzat távolságának függvényében

Ha a zsaluhatás érvényesül, azaz a zsaluzat távolsága kisebb, mint a szál félhossza ($t < l_f$), akkor a kilógó szálakat a zsaluzat beforgatja, adott irányba helyezi. Ennek az iránynak az ismeretéhez szükségünk van az adott távolsághoz (t) tartozó legnagyobb x tengellyel bezárt szögre (α_{\max}). Így kialakul egy olyan vetületi hossz, amelynél a szál még éppen hozzáér a zsaluzathoz, tehát ez lesz azon szálak vetületi hossza, amiket a zsaluzat beforgat ($l_{f,x,t}$), a 10. ábra alapján.

$$l_{f,x,t} = \sqrt{l_f^2 - t^2} \quad (3)$$

ahol:

$l_{f,x,t}$ α_{\max} -hoz tartozó x tengelyre értelmezett vetületi hossza, mm

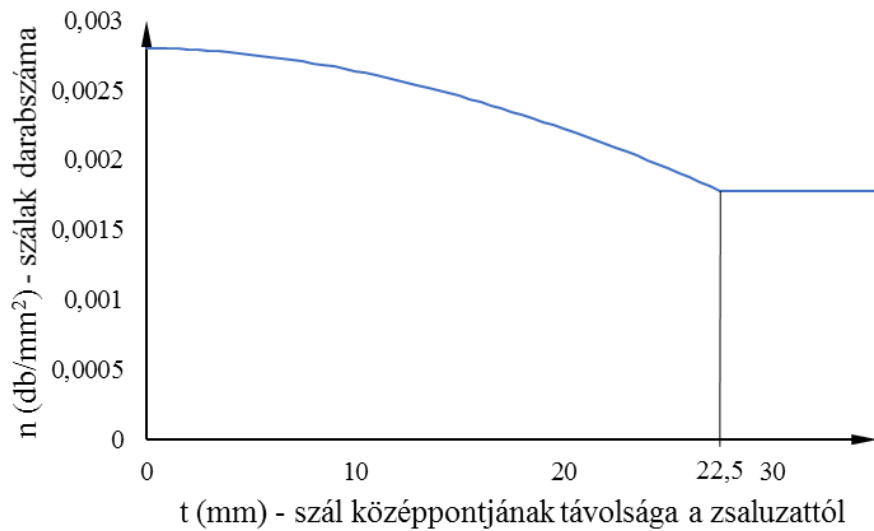
l_f a félszál hossza, mm

t a zsaluzat távolsága a félszál középpontjától.

Az α_{\max} -nál nagyobb szöget bezáró szálak vetületi hossza helyére ezek alapján egységesen az $l_{f,x,t}$ hosszát helyettesítünk, amikor az átlagos vetületi hosszát ($l_{f,x,m}$) számoljuk. Az ezúton megkapott értékkel a (2) képlet alapján meghatározható az egységnyi keresztmetszeten áthaladó szálak darabszáma abban az esetben, ha a zsaluhatás érvényesül. A darabszám annál nagyobb, minél közelebb kerül az adott szál középpontja a zsaluzathoz. Ez azt jelenti, hogy a zsaluzathoz közeledve a szálak darabszáma egységnyi keresztmetszeten fokozatosan nő tökéletes elkeveredést feltételezve. Ha a zsaluzat távolsága eléri a félszál hosszának értékét, a diagram beáll konstans értékbe, azaz ahol nem érvényesül a zsaluhatás, mindenhol ugyanannyi

szál halad át egységnyi keresztmetszeten (11. ábra). A gerendákhoz hozzáadott szálak mennyisége [kg/m^3] minden szálhosszúságnál azonos volt, csak a szálak darabszáma különbözött. Emiatt nem szükséges mind az öt szálhosszúságra elvégezni a vizsgálatot, mert a fent közölt képletek minden esetben ugyanazt a végeredményt adják.

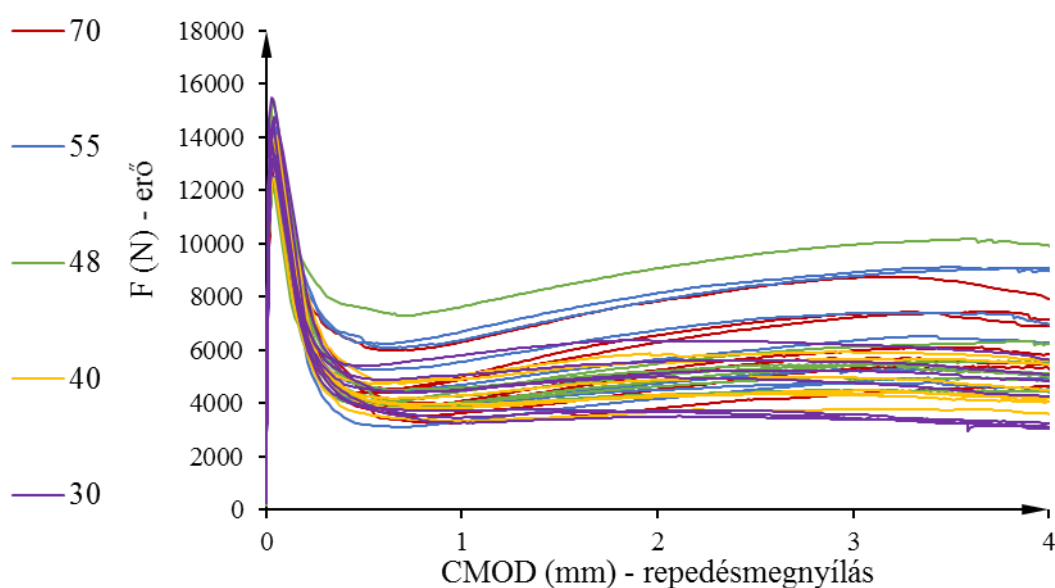
Mivel a matematikai modell 2 dimenziós volt, így kvantitatív eredményt nem ad, de magyarázattal szolgál a zsaluhatásra, amelyet számolással mutattunk be az 5.1. fejezetben.



11. ábra: Szálak darabszáma a távolság függvényében

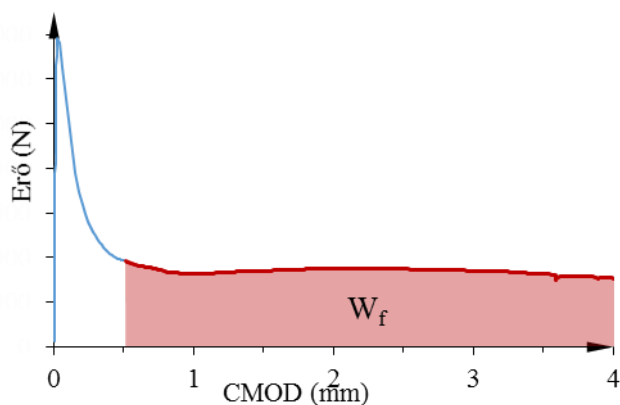
5.3. A szálhossz hatása a törési munkára

A szálak okozta maradó feszültség, amelyet a japán szabvány duktilitásként értelmez (JSCE SF-4 irányelv) [4], fontos paramétere a szálerősítésű betonnak. Az 5. pontban bemutatott hajlítási vizsgálat során megkapott értékekből előállíthatók a gerendák erő-repedésmegnyílás (CMOD) diagramjai (12. ábra). A diagramok alatti területet 4mm-es értékig integrálva kapjuk meg a törési munkát (W_{FRC}). A törési munka a beton törési munkából és a szintetikus szálak hozzáadott törési munkából (W_f) áll szálerősítésű betonok esetén [7].



12. ábra: A gerendák erő-repedésmegnyílás diagramjai szálhosszak szerint

A törési munkát a kiértékelés során úgy határoztam meg, hogy csak a repedésmegnyílás 0,5 mm-es értéktől integráltam, hiszen ezt a munkát jó közelítéssel még a beton végzi el, az e felett hozzáadott munka a szálak törési munkája (13. ábra) [7].



13. ábra: A szálak törési munkájának meghatározása

Minden gerenda törési munkájához tartozik egy szálnyomaték, amelyet a törési felületen megszámlált szálak alapján lehet megkapni. A gerendák vízszintes sávokra való osztását vettem alapul. A szálnyomatékokat minden 25×150 mm-es sávra külön-külön meg kell határozni, és az így kapott eredményeket összegezni. Az egyes sávokban lévő összes szál elhelyezkedését a számítás során a sávok középvonalára feltételezzük. A félbetört gerendák szálnyomatéka a következőképp értelmezhető:

$$S_f = \sum_{i=1}^5 t_i N_i \quad (4)$$

ahol:

S_f szálnyomaték, mm

t_i a szálmézők középpontjának távolsága a semleges tengelytől, közelítésképp a gerenda szélső szálától, mm

N_i a szálak darabszáma az aktuális mezőben.

A szálnyomatékokra leginkább a szálak semleges tengelytől vett távolsága van hatással, a keresztmetszet szélessége mentén való elhelyezkedés így a kísérlet szempontjából érdektelen. A nyomott betonzóna vastagsága mind számítások, mind kísérleti megfigyelések alapján a gerenda magasságához viszonyítva elhanyagolhatóan kicsi, így a semleges tengelyt a gerenda szélső szálára helyeztem [7].

A fenti módszerekkel megkapjuk az egyes gerendákhoz tartozó szálmunkákat és szálnyomatékokat. A kapott értékeket a következő táblázat összesíti:

3. táblázat: A gerendák törési munkája és szálnyomatéka

gerenda sorszám	szálhossz [mm]									
	30		40		48		55		70	
	W_f [J]	S_f [mm]	W_f [J]	S_f [mm]	W_f [J]	S_f [mm]	W_f [J]	S_f [mm]	W_f [J]	S_f [mm]
1.	13416	4975	16752	6138	18265	5369	29882	6544	31611	7094
2.	13309	5319	16822	4513	20533	5606	22960	4844	19814	4925
3.	19084	7644	21575	6756	19895	6769	18303	3619	25029	5294
4.	14594	5525	22392	5100	19849	6025	18446	4675	23162	5919
5.	20620	5525	16540	5369	34601	9100	20113	4450	20711	4956
6.	19551	6000	14798	4200	17515	4988	31499	6219	16153	4113
7.	24389	7725	17294	6031	21134	5294	24839	5244	20980	4706

Az egész törési keresztmetszeten tökéletes elkeveredést feltételezve a szálak középpontjai azonos távolságban vannak egymástól és a szálak véletlenszerűen, de egyenletesen minden irányban állnak. Egyenletes elkeveredést feltételezve a szálak darabszáma egységnyi keresztmetszeten [11]:

$$n_a = \frac{0,41 Nl}{V} \quad (5)$$

ahol:

n_a fajlagos keresztmetszetre eső szálak darabszáma, db/mm²

l szálhossz, mm

N szálak darabszáma a térfogatban

V térfogat, mm

Az egységnyi keresztmetszeten áthaladó darabszám segítségével meghatározható a tökéletes elkeveredéshez tartozó ideális szálnyomaték [7] :

$$S_{f,m} = \frac{125}{2} A n_a \quad (6)$$

ahol:

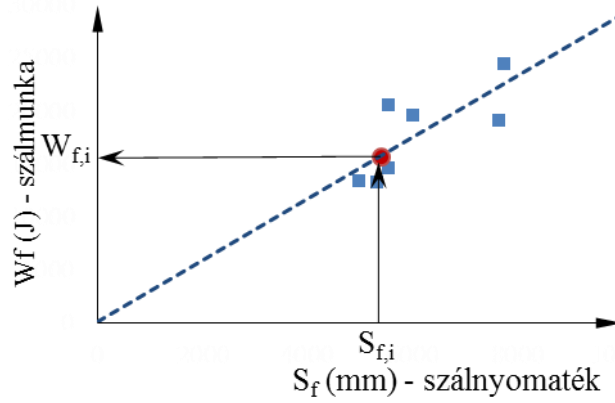
$S_{f,m}$ tökéletes elkeveredéshez tartozó szálnyomaték, ideális szálnyomaték, mm

A törési keresztmetszet területe (150 × 125 mm²)

n_a fajlagos keresztmetszetre eső szálak darabszáma, db/mm²

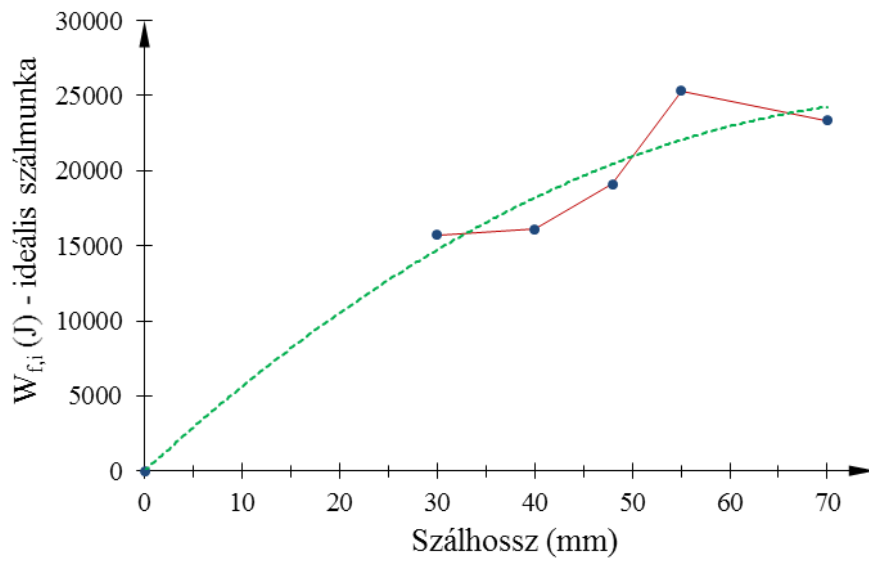
A kísérlet során az egyes szálhosszakhoz tartozó száladagolás azonos volt, azaz minden esetben 4 kg/m³ mennyiségű szálát adagoltunk a keresztmetszethez (1. táblázat). Ez azt jelenti, hogy a (5) és (6) összefüggés végeredménye a jelenlegi kutatásban a szálhosszúságtól független, így minden esetben azonos a végeredmény.

A továbbiakban az ideális szálnyomatékhoz tartozó ideális szálmunkát keressük, amely alapján levonhatók a következtetések a kutatás egyik fő kérdéskörével kapcsolatban: létezik-e olyan szálhosszúság, amely még könnyen elkeveredik a betonban, ugyanakkor duktilitása még magas? A duktilitás számszerű értékének megadásához használjuk a szálmunka kifejezést, esetünkben az egyes szálhosszúságokhoz tartozó ideális szálmunka fogja megadni a kérdésre a választ. Az ideális szálmunka meghatározásához alapul vesszük az előbbieken meghatározott valós szálnyomaték-szálmunka grafikonokat. A kapott adatokra lineáris regresszióval egyenest illesztünk. Az egyenesen megkeressük (6) összefüggésből megkapott ideális szálnyomatékokhoz tartozó ideális szálmunkákat (14. ábra).



14. ábra: Az ideális szálmunka meghatározása

A fent bemutatott módszerrel minden szálhosszúhoz meghatároztuk az ideális szálmunkát, így öt különböző eredményt kaptunk. Az eredményeket a szálhosszak függvényében egy grafikonon szemléltetem (15. ábra):



15. ábra: A különböző szálhosszakhoz tartozó ideális szálmunka

A számszerű értékeket az alábbi táblázat foglalja össze:

4. táblázat: A különböző szálhosszakhoz tartozó ideális szálmunka

szálhossz (mm)	ideális szálmunka (J)
30	15733, 23
40	16129, 76
48	19107, 45
55	25338, 08
70	23357, 07

6. Konklúzió

Az előző pontban bemutatott eredményből jól látszik a kérdésre a válasz. Az ideális szálmunka az 55 mm-es hosszúság eléréséig szinte fokozatosan nő, ezután csökken. Ez azt jelenti, hogy körülbelül eddig az értékig érdemes növelni a betonhoz kevert szálak hosszúságát jelen beton esetén. Ezen érték felett a hozzáadott szálmunka folyamatosan csökken, azaz kisebb lesz a beton duktilitása. A 70 mm-es szintetikus szálak hosszúságukhoz képest nem jelentenek elvárt mennyiségű duktilitás növekményt a betonban. Az 5.1. pontban bemutattuk, hogy ezek a szálak nehezen keverednek a betonban és ennél a hosszúnál a leggyakoribb a szál-labdák kialakulása. A fentiek alapján kijelenthető, hogy duktilitás és elkeveredés szempontjából is 55 mm-ig érdemes növelni a betonban a hozzáadott szintetikus szálakat. Jelen kutatás alapján ez az az ideális hossz, amely használatával nagyban növekszik a beton törési munkája és elkeverése is egyenletes volt, nem ütközött nehézségekbe, valamint a szakadt és a kihúzódt szálak aránya is majdnem azonos. Matematikai modellel és a szálak elhelyezkedésének vizsgálatával és megszámlálásával kvalitatív szemléltettem a zsaluzat hatását. A zsaluzat hatása miatt a szálak nem egyenletesen helyezkednek el a keresztmetszetben, a széleken és a sarkokon több szál van, mint a keresztmetszet közepén. A számolás és a matematikai modell is alátámasztotta ezt az állítást és megmutatta, hogy a legtöbb szál a gerenda sarkain helyezkedik el, ezután a széleken, a legkevesebb pedig a gerenda közepén. Egyedül a 70 mm-es szál esetében volt kevesebb szál a sarkokon, mint a széleken.

7. Összefoglalás

A szálerősítésű betonszerkezetekben acél- vagy makro szintetikus szálakat használunk, amelyeket a statikai méretezés során is figyelembe lehet venni. A szintetikus makro szálak hatása leginkább a beton berepedése után jelentkezik: javítják a beton duktilitását, statikailag határozatlan szerkezeteknél nő a globális teherbírás. A gyártók nem minden esetben tudnak pontos adatokkal szolgálni alkalmazásukról, így releváns ezen irányú kutatások elvégzése. Kezdetben ipari padlóknál alkalmaztak szintetikus szálerősítéseket, majd egyre több területen: alagútépítésben, villamospályáknál, előregyártott betonelemeknél.

Kísérletünkben a szálak hosszúságának a hatását vizsgáljuk az elkeveredésre és a duktilitásra. A hosszú szálak nehezebben keverednek, mint a rövidek, gyakori ezeknél a „szál labdák” kialakulása, azaz egy csomóba sűrűsödnek össze, melyek hatással vannak a duktilitásra. Célunk olyan optimális szálhossz megtalálása a jelen kísérletnél alkalmazott szálhoz, amely még könnyen elkeveredik a betonban, ugyanakkor duktilitása is magas.

A kísérlet elvégzéséhez ugyanazon betonból készítettünk gerendákat, melyekhez ugyanolyan adagolással eltérő hosszúságú szálakat kevertünk. A szálak típusa azonos volt, így az egyetlen változó paraméter a szálak hosszúsága volt. A gerendákat hárompontos (felezőpontos) hajlítási teszttel vizsgáltuk. A gerendákat a végén kettétörtük, így látszódtott a szálak elhelyezkedése, amelyből bebizonyosodott, hogy a zsaluzat hatással van a szálak pozíciójára: a szélek közelében és a sarkokon több szál van, mint a gerenda közepén. A zsaluzat hatását matematikai módszerrel is szemléltettük

Ezután a különböző hosszúságú szálak hatását vizsgáltuk a duktilitásra. A különböző hosszúságú szálakkal erősített betonok duktilitásait az erő-CMOD (gerenda bemetszésénél keletkező repedés megnyílása) diagram segítségével hasonlítottuk össze. Az eredményekből egy olyan szálhosszúság javasolható, amely minden szempontból optimálisnak mondható. Javaslatunk szerint 55 mm-ig érdemes növelni a szálhosszúságot, mert ezt a hosszúságot még könnyű elkeverni a betonban, emellett nagyban hozzájárul a gerenda duktilitás növekményéhez. A 70 mm-es szál problémás, csökken a duktilitás növekmény és elkeveredésre sem megfelelő.

Eredményeink hozzájárulnak jelen szál ideális hosszúságának a megállapításához, azonban ezen eredmények nagyban függenek mind a szál típusától, mind az alkalmazott betontól. Az értékek így csak erre a szálra vonatkoznak, azt azonban bebizonyítottuk, hogy a szálhossz növelés hatásának van egy felső határa, ahonnan kezdve korlátozódik a hozzáadott szál hatása.

8. Továbbfejlesztési lehetőségek

A jelenlegi kutatást több irányba is lehet folytatni. A zsaluzat hatását csak 2 dimenzióban vizsgáltuk, amely jól jellemzi a valós állapotot, azonban nem ad pontos, számszerű eredményt, hiszen a szálak térben bármilyen irányban állhatnak. Folytatásként meg lehetne vizsgálni 3 dimenzióban a szálakat, így pontos eredményeket reprezentálva vonnék le konklúziókat. A 3 dimenziós vizsgálat bonyolultabb, több időt igényel, jelen dolgozat kereteibe ez nem fért bele.

A különböző szálhosszakat ugyanazon típusú szállal és ugyanolyan keverésű betonnal vizsgáltuk. Meg lehetne vizsgálni, hogy más típusú szál hogyan viselkedik ugyanebben vagy más összetevőjű a betonban. Ezekkel az eredményekkel egy nagy adatbázis alakulna ki, amelyet össze lehetne hasonlítani a mostani kísérlettel és összefüggő, komplex megállapításokat lehetne tenni.

Az eredmények segíthetik a kivitelezési munkákat. Javaslatunk alapján olyan szálakkal lehet dolgozni, amelyeket könnyű elkeverni, nem csomósodik össze, valamint tartós, megfelelő teherbírású szerkezetet hozhatnak létre. A gyakorlatban azonban nem mindig ugyanolyan típusú betont használnak, sok tényezőtől függ, ezért is lenne fontos többféle betonminőséggel megvizsgálni a szálak hatásait. Érdekes kérdés lehet, hogy az adalékanyagok frakcióinak megváltoztatása hogyan hatna a fent közölt eredményekre.

9. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, Juhász Károly Péternek, aki segítségével, tanácsaival és iránymutatásával kiemelkedő részben hozzájárult a dolgozatomhoz. A betongerendák elkészítésében való segítséget a Czakó Adolf Laboratórium technikusának, Sebestyén Ottónak, valamint Óvári Vilmos betontechnológusnak köszönöm.

A keverőgépet és a szintetikus szálakat a Fiberguru Kft. (www.fiberguru.hu) biztosította. A cementet a Holcim Magyarország Kft., az adalékanyagot a York bánya szolgáltatta.

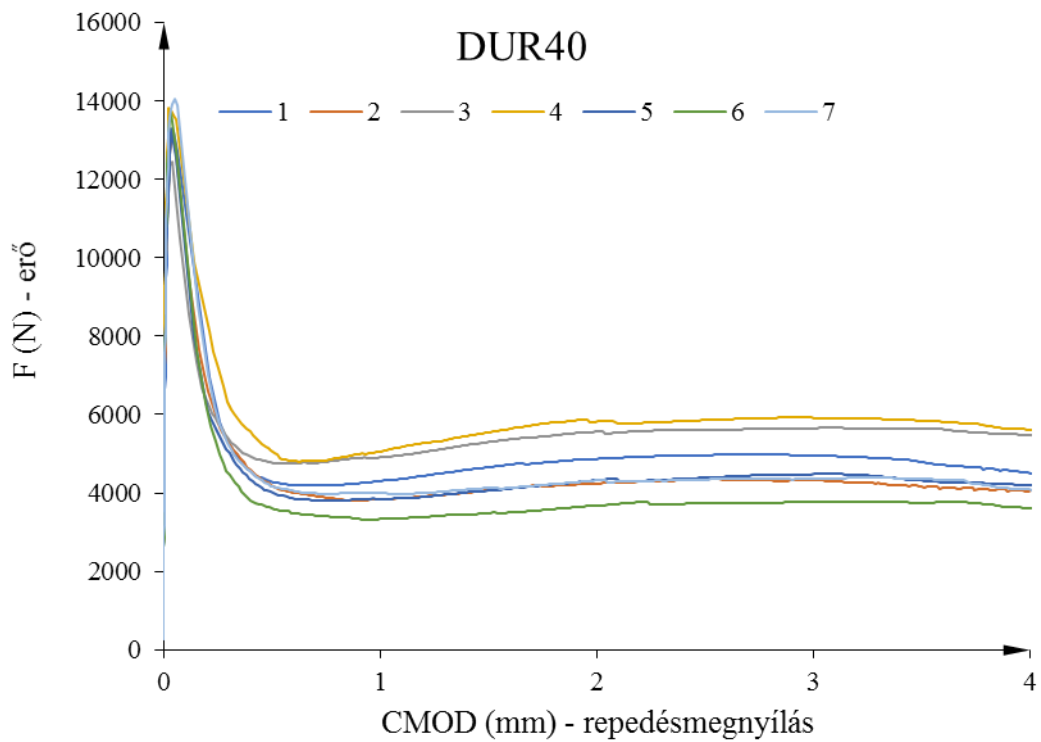
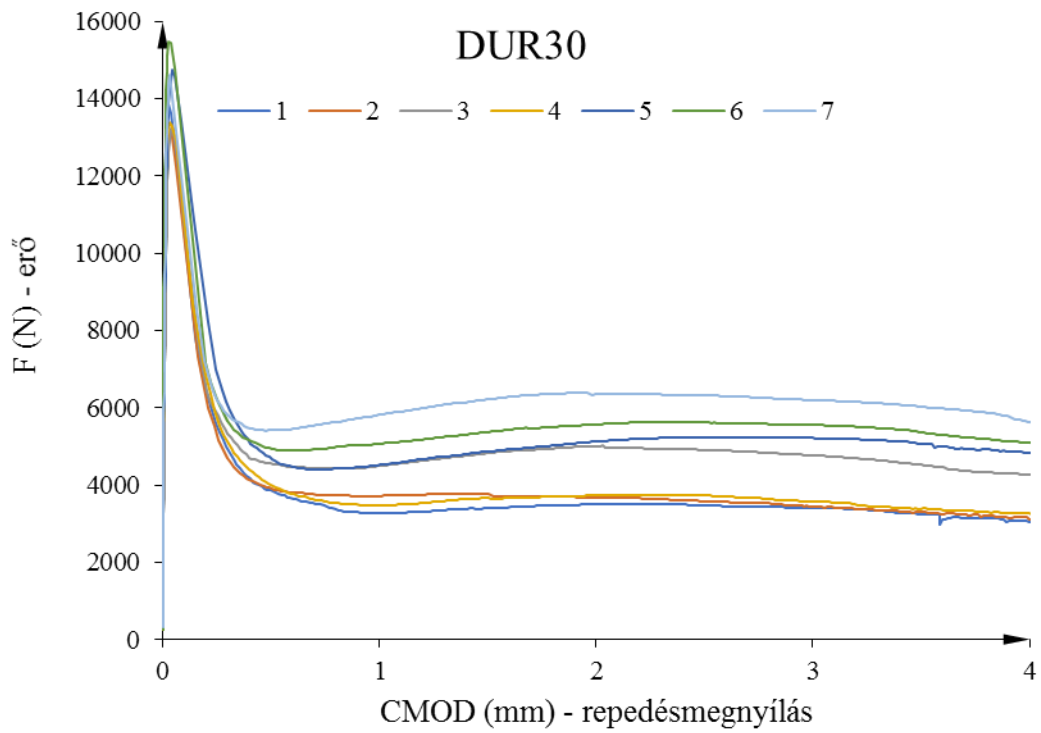
A kutatásokat a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék Czakó Adolf Laboratóriumában végeztük. A hajlítási teszthez és a töréshez használt itt található ZWICK/ROELL Z150 típusú univerzális anyagvizsgáló gépet a TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 pályázat biztosította.

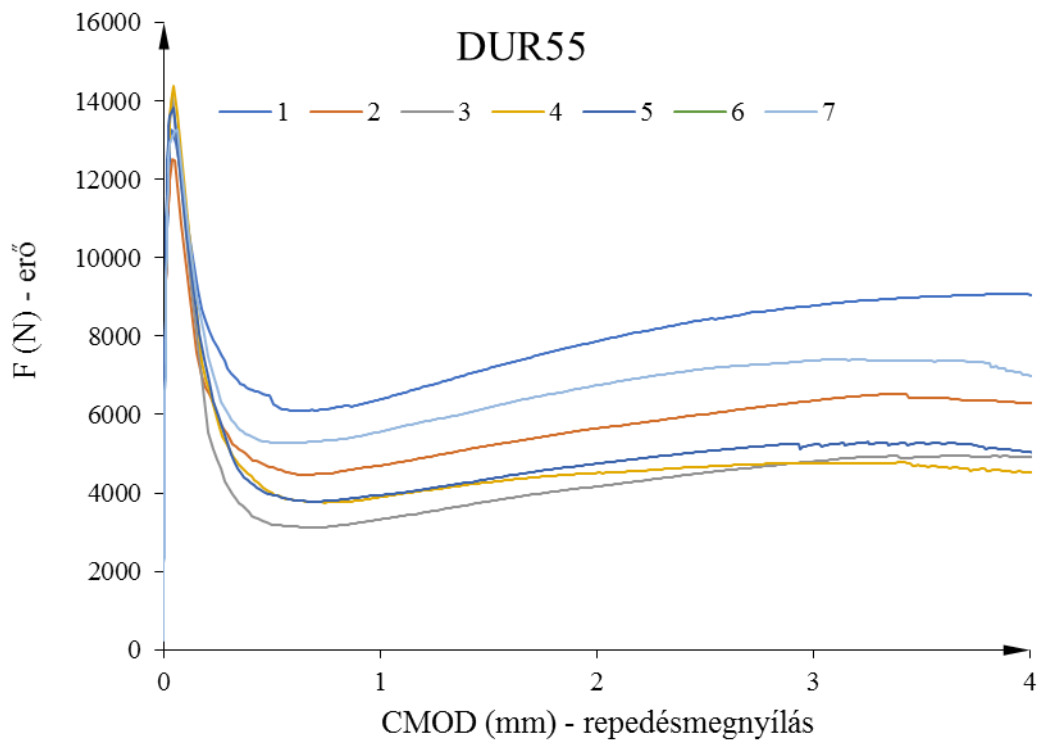
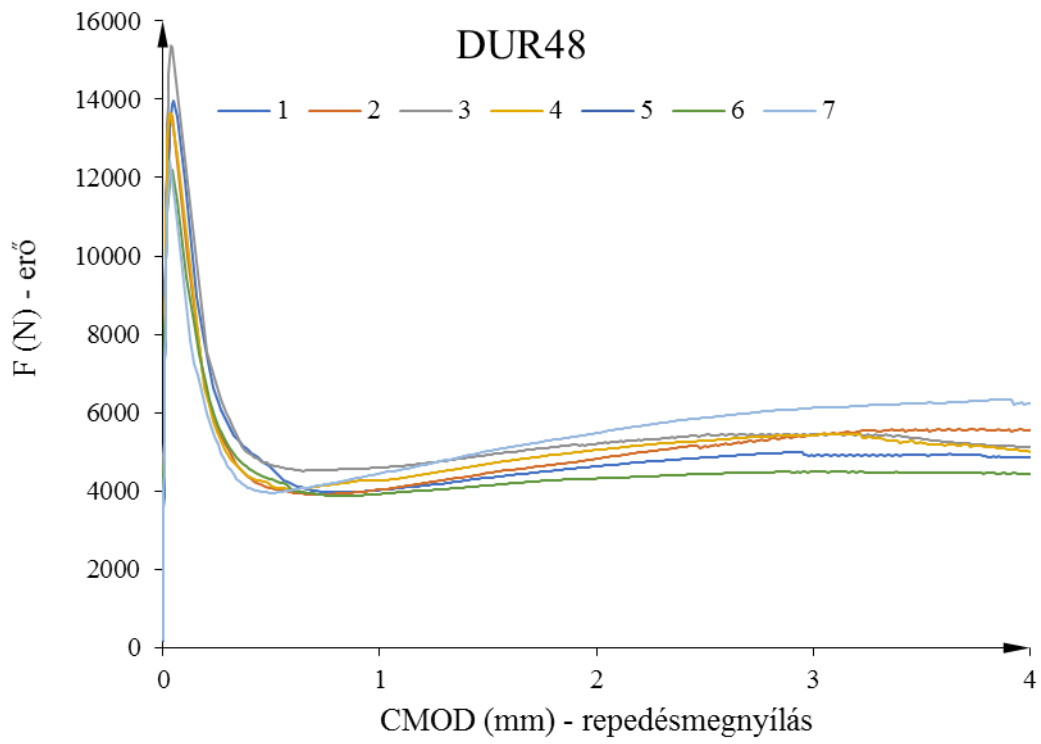
10. Irodalomjegyzék

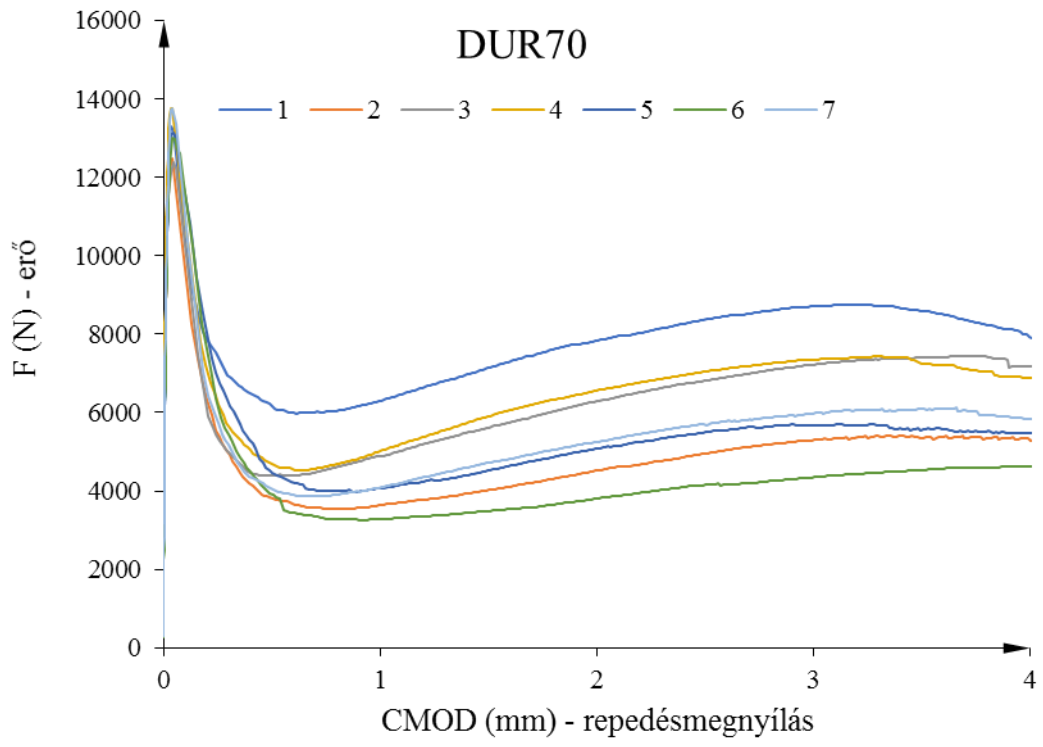
- [1] Attree, G. (2011) „Macro-synthetic fibres, long-term behaviour and the importance of CE marking”, Concrete Magazine, 2011 September
- [2] Balázs L. Gy. „Szálerősítésű betonok – Terminológia és anyagjellemzők”, Terminológia: Magyar nyelvű szakelőadások a 2001-2002-es tanévben. Építő- és építészmérnöki Kar, Kolozsvár, 2002.
- [3] British-Adopted European Standard: Fibres for concrete. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity, Standard BS EN 14889-2:2006, 2006.
- [4] Japan Society of Civil Engineers: Method of test for flexural strength and flexural toughness of SFRC, Standard JSCE SF-4, 1985.
- [5] Juhász K. P.: Mikro és makro szintetikus szálakkal készített beton próbatestek vizsgálata. Építés-Építésztudomány 42 (2014) 1–2. 57–71.
- [6] Juhász K. P.: Szintetikus makro szálerősítésű betonok. Diplomamunka feladat, Betontechnológia Szakirányú Továbbképzés, BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék, 2014.
- [7] Juhász K. P.: Szintetikus szálerősítésű betonok hozzáadott törési energiája az adalékanyag függvényében. Építés-Építésztudomány 43 (2015) 3-4. 317-329.
- [8] Kausay T., Dr.: Szálerősítésű betonok szabványosított vizsgálatai és néhány tulajdonsága, Szálerősítésű Betonok – a kutatástól az alkalmazásig c. konferencia, Budapest, 1999
- [9] Kollár, L. P., Springer G. S. (2003) „Mechanics of composite structures”, Cambridge University Press, Cambridge 2003.
- [10] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) (2008) „Richtlinie Faserbeton”, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Wien 2008
- [11] Romualdi, J.P. and Mandel, J.A. Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement. ACI Journal Vol. 61, No. 6 (1964), pp. 657-672.
- [12] 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.
- [13] <http://www.fiberguru.hu/referenciak> (megtekintve: 2016. október 31.)

11. Mellékletek

Erő-Repedésmegnyílás diagramok







Szálak megszámlálása a gerendában

	DUR30-1			DUR30-2			DUR30-3		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	11	3	12,5	4	2	5	6	1	6,5
X4	4	0	4	4	7	7,5	6	2	7
X3	5	1	5,5	5	4	7	8	4	10
X2	8	8	12	9	3	10,5	11	5	13,5
X1	6	3	7,5	3	2	4	15	0	15
Y1	8	2	9	9	2	10	16	1	16,5
Y2	4	7	7,5	9	3	10,5	11	5	13,5
Y3	6	1	6,5	7	4	9	6	5	8,5
Y4	7	1	7,5	10	6	13	4	1	4,5
Y5	4	4	6	5	2	6	4	3	5,5
össz	63	15	78	65	17,5	82,5	87	13,5	100,5
A1	1	1	1,5	4	1	4,5	1	2	2
A2	1	0	1	0	1	0,5	0	0	0
A3	6	0	6	2	0	2	6	1	6,5
A4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A5	4	0	4	0	2	1	1	3	2,5
B1	2	1	2,5	9	1	9,5	2	2	3
B2	0	0	0	1	0	1	1	0	1
B3	3	2	4	1	1	1,5	2	2	3
B4	0	0	0	2	0	2	0	0	0
B5	2	0	2	3	1	3,5	5	2	6

	DUR30-4			DUR30-5			DUR30-6		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	8	3	9,5	10	1	10,5	5	6	8
X4	5	1	5,5	8	4	10	8	7	11,5
X3	9	4	11	8	6	11	7	6	10
X2	10	4	12	1	5	3,5	7	5	9,5
X1	7	3	8,5	8	7	11,5	14	1	14,5
Y1	9	3	10,5	9	5	11,5	4	1	4,5
Y2	4	4	6	5	4	7	7	6	10
Y3	6	4	8	5	4	7	6	5	8,5
Y4	4	1	4,5	5	4	7	6	5	8,5
Y5	8	5	10,5	9	2	10	8	8	12
össz	70	16	86	68	21	89	72	25	97
A1	3	0	3	2	0	2	7	1	7,5
A2	1	0	1	3	0	3	0	0	0
A3	5	2	6	5	1	5,5	4	1	4,5
A4	0	1	0,5	0	0	0	0	0	0
A5	2	1	2,5	1	0	1	2	2	3
B1	5	2	6	7	0	7	4	4	6
B2	0	0	0	1	0	1	0	0	0
B3	6	4	8	2	1	2,5	5	7	8,5
B4	1	1	1,5	1	0	1	0	1	0,5
B5	1	3	2,5	4	1	4,5	3	2	4

	DUR30-7			DUR40-1			DUR40-2		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	9	6	12	7	4	9	15	7	18,5
X4	8	5	10,5	5	5	7,5	3	3	4,5
X3	12	4	14	4	9	8,5	3	0	3
X2	9	5	11,5	6	4	8	4	8	8
X1	7	7	10,5	9	10	14	5	5	7,5
Y1	10	5	12,5	3	10	8	7	6	10
Y2	16	4	18	12	4	14	2	7	5,5
Y3	9	5	11,5	4	7	7,5	5	1	5,5
Y4	5	5	7,5	4	5	6,5	5	3	6,5
Y5	7	8	11	6	4	8	11	8	15
össz	92	27	119	60	31	91	60	24	84
A1	1	4	3	6	5	8,5	2	0	2
A2	1	1	1,5	2	0	2	1	3	2,5
A3	6	2	7	2	2	3	10	2	11
A4	0	2	1	1	1	1,5	3	0	3
A5	5	2	6	1	5	3,5	4	2	5
B1	4	5	6,5	1	5	3,5	1	0	1
B2	0	0	0	2	0	2	3	1	3,5
B3	3	5	5,5	1	2	2	4	4	6
B4	1	1	1,5	1	1	1,5	1	0	1
B5	1	2	2	1	4	3	4	2	5

	DUR40-3			DUR40-4			DUR40-5		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	4	6	7	7	5	9,5	3	4	5
X4	4	10	9	6	4	8	3	8	7
X3	7	8	11	3	4	5	5	6	8
X2	8	9	12,5	5	10	10	7	7	10,5
X1	8	8	12	3	7	6,5	8	6	11
Y1	6	8	10	4	6	7	3	6	6
Y2	5	9	9,5	13	10	18	6	6	9
Y3	7	10	12	1	5	3,5	7	5	9,5
Y4	5	10	10	1	4	3	3	6	6
Y5	6	7	9,5	2	7	5,5	5	7	8,5
össz	60	42,5	102,5	45	31	76	50	30,5	80,5
A1	3	6	6	3	3	4,5	3	8	7
A2	1	1	1,5	1	1	1,5	0	0	0
A3	5	3	6,5	8	2	9	1	3	2,5
A4	0	0	0	0	0	0	1	0	1
A5	2	5	4,5	4	1	4,5	1	0	1
B1	4	4	6	10	3	11,5	1	7	4,5
B2	3	1	3,5	0	1	0,5	3	0	3
B3	3	6	6	2	8	6	1	4	3
B4	0	0	0	1	1	1,5	0	0	0
B5	6	4	8	3	1	3,5	3	0	3

DUR40-6			DUR40-7			DUR48-1			
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	6	9	10,5	2	6	5	9	10	14
X4	5	7	8,5	5	7	8,5	7	9	11,5
X3	5	5	7,5	3	6	6	4	6	7
X2	3	5	5,5	6	7	9,5	7	10	12
X1	5	4	7	10	7	13,5	2	8	6
Y1	2	5	4,5	9	7	12,5	9	6	12
Y2	5	5	7,5	3	7	6,5	2	11	7,5
Y3	3	5	5,5	6	6	9	0	6	3
Y4	7	8	11	3	8	7	3	10	8
Y5	4	7	7,5	7	6	10	4	9	8,5
Össz	45	30	75	54	33,5	87,5	47	42,5	89,5
A1	1	6	4	1	2	2	5	2	6
A2	0	1	0,5	0	0	0	1	2	2
A3	7	9	11,5	1	4	3	9	7	12,5
A4	1	0	1	0	2	1	4	2	5
A5	5	2	6	5	5	7,5	4	9	8,5
B1	3	5	5,5	5	3	6,5	0	7	3,5
B2	0	0	0	0	0	0	0	2	1
B3	3	7	6,5	5	4	7	1	5	3,5
B4	0	0	0	3	3	4,5	2	3	3,5
B5	4	3	5,5	1	5	3,5	5	6	8

DUR48-2			DUR48-3			DUR48-4			
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	17	15	24,5	3	12	9	10	12	16
X4	7	13	13,5	9	9	13,5	2	7	5,5
X3	5	8	9	6	8	10	2	7	5,5
X2	4	10	9	5	4	7	5	6	8
X1	6	5	8,5	6	9	10,5	5	14	12
Y1	4	5	6,5	6	8	10	6	13	12,5
Y2	3	7	6,5	4	5	6,5	5	6	8
Y3	2	10	7	15	7	18,5	6	8	10
Y4	8	14	15	15	9	19,5	4	7	7,5
Y5	8	14	15	6	12	12	11	12	17
Össz	64	50,5	114,5	75	41,5	116,5	56	46	102
A1	0	2	1	6	8	10	3	6	6
A2	6	0	6	0	1	0,5	3	1	3,5
A3	9	10	14	3	9	7,5	4	9	8,5
A4	1	2	2	0	2	1	1	2	2
A5	5	7	8,5	6	2	7	4	6	7
B1	2	7	5,5	17	4	19	4	6	7
B2	0	0	0	3	1	3,5	2	0	2
B3	3	13	9,5	4	8	8	6	9	10,5
B4	2	1	2,5	0	2	1	1	2	2
B5	7	7	10,5	2	0	2	1	2	2

	DUR48-5			DUR48-6			DUR48-7		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	3	9	7,5	5	8	9	12	4	14
X4	5	9	9,5	1	9	5,5	6	7	9,5
X3	6	5	8,5	1	8	5	4	9	8,5
X2	12	17	20,5	7	6	10	4	7	7,5
X1	10	9	14,5	10	5	12,5	4	10	9
Y1	12	9	16,5	2	4	4	3	10	8
Y2	8	17	16,5	6	6	9	3	7	6,5
Y3	7	5	9,5	3	8	7	6	9	10,5
Y4	12	8	16	2	9	6,5	6	6	9
Y5	12	8	16	8	9	12,5	5	6	8
Össz	87	48	135	45	36	81	53	37,5	90,5
A1	5	3	6,5	2	10	7	3	5	5,5
A2	1	2	2	1	1	1,5	1	1	1,5
A3	2	5	4,5	3	3	4,5	8	3	9,5
A4	1	3	2,5	2	1	2,5	1	0	1
A5	8	8	12	5	3	6,5	3	5	5,5
B1	4	2	5	0	9	4,5	7	4	9
B2	1	1	1,5	3	1	3,5	2	0	2
B3	15	6	18	4	4	6	6	3	7,5
B4	1	4	3	3	1	3,5	1	1	1,5
B5	9	8	13	4	4	6	5	4	7

	DUR55-1			DUR55-2			DUR55-3		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	4	5	6,5	4	5	6,5	5	2	6
X4	3	8	7	2	9	6,5	4	4	6
X3	5	11	10,5	3	5	5,5	2	5	4,5
X2	4	9	8,5	5	6	8	1	8	5
X1	7	10	12	5	9	9,5	7	5	9,5
Y1	5	10	10	3	7	6,5	0	6	3
Y2	7	9	11,5	2	10	7	3	8	7
Y3	6	11	11,5	6	10	11	2	5	4,5
Y4	8	8	12	3	4	5	3	6	6
Y5	9	6	12	12	6	15	5	2	6
Össz	58	43,5	101,5	45	35,5	80,5	32	25,5	57,5
A1	7	12	13	2	5	4,5	6	2	7
A2	3	1	3,5	2	0	2	4	1	4,5
A3	0	4	2	2	7	5,5	5	1	5,5
A4	2	1	2,5	0	0	0	1	1	1,5
A5	2	8	6	1	2	2	3	0	3
B1	4	8	8	2	9	6,5	2	4	4
B2	2	1	2,5	3	1	3,5	5	1	5,5
B3	9	6	12	7	6	10	4	2	5
B4	0	3	1,5	1	2	2	0	1	0,5
B5	3	6	6	3	4	5	1	4	3

	DUR55-4			DUR55-5			DUR55-6		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	3	14	10	3	17	11,5	6	7	9,5
X4	7	6	10	4	6	7	4	7	7,5
X3	2	8	6	1	9	5,5	5	8	9
X2	6	5	8,5	4	9	8,5	5	8	9
X1	4	7	7,5	2	4	4	7	13	13,5
Y1	5	7	8,5	5	4	7	1	13	7,5
Y2	2	5	4,5	5	6	8	8	8	12
Y3	3	6	6	2	9	6,5	4	10	9
Y4	5	10	10	8	7	11,5	7	6	10
Y5	4	10	9	6	17	14,5	7	5	9,5
Össz	41	39	80	40	44	84	54	42,5	96,5
A1	4	7	7,5	3	4	5	2	7	5,5
A2	1	3	2,5	0	1	0,5	0	0	0
A3	3	9	7,5	3	11	8,5	7	7	10,5
A4	2	4	4	4	4	6	1	2	2
A5	4	2	5	3	3	4,5	3	7	6,5
B1	2	6	5	5	6	8	2	4	4
B2	1	3	2,5	2	2	3	0	0	0
B3	4	9	8,5	4	10	9	7	5	9,5
B4	3	2	4	1	3	2,5	2	2	3
B5	4	2	5	2	5	4,5	7	6	10

	DUR55-7			DUR70-1			DUR70-2		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	5	11	10,5	9	8	13	10	7	13,5
X4	2	8	6	5	8	9	2	6	5
X3	4	8	8	2	14	9	1	10	6
X2	1	7	4,5	3	13	9,5	2	8	6
X1	4	13	10,5	10	15	17,5	2	18	11
Y1	4	13	10,5	4	17	12,5	1	18	10
Y2	3	6	6	3	14	10	1	7	4,5
Y3	6	8	10	3	14	10	9	0	9
Y4	6	6	9	2	8	6	3	8	7
Y5	6	11	11,5	4	8	8	3	8	7
Össz	41	45,5	86,5	45	59,5	104,5	34	45	79
A1	4	4	6	10	13	16,5	2	5	4,5
A2	1	1	1,5	2	1	2,5	2	1	2,5
A3	2	0	2	8	6	11	7	4	9
A4	3	1	3,5	3	4	5	2	3	3,5
A5	1	5	3,5	3	11	8,5	1	11	6,5
B1	5	4	7	5	9	9,5	0	4	2
B2	1	0	1	4	1	4,5	4	1	4,5
B3	4	8	8	2	4	4	3	5	5,5
B4	1	3	2,5	2	5	4,5	1	8	5
B5	1	2	2	3	7	6,5	2	10	7

	DUR70-3			DUR70-4			DUR70-5		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	9	10	14	4	10	9	2	12	8
X4	3	8	7	3	9	7,5	3	6	6
X3	6	7	9,5	3	10	8	1	13	7,5
X2	5	10	10	2	16	10	4	7	7,5
X1	0	14	7	2	13	8,5	2	15	9,5
Y1	3	14	10	4	10	9	1	13	7,5
Y2	1	10	6	2	16	10	4	7	7,5
Y3	5	7	8,5	8	10	13	4	10	9
Y4	3	8	7	4	9	8,5	1	10	6
Y5	7	11	12,5	9	10	14	6	12	12
Össz	42	49,5	91,5	41	56,5	97,5	28	52,5	80,5
A1	2	8	6	1	8	5	5	11	10,5
A2	0	3	1,5	1	2	2	2	4	4
A3	9	13	15,5	3	7	6,5	1	5	3,5
A4	1	1	1,5	1	2	2	3	2	4
A5	6	5	8,5	5	10	10	1	10	6
B1	4	9	8,5	11	11	16,5	2	7	5,5
B2	0	1	0,5	2	3	3,5	0	4	2
B3	7	9	11,5	7	8	11	4	8	8
B4	1	1	1,5	5	3	6,5	0	3	1,5
B5	3	8	7	3	9	7,5	1	7	4,5

	DUR70-6			DUR70-7		
	kihúzódot	szakadt	összesen	kihúzódot	szakadt	összesen
X5	10	14	17	2	10	7
X4	1	12	7	0	8	4
X3	3	5	5,5	4	10	9
X2	1	14	8	2	7	5,5
X1	2	7	5,5	1	9	5,5
Y1	2	7	5,5	5	9	9,5
Y2	2	12	8	4	9	8,5
Y3	0	5	2,5	5	10	10
Y4	2	12	8	1	10	6
Y5	9	14	16	7	9	11,5
Össz	32	51	83	31	45,5	76,5
A1	2	11	7,5	3	5	5,5
A2	10	2	11	0	0	0
A3	2	10	7	2	6	5
A4	1	1	1,5	1	9	5,5
A5	0	4	2	2	9	6,5
B1	1	9	5,5	3	8	7
B2	4	3	5,5	7	1	7,5
B3	7	11	12,5	1	3	2,5
B4	2	1	2,5	3	6	6
B5	0	3	1,5	5	7	8,5