

Doktori tézisek

**Szálerősítés hatása a beton nyírási
teherbírására**

Halvax Katalin

Témavezető:

**Dr. Majorosné Dr. Lublós Éva Eszter, PhD, egyetemi adjunktus
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola
Győr, 2017.**

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a szálerősítésű betonok felhasználási területe folyamatosan bővül, és számos kutatás zajlik ezen a területen. Ennek ellenére a nyírási teherbírás meghatározására, a kísérletek bonyolultsága miatt, viszonylag korlátozott számban érhető el szakirodalom.

Vasbeton tartószerkezeteink méretezése során az egyes szerkezeti elemek nyírási teherbírása hasonlóan fontos, mint bármely más igénybevétellel szembeni megfelelés. Ezen a területen, száladagolás alkalmazásával előnyök érhetők el pl.: a viszonylag nagy munkaigényű kengyelezés részleges vagy teljes kiváltásával. Ahhoz, hogy egy szálerősítésű vasbeton elem nyírási teherbírása megbízhatóan számítható legyen, elengedhetetlen a szálak betonban való viselkedésének tisztázása. A szálak tapadási tulajdonságainak vizsgálata tehát időszerű, ugyanis a nyírási teherbírás vizsgálatához ezen paraméter ismeretére szükségünk van, és a szakirodalomban erre vonatkozó konkrét adat nagyon kevés érhető el.

A szálerősítésű, hagyományos nyírási vasalás (kengyelek) nélküli vasbeton gerendák nyírási teherbírás számítására ajánlott régebbi szakirodalmi összefüggések módosítása szükséges, ugyanis napjainkban szinte folyamatosan jelennek meg egyre korszerűbb szálak a piacon, mind alakjukat mind anyagukat tekintve.

1.1. Tudományos előzmények

1874-ben kezdődött el a szálerősítésű betonok kutatásának azóta is tartó hosszú folyamata, mikor A. Bernard felvetette az ötletet, hogy beton erősítésére kis acél darabkák adagolása megfelelő lehet. Az azt követő kezdeti, kisszámú kutatás után valójában az 1960-as években kezdtek el a szálerősítés lehetőségével beton esetében jelentősebben foglalkozni. A gyakorlati alkalmazások az 1990-es években indultak el. Ezen kezdeti kísérletek óta eltelt mintegy 50 év alatt a felhasznált szálak anyaga, geometriája és felhasználási területe egyre szélesebb palettán mozog. Napjainkban a beton erősítésére alkalmazott szálak anyaga lehet természetes eredetű, mint például a len, kókusz, bambusz stb., illetve mesterséges. A mesterséges szálak alkalmazása jelentősen nagyobb volument képvisel, ugyanis nagyobb mértékben képesek a beton bizonyos tulajdonságainak javítására. A mesterséges szálak anyaga lehet: üveg, szén, műanyag vagy acél.

A mesterséges szálak közül a legnagyobb mennyiségben az acélszálak vannak jelen az építőipar területén. Az acélszálak alkalmazása azzal a nagy előnnyel jár, hogy tulajdonságaik hasonlóak a vasbeton betonacéljához, az erősítő szerepüket egészen a beton töréséig megtartják. Nagy előnyük, hogy a beton húzással szembeni ellenállása berepedés után nem csökken nullára, hanem egy közel konstans értéken állandósul (ezt nevezzük maradó húzószilárdságnak).

További előnyük, hogy a szálaknak köszönhetően a repedések jobban szétoszlanak és tágasságuk kisebb [1-2].

Az acélszál-erősítésű beton jellemző felhasználási területei: a legnagyobb mennyiségben ipari padlóknak és lőtt beton alkalmazásakor kerül felhasználásra, de találkozhatunk vele előregyártott beton, illetve vasbeton elemekben is (pl. alagút tübbingekben műanyagszál adagolással vegyesen). Kísérleti jelleggel vasbeton gerendák nyírási teherbírásának növelésére vagy például vasbeton födémek átszűrődással szembeni nyírási teherbírásának növelésére alkalmazzák [3]. Acélszálak adagolása vasbeton szerkezetekben a földrengéssel szembeni kedvezőbb viselkedés érdekében is jellemző [4].

Az acélszálak tehát képesek az alacsony húzószilárdsággal rendelkező beton nyírásra rideg viselkedésének javítására, és teherbírásának növelésére. A szakirodalomban megjelent acélszál erősítésű vasbeton gerendákon végzett kísérletek alapján ennek okai a következők [5-11]:

- a száladagolás hatására nő a beton repesztő-, de főképpen a maradó-húzószilárdsága;
- a szálaknak köszönhetően a repedések jobban szétoszlanak és tágasságuk kisebb;
- a szálaknak jobb a repedésáthidaló képességük és jobban szétosztják a húzási repedéseket (mivel jóval közelebb vannak egymáshoz), mint a kengyelek.

Számos kutató végzett acélszál erősítésű vasbeton gerendákon kísérletet, azok nyírási teherbírásának meghatározása, és néhányan közülük egy-egy zárt képlet formájában javaslatot tettek arra, hogyan lehetne meghatározni acélszál erősítésű vasbeton gerendák repesztő-, illetve törő-nyírószilárdságát [5-11].

Napjainkban a piacon megjelent, az acélszálak helyettesítésre ajánlott, makro műanyag szál. A makro műanyag szálerősítésű vasbeton gerendák nyírási teherbírásának vizsgálatával kevés kutatás foglalkozott ezidáig, emiatt a nyírási teherbírás becslésére javasolt összefüggést szakirodalmi kutatásom során nem találtam.

2. AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSEI

A PhD kutatásom során az általam végzett laboratóriumi kísérletek és azok eredményeinek, valamint a szakirodalomból gyűjtött információk kiértékelésének célkitűzései a következők voltak:

1. annak tisztázása, hogy a szálak anyaga és alakja hogyan befolyásolja a szálak tapadószilárdságának mértékét és a szálak viselkedését a száلكihúzóadás folyamata során;
2. a száladagolás hatásának tisztázása a beton mechanikai tulajdonságaira;

3. annak tisztázása, hogy milyen típusú és mennyiségű száladagolás milyen mértékben növeli egy hagyományos nyírási vasalás (kengyelek) nélküli vasbeton gerenda nyírási teherbírását, azaz alkalmas-e a hagyományos nyírási vasalás (kengyelek) kiváltására;
4. a szakirodalomból általam összegyűjtött, a nyírási teherbírás számítására alkalmas összefüggések módosítása az acélszál erősítésű vasbeton gerendák nyírási teherbírásának pontosabb számítása céljából, illetve ezen összefüggések műanyag szálakra történő kiterjesztése.

3. A KUTATÁS MÓDSZERE

A PhD kutatáshoz kapcsolódó kísérleteimet két ütemben végeztem el, közel 345 db próbatestet készítettem és vizsgáltam. A kísérletek áttekintését az 1. táblázatban adom meg. Az első ütemben a különböző anyagú és alakú szálak tapadási tulajdonságait vizsgáltam száلكihúzó kísérletek segítségével. A második ütemben, a száلكihúzó vizsgálatok eredményei alapján kiválasztott száltípusokkal, szálerősítésű, hagyományos nyírási vasalás (kengyelek) nélküli vasbeton gerendák nyírási teherbírását vizsgáltam.

A *száلكihúzó vizsgálatokhoz* két típusú próbatestet készítettem: az egyik esetében egy szál egyik vége, a másik esetében egy szál mindkét vége be volt ágyazva habarcs próbatestetekbe. Hat különböző típusú szálat vizsgáltam: gombostű fejű, kampós végű, hullámos valamint hullámos-lapos acélszálat, továbbá egyenes, bordázott valamint hullámos alakú műanyag szálat. A szálak anyagán és alakján felül a habarcs keverék víz-cement tényezője ($v/c = 0,4 - 0,5 - 0,6$) és a szálak beágyazási hossza ($L_b = 10, 15, 20$ mm) voltak a kísérlet változó paraméterei. A száلكihúzó vizsgálatok során, a mérés közben rögzített száلكihúzó erő – elmozdulás értékek alapján, azt vizsgáltam, hogyan viselkednek a különböző típusú szálak a kihúzóási folyamat során. Ennek eredményeképpen az erő – elmozdulás diagramok jellegét figyeltem meg. Vizsgálataim során elemeztem, hogyan befolyásolja a szál alakja, beágyazási hosszának mértéke valamint az ágyazóanyag szilárdsága a száلكihúzóási folyamatát, a maximális száلكihúzó erőt, illetve az ebből számított τ_f tapadószilárdság mértékét.

A *nyírási teherbírás vizsgálatához* 90x150x700 mm-es vasbeton gerenda próbatesteket készítettem kampós végű, hullámos valamint hullámos-lapos acélszálakkal továbbá egyenes, bordázott és hullámos alakú műanyag szálakkal. Az acélszálak mennyisége 0,5 V% (39,3 kg/m³) és 1,0 V% (78,5 kg/m³), a műanyag szálak mennyisége 0,1 V% (0,91 kg/m³) és 0,5 V% (4,55 kg/m³) volt. Ezen felül referencia mérés céljából szálerősítés nélküli betonkeverékből is készítettem gerendákat hagyományos nyírási vasalással (kengyelek két különböző mennyiségben) és anélkül. A nyírási teherbírás vizsgálatához készített gerendákhoz használt

szálerősítés nélküli, illetve szálerősítéssel beton keverékekből a mechanikai tulajdonságok vizsgálatához szabványos méretű kocka és hasáb próbatesteket is készítettem, melyeken a betonkeverékek nyomó- és hajlító-húzószilárdságát valamint rugalmassági modulusát vizsgáltam. A gerendák törő-nyírószilárdságának meghatározásához a gerendák négyponos terhelése során rögzített erő – elmozdulás párokat használtam, míg a repesztő-nyírószilárdság meghatározása egy optikai mérőrendszer segítségével történt. A szálak alakjának, anyagának és mennyiségének a nyírási teherbírásra gyakorolt hatásának elemzését követően a mért szilárdság értékeket összehasonlítottam a szakirodalomból gyűjtött, más kutatók által javasolt összefüggések alapján számított nyírási teherbírás értékekkel.

1. táblázat: A kutatás során végzett kísérletek áttekintő táblázata

| A vizsgálat paraméterei | A vizsgálat célja |
|--|---|
| <p><i>1. Szálkihúzó vizsgálatok</i></p> <p>1.1. Egyik végén beágyazott szálak: változó paraméterek:</p> <ul style="list-style-type: none"> – a beágyazott szálak alakja – a habarcs keverék víz-cement tényezője – a szálak beágyazási hossza <p>mért jellemzők:</p> <ul style="list-style-type: none"> – a szálkihúzó erő és az elmozdulás <p>1.2. Mindkét végén beágyazott szálak: változó paraméterek:</p> <ul style="list-style-type: none"> – a beágyazott szálak anyag – a beágyazott szálak alakja – a habarcs keverék víz-cement tényezője <p>mért jellemzők:</p> <ul style="list-style-type: none"> – a szálkihúzó erő és az elmozdulás | <p>Annak vizsgálata, hogy:</p> <ul style="list-style-type: none"> – hogyan viselkednek a különböző típusú szálak a kihúzóási folyamat során, – hogyan befolyásolja a szál alakja, beágyazási hosszának mértéke valamint az ágyazóanyag szilárdsága a szálkihúzóási folyamatát, a maximális szálkihúzó erőt, illetve az ebből számított τ_f tapadószilárdság mértékét, – a tapadószilárdság szempontjából a nyírási teherbírás növeléséhez ajánlott száltípus(ok) kiválasztása. |
| <p><i>2. Beton mechanikai tulajdonságainak vizsgálata</i></p> <p>változó paraméterek:</p> <ul style="list-style-type: none"> – a szálak anyaga – a szálak alakja – a szálak mennyisége <p>mért jellemzők:</p> <ul style="list-style-type: none"> – nyomószilárdsága – hajlító-húzószilárdság – rugalmassági modulus | <p>Annak vizsgálata, hogy:</p> <ul style="list-style-type: none"> – hogyan befolyásolja a szálak anyaga, alakja és mennyisége a megszilárdult beton mechanikai tulajdonságait. |
| <p><i>3. Nyírási teherbírás vizsgálata</i></p> <p>változó paraméterek:</p> <ul style="list-style-type: none"> – a szálak anyaga – a szálak alakja – a szálak mennyisége <p>mért jellemzők:</p> <ul style="list-style-type: none"> – a terhelő erő és az elmozdulás – a repedéskép a terhelés során | <p>Annak vizsgálata, hogy:</p> <ul style="list-style-type: none"> – hogyan befolyásolja a szálak anyaga, alakja és mennyisége a beton törő- és repesztő-nyírószilárdságának mértékét. |

4. A DISSZERTÁCIÓ ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI

A fejezetben a félkövér, dőlt betűvel szedett szövegrészek a tézisek, a normál betűvel írott szövegrészek pedig a magyarázat.

1. tézis: *Kísérletileg igazoltam, hogy a szálak anyaga és típusa befolyásolja az erő – elmozdulás diagram jellegét és annak lefutását, amit négy különböző csoportba soroltam be (1.1. altézis). A diagramok jellege és értékei alapján elvégezhető az optimális szálanyag és szálalak kiválasztása a tapadószilárdság és egyben a nyírási teherbírás szempontjából (1.2. altézis és 1.3. altézis) [b, d, e].*

1.1 altézis: *A kísérleteim alapján az erő – elmozdulás diagram a jellegét tekintve négy különböző csoportba sorolható:*

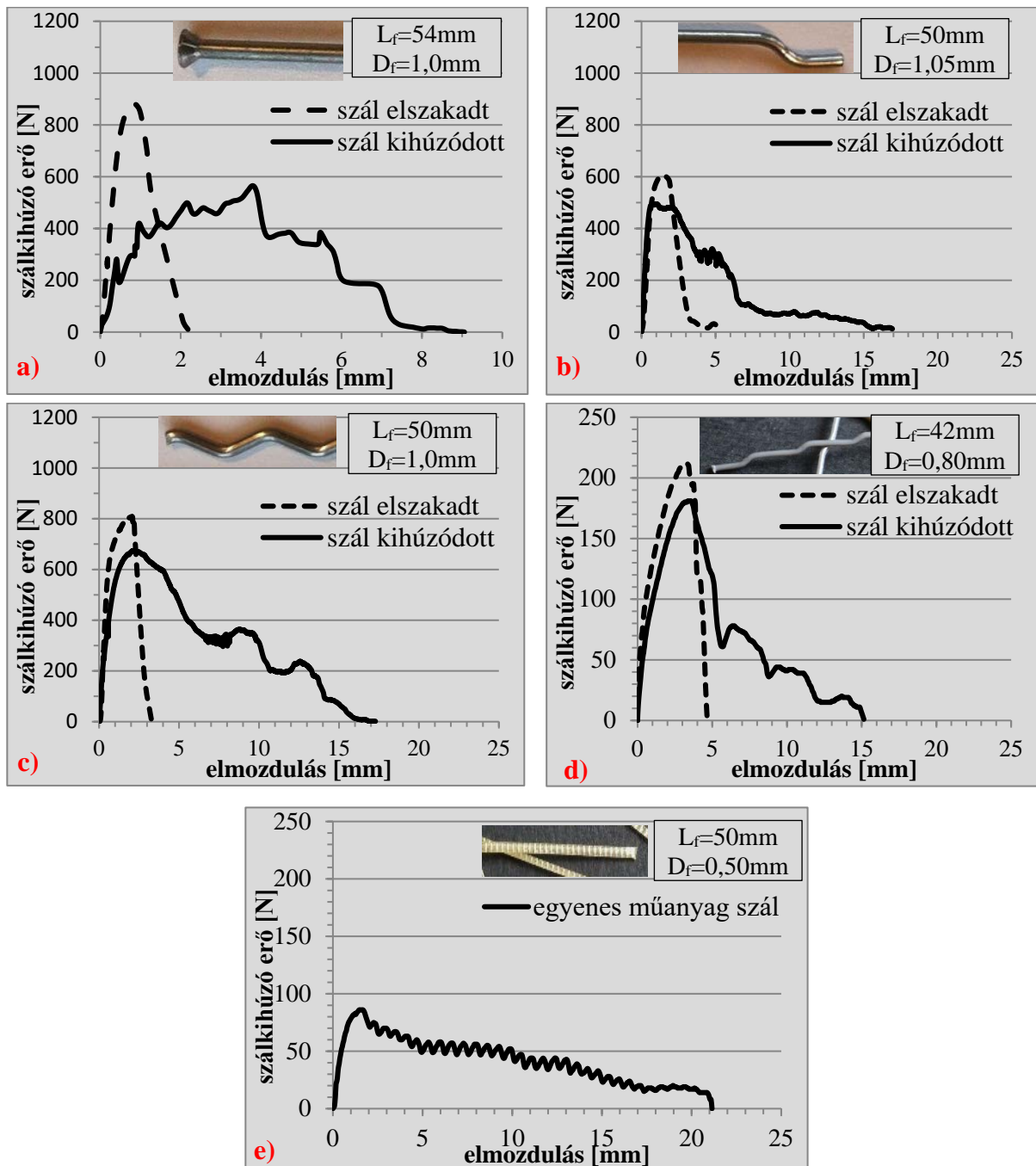
- **1. csoport:** *a gombostű fejű acélszálak* esetében kihúzóds során egy esetben sem jelentkezett száldeformáció. A maximális erő elérése után a szál – megtartva eredeti alakját – húzódik kifelé a habarcs próbatestből, utat törve magának. A habarcs szilárdságának függvényében a kihúzóds során különböző mértékben vesznek részt a súrlódási, illetve a nyíró erők az ellenállásban. Ez magyarázza a diagram több, különböző erőnél megfigyelhető csúcspontját (1.a) diagram).

- **2. csoport:** *a kampós végű acélszálak* esetében a maximális erő elérése – a tapadás megszűnése – után a szálkihúzó erő visszaesése figyelhető meg, majd egy viszonylag rövid szakaszon az erő csökkenése megáll. Feltehetőleg ekkor következik be a szál kampós végének deformációja (kiegyenesedése). A száldeformációt követően a szál súrlódva csúszik kifelé a próbatestből (1.b) diagram). A kampós végű acélszálak viselkedése a szakirodalomból már ismeretes [12-17], az általam megfigyelt viselkedés ehhez teljesen hasonló.

- **3. csoport:** *a hullámos alakú szálak* [hullámos kör keresztmetszetű acél (1.c) diagram), valamint hullámos kör keresztmetszetű műanyag (1.d) diagram)] erő – elmozdulás diagramjain megfigyelhető, hogy a maximális erő elérését követően (ekkor szűnik meg a tapadás a szál és az őt körülvevő habarcs között) jelentős mértékű csökkenés következik be a szálkihúzó erőben, majd több lokális csúcspont figyelhető meg. A lokális csúcspontok azzal magyarázhatók, hogy a tapadás megszűnte után a szál kihúzódsához száldeformációnak kell bekövetkeznie, ami helyi többlet teherbírást jelent. A hullámos alakú acélszálak viselkedése a szakirodalomból már ismeretes [15, 18], míg a hullámos műanyag szálak viselkedésének bemutatása új eredmény.

- **4. csoport:** *az egyenes, bordázott műanyag szál* erő – elmozdulás diagramjain megfigyelhető, hogy a maximális erő elérését követően folyamatos csökkenés következik be a szálkihúzó erőben miközben több lokális csúcspont figyelhető meg (1.e) diagram). Az erő –

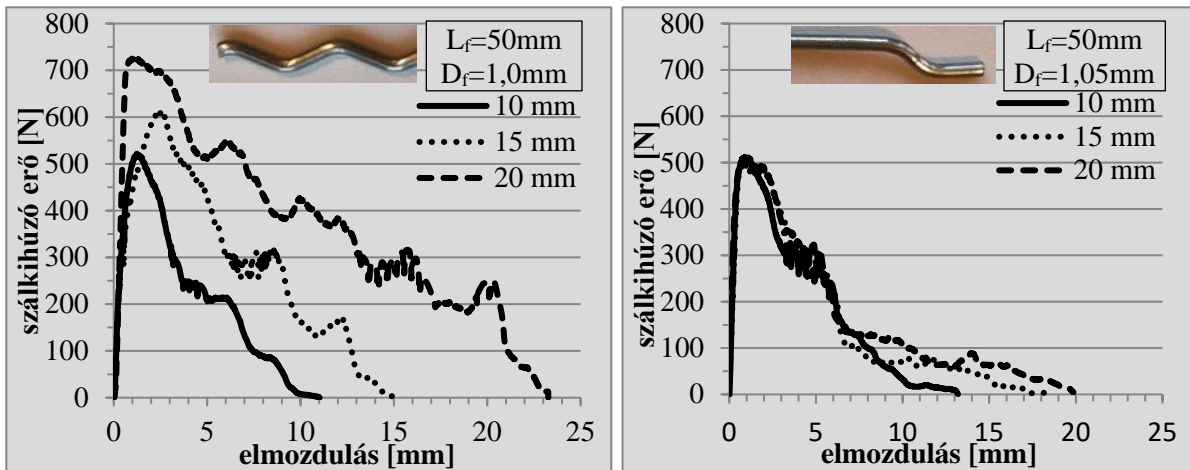
elmozdulás diagram ezen a szakaszon megfigyelhető hullámos alakja a szál bordázott felületének kihúzódásával magyarázható.



1.ábra: Jellemző tönkremeneteli módok különböző alakú szálak szálkihúzása során (egyedi értékek; L_f : a szál hossza; D_f : a szál átmérője)

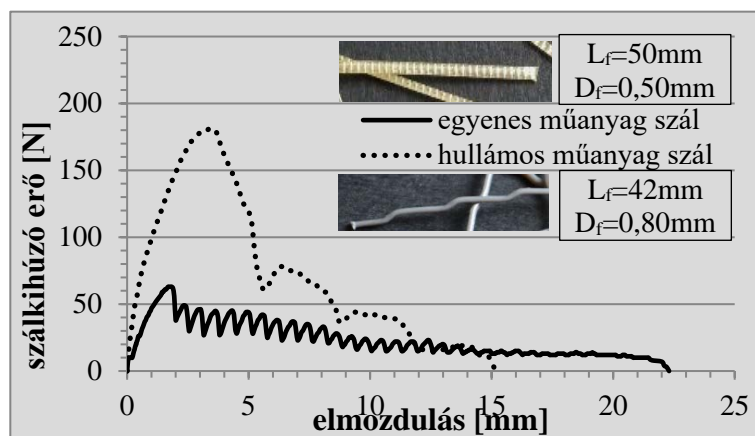
1.2. altézis: Az általam vizsgált acélszálak (gombostű fejú: $L_f=54\text{mm}$, $D_f=1,0\text{mm}$; kampós végű: $L_f=50\text{mm}$, $D_f=1,05\text{mm}$; hullámos alakú $L_f=50\text{mm}$, $D_f=1,0\text{mm}$; hullámos-lapos: $L_f=50\text{mm}$, keresztmetszet: $0,75 \times 2,70\text{ mm}$) közül a kampós végű szálak a legkedvezőbbek, a hozzájuk tartozó szálkihúzó erő, a szál kihasználtsága, valamint a szálak különböző paraméterekre való érzékenysége (szórása) szempontjából, különös tekintettel a beágyazási

hosszra. A legnagyobb szálkihúzó erő értékeket a gombostűfejű acélszálnál figyeltem meg, de ebben az esetben a szászakadás aránya nagyon magas volt. A kampós végű acélszálnál mért szálkihúzó erők nagysága, bár alacsonyabb a hullámos acélszálakhoz képest, de sem a beágyazási hossz sem a v/c tényező nem befolyásolta jelentős mértékben a nagyságukat. A hullámos acélszálak érzékenyek a beágyazási hossz változására, ezért ezek alkalmazása több bizonytalanságot rejt magában.



2.ábra: Hullámos és kampós végű acélszálak jellemző erő – elmozdulás diagramjai a beágyazási hossz függvényében $v/c=0,4$ esetén (egyedi értékek; L_f : a szál hossza; D_f : a szál átmérője)

1.3. altézis: Az általam vizsgált makro műanyag szálak (egyenes, bordázott: $L_f=50$ mm, $D_f=0,5$ mm; hullámos alakú: $L_f=42$ mm, $D_f=0,8$ mm) közül a hullámos alakú szálak kedvezőbbek, ugyanis a hozzájuk tartozó szálkihúzó erő több, mint kétszerese, mint az egyenes, bordázott műanyag szálak esetében. Alacsony v/c tényező esetén ($v/c=0,4$) azonban figyelembe kell venni, hogy a hullámos műanyag szálak elszakadhatnak, míg a bordázottak kihúzódnak. Ez a szál hullámos alakjával magyarázható (jobb mechanikai tapadás).



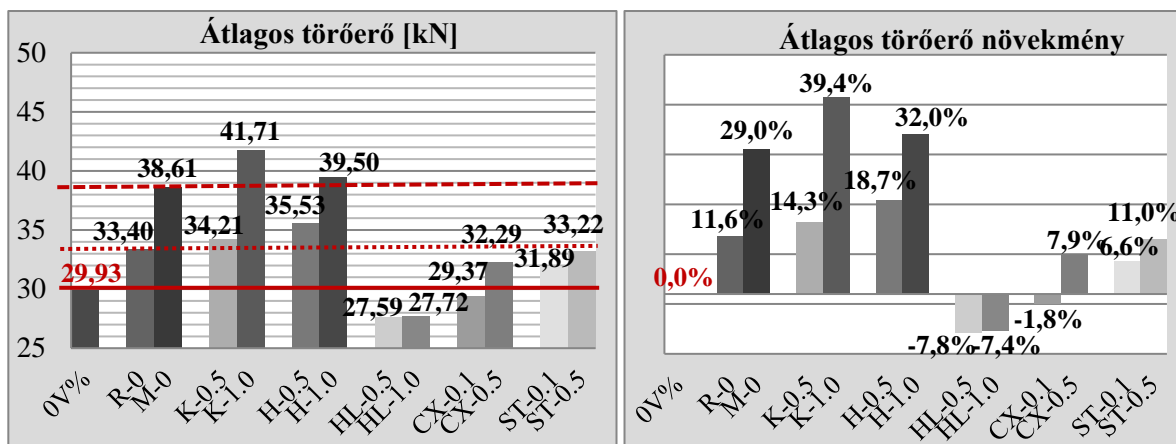
3.ábra: Az általam vizsgált makro műanyag szálak jellemző erő – elmozdulás diagramjai $v/c=0,5$ esetén (egyedi értékek; L_f : a szál hossza; D_f : a szál átmérője)

2. tézis: Kísérletileg igazoltam, hogy a kampós végű ($L_f=50$ mm, $D_f=1,05$ mm) és a hullámos alakú ($L_f=35$ mm, $D_f=0,90$ mm) acélszálak alkalmasak a hagyományos kengyelezés kiváltására (2.1. altézis), míg az általam vizsgált makro műanyag szálak (egyenes, bordázott: $L_f=50$ mm, $D_f=0,5$ mm; hullámos alakú: $L_f=42$ mm, $D_f=0,8$ mm) csak a kengyelezés egy részének kiváltására alkalmasak (2.2. altézis és 2.3. altézis) [f, g].

2.1. altézis: Az általam vizsgált acélszál típusok közül a nyírási teherbírás tekintetében a hagyományos kengyelezés kiváltására a kampós végű ($L_f=50$ mm, $D_f=1,05$ mm), illetve a hullámos alakú ($L_f=35$ mm, $D_f=0,90$ mm) acélszálak alkalmasak, minimum 1,0 V% száladagolással, azonban a hullámos-lapos acélszálak ($L_f=50$ mm, keresztmetszet: $0,75 \times 2,7$ mm) nem alkalmasak vasbeton gerendák nyírási teherbírásának növelésére és ezáltal a kengyelezés kiváltására [f, g].

Az 1,0 V% - ban adagolt kampós végű vagy hullámos alakú acélszál esetén már a repesztő nyírószilárdság növekmény is számottevő volt (hullámos acélszál esetén a növekmény 16,2%, kampós végű acélszál esetében pedig 24,4% volt).

A szálak nyírási teherbírásra gyakorolt hatékonyságát három referencia gerendához tartozó teherszint elemzésével végeztem el (lásd 4. ábra). A sűrű kengyelezéssel ellátott gerendákhoz tartozó teherbírás szintet csak az 1,0 V%-ban adagolt kampós végű és hullámos alakú acélszálak tudták teljesíteni. A hullámos-lapos alakú acélszálak nem alkalmasak vasbeton gerendák nyírási teherbírásának növelésére és ezáltal a kengyelezés kiváltására. A kampós végű és hullámos acélszálak kis mennyiségben (0,5 V%) adagolva kis mértékben meghaladták a ritka kengyelezéshez tartozó teherbírás szintjét. A makro műanyag szál erősítésű gerendák esetén a ritka kengyelezéssel ellátott gerendákhoz tartozó teherbírás szintet csak a 0,5 V%-ban adagolt műanyag szálakkal tudtam megközelíteni. A hullámos műanyag szál esetén kis mennyiségű szál adagolás mellett is megfigyelhető volt teherbírás növekmény, de a ritka kengyelezés teherbírás szintjét ezen mennyiségű száladagolással nem lehetett elérni. Az acélszálak esetleges korróziója miatt, kültéri alkalmazás esetén, azonban megfontolandó a ritka kengyelezés és a makro műanyag szálak együttes alkalmazása is.

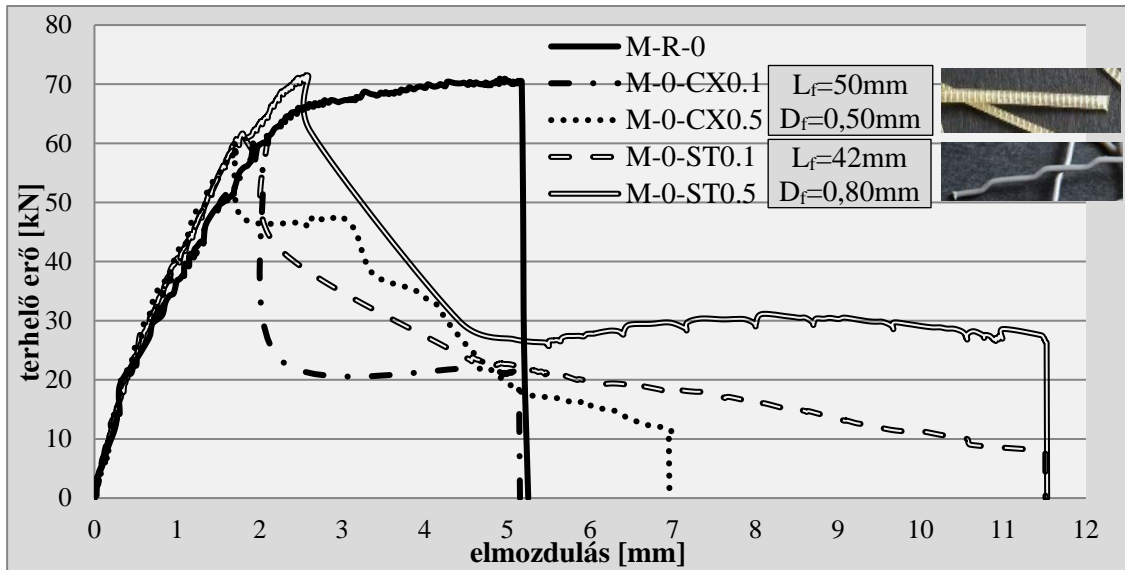


4.ábra: Az átlagos törőerő és a törőerő-növekmény értéke a szálak típusa és mennyisége függvényében

(Az ábra jelöléseinek magyarázata: szálerősítés nélküli gerendák esetében az R-0 a ritka kengyelezésű, az M-0 a sűrű kengyelezésű, 0% pedig a kengyelek nélküli gerendákat jelöli; szálerősítésű gerendák esetén a betű a szál típusára utal: K – kampós végű acélszál, H – hullámos acélszál, HL – hullámos-lapos acélszál, CX – egyenes, bordázott műanyag szál, ST – hullámos műanyag szál, a szám pedig a szálmennyiségek jelöli V%-ban.)

2.2. altézis: Kísérletileg igazoltam, hogy a 0,5 V% mennyiségben adagolt makro műanyag szálak (egyenes, bordázott: $L_f=50$ mm, $D_f=0,5$ mm; hullámos alakú: $L_f=42$ mm, $D_f=0,8$ mm) a nyírási vasalás (kengyelezés) egy részének kiváltására alkalmasak, annak ellenére, hogy a repesztő nyírószilárdság nagyságát a kezdeti szakaszon kedvezőtlenül befolyásolták [f, g].

2.3. altézis: Az általam vizsgált makro műanyag szálak közül a jobb tapadó képességgel rendelkező hullámos szálak ($L_f=42$ mm, $D_f=0,8$ mm) már 0,1 V%-ban is hatékonyan bizonyultak, míg az egyenes, bordázott műanyag szálak ($L_f=50$ mm, $D_f=0,5$ mm) ekkora mennyiségben egyáltalán nem bizonyulnak hatékonyan a nyírási teherbírás növelése szempontjából [f, g].



5.ábra: Makro műanyag szál erősítésű vasbeton gerendák jellemző erő – elmozdulás diagramjai (egyedi értékek)

3. tézis: Kísérleteim alapján módosító javaslatot teszek Narayanan és Darwish (3.1. altézis), illetve Al-Ta'an és Al-Feel (3.2. altézis) kutatók által, az acélszál erősítésű vasbeton gerendák nyírési törőteherbírás számítására, javasolt egyenletek műanyag szálakra történő kiterjesztésére [h].

Narayanan és Darwish [5] valamint Al-Ta'an és AL-Feel [6] kutatók által javasolt egyenletek acélszál erősítésű, hagyományos nyírési vasalás (kengyelek) nélküli vasbeton gerendák nyírési törőteherbírás számításának különböző acélszál típusokra, illetve makro műanyag szálakra történő kiterjesztésére teszek javaslatot.

Narayanan és Darwish [5] kutatók az acélszál erősítésű, hagyományos nyírési vasalás (kengyelek) nélküli vasbeton gerendák törő-nyírószilárdságának számítására a következő javaslatot tették:

$$v_u = 2,8 \cdot \frac{d}{a} \left[0,24 \cdot f_{spfc} + 80 \cdot \rho_s \cdot \frac{d}{a} \right] + 0,41 \cdot \tau_f \cdot F \quad \frac{a}{d} \leq 2,8 \quad (1)$$

ahol,

f_{spfc} : szálerősítésű betonkeverék hasító-húzószilárdsága [MPa]

$$f_{spfc} = \frac{f_c}{20 - \sqrt{F}} + 0,7 + \sqrt{F}$$

f_c : szálerősítésű betonkeverék nyomószilárdsága [MPa]

$$F = \frac{L_f}{D_f} \cdot V_f \cdot d_f \quad \text{: száltényező}$$

L_f : a szál hossza [mm] D_f : a szál átmérője [mm] V_f : a szál mennyisége [V%]

d_f : a szál alakjától függő konstans érték, mely

kör keresztmetszetű egyenes acélszál esetén 0,5

hullámos acélszál esetében pedig 0,75

τ_f : tapadószilárdság a szál és az azt körülvevő beton között, melynek értékét a kutatók 4,15 MPa-ra vették fel

$\rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d}$: húzott vashányad [%]




b : a keresztmetszet szélessége [mm] d : a hatékony magasság [mm]

A_s : a húzott vasalás mennyisége [mm²]

a : a gerenda nyírt szakaszának hossza [mm]

3.1. altézis: Kísérleteim alapján Narayanan és Darwish kutatók egyenletében (1) a szál alakjától függő (d_f) tényező, valamint a tapadószilárdság (τ_f) értékeinek kiterjesztése szükséges, melyek általam javasolt értékeit a 2. táblázatban adom meg. A τ_f tapadószilárdság és a d_f tényező értékei a saját mérési eredményeim alapján kerültek meghatározásra.

2. táblázat: A τ_f és d_f paraméterek általam javasolt értékei Narayanan és Darwish kutatók törő-nyírószilárdság számítására ajánlott egyenletéhez (1)

| szál típusa | τ_f [MPa] | d_f [-] |
|--|----------------|-------------|
| kampós végű acélszál [$L_f=50$ mm, $D_f=1,05$ mm]  | 8,35 | 0,50 |
| hullámos alakú acélszál [$L_f=35$ mm, $D_f=0,9$ mm]  | 11,09 | 0,35 |
| hullámos-lapos acélszál [$L_f=50$ mm, keresztmetszet: 0,75x2,7 mm]  | 9,95 | 0,10 |
| egyenes, bordázott műanyag szál [$L_f=50$ mm, $D_f=0,5$ mm]  | 1,52 | 0,50 |
| hullámos alakú műanyag szál [$L_f=42$ mm, $D_f=0,8$ mm]  | 3,78 | 0,65 |

Al-Ta'an és Al-Feel kutatók [6] az acélszál erősítésű, hagyományos nyírási vasalás (kengyelek) nélküli vasbeton gerendák törő-nyírószilárdságának számítására a következő javaslatot tették:

$$v_u = \left[1,6 \cdot \sqrt{f_c} + 960 \cdot \rho_s \cdot \frac{d}{a} \cdot \left(2,5 \cdot \frac{d}{a} \right) + 8,5 \cdot K \cdot V_f \cdot \frac{L_f}{D_f} \right] / 9 \quad \frac{a}{d} < 2,5 \quad (2)$$

ahol,

f_c : szálerősítésű betonkeverék nyomószilárdsága [MPa]

L_f : a szál hossza [mm] D_f : a szál átmérője [mm] V_f : a szál mennyisége [V%]

K : a szál alakjától függő konstans érték, mely

egyenes acélszál esetén 1,0

kampós végű acélszál esetén 1,2

hullámos acélszál esetében 1,3

$\rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d}$: húzott vashányad [%]






b : a keresztmetszet szélessége [mm] d : hatékony magasság [mm]

A_s : a húzott vasalás mennyisége [mm²]

a : a nyírt szakasz hossza [mm]

3.2. altézis: Kísérleteim alapján Al-Ta'an és Al-Feel kutatók egyenletében (2) a szál alakjától függő (K) tényező értékeinek kiterjesztése szükséges, melyek általam javasolt értékeit a 3. táblázatban adom meg.

3. táblázat: A K tényező általam javasolt értékei Al-Ta'an és Al-Feel kutatók törőnyírószilárdság számítására ajánlott egyenletéhez (2)

| szál típusa | K [-] |
|--|-------------|
| kampós végű acélszál [$L_f=50$ mm, $D_f=1,05$ mm]  | 1,80 |
| hullámos alakú acélszál [$L_f=35$ mm, $D_f=0,9$ mm]  | 1,80 |
| hullámos-lapos acélszál [$L_f=50$ mm, keresztmetszet: 0,75x2,7 mm]  | 0,20 |
| egyenes, bordázott műanyag szál [$L_f=50$ mm, $D_f=0,5$ mm]  | 0,70 |
| hullámos alakú műanyag szál [$L_f=42$ mm, $D_f=0,8$ mm]  | 1,80 |

5. ÖSSZEGZÉS

PhD kutatásomban az acél és a makro műanyag szálerősítés hatását vizsgáltam vasbeton gerendák nyírási teherbírására laboratóriumi kísérletek segítségével. A kutatáshoz kapcsolódó kísérleteimet két ütemben végeztem el. Az első ütemben a különböző anyagú és alakú szálak tapadási tulajdonságait vizsgáltam száلكihúzó kísérletek segítségével. A második ütemben, a száلكihúzó vizsgálatok eredményei alapján kiválasztott száltípusokkal, szálerősítésű, hagyományos nyírási vasalás (kengyelek) nélküli vasbeton gerendák nyírási teherbírását vizsgáltam.

A száلكihúzó vizsgálataim során az erő – elmozdulás diagram jellegét tekintve, négy különböző lefutást figyeltem meg, és a vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy az általam vizsgált acél- és műanyag szálak közül az acélszálak esetében a kampós végű, míg a műanyag szálak esetén a hullámos alakú szálakat javaslom alkalmazni vasbeton gerendák nyírási teherbírásának növelése céljából.

A nyírási teherbírás vizsgálataim alapján igazoltam, hogy a makro műanyag szálak 0,5 V% mennyiségben adagolva, alkalmasak a nyírási vasalás (kengyelek) egy részének kiváltására valamint, hogy a jobb tapadó képességgel rendelkező hullámos műanyag szálak már kisebb mennyiség esetén (0,1 V%) is hatékonyak lehetnek. Az általam vizsgált acélszál típusok közül a nyírási teherbírás tekintetében a kengyelezés kiváltására a kampós végű illetve a hullámos alakú acélszálak alkalmazását javaslom minimum 1,0 V% száladagolással. A kísérleteim alapján javaslatot tettem Narayanan és Darwish [5], valamint Al-Ta'an és Al-Feel [6] kutatók által, az acélszál erősítésű, hagyományos nyírási vasalás (kengyelek) nélküli, vasbeton gerendák nyírási törőteherbírásának számítására javasolt egyenletek különböző acélszál típusokra, illetve makro műanyag szálakra történő kiterjesztésére.

A kísérleteim alapján számos új eredményt kaptam a különböző anyagú és alakú szálak száلكihúzódsának folyamatáról és a tapadószilárdság értékéről. Módosító javaslataim hozzásegítenek az acél és a makro műanyag szálerősítésű, hagyományos nyírási vasalás (kengyelek) nélküli vasbeton gerendák nyírási törőteherbírásának számításához, megkönnyítve ezzel a statikai méretezést.

Jelen kutatásom folytatását, illetve fejlesztését a következő irányokban tartom szükségesnek:

- a piacon megjelenő új típusú szálak vizsgálata pl. 3D és 4D acélszálak,
- a szálerősítésű vasbeton gerendák repesztő-nyírószilárdságának meghatározása laboratóriumi méréssel (olyan mérési elrendezés kidolgozása mely során a gerendák mindkét oldala vizsgálható az optikai mérőrendszer segítségével),

- a gerendák repesztő nyírószilárdságának számítására, más kutatók által javasolt összefüggések különböző acélszál típusokra, illetve makro műanyag szálakra történő kiterjesztése.

6. HIVATKOZÁSOK A TÉZISFÜZETBEN

- [1] Dr. Balázs L. György, Polgár László: *A szálerősítésű betonok múltja, jelene és jövője, Szálerősítésű betonok - a kutatástól az alkalmazásig – konferencia kiadvány, (1999), 1-23.*
- [2] Dr. Kovács Károly: *Száltípusok és azok jellemzői, Szálerősítésű betonok - a kutatástól az alkalmazásig – konferencia kiadvány, (1999), 49-56.*
- [3] A. Grimaldi, A. Meda, Z. Rinaldi: *Experimental behaviour of fibre reinforced concrete bridge decks subjected to punching shear, Composites: Part B, 45 (2013), 811-820.*
- [4] Hyun-Ho Lee: *Shear strength and behavior of steel fiber reinforced concrete columns under seismic loading, Engineering Structures, 29 (2007), 1253-1262.*
- [5] R. Narayanan, I.Y.S. Darwish: *Use of steel fibers as shear reinforcement, ACI Journal, 84 (1987), 216-227.*
- [6] S.A. Al-Ta'an, J.R. Al-Feel: *Evaluation of shear strength of fibre-reinforced concrete beams, Cement & Concrete Composites, 12 (1990), 87-94.*
- [7] Victor C. Li, Robert Ward, Ali M. Hamza: *Steel and synthetic fibers as shear reinforcement, ACI Materials Journal, 89 (1992), 499-508.*
- [8] Samir A. Ashour, Ghazi S. Hasanain, Faisal F. Wafa: *Shear behaviour of high-strength fiber reinforced concrete beams, ACI Structural Journal, 89 (1992), 176-184.*
- [9] Madhusudan Khuntia, Bozodar Stojadinovic, Subhash C. Goel: *Shear strength of normal and high-strength fiber reinforced concrete beams without stirrups, ACI Structural Journal, 96 (1999), 282-290.*
- [10] Yoon-Keun Kwak, Marc O. Eberhardt, Woo-Suk Kim, Jubum Kim: *Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups, ACI Structural Journal, 99 (2002), 530-538.*
- [11] Emma Slater, Moniruzzaman Moni, M. Shahria Alam: *Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams, Construction and Building Materials, 26 (2012), 423-436.*
- [12] A. Pompo, P. R. Stupak, L. Nicolais, B. Marchese: *Analysis of steel fibre pull-out from a cement matrix using video photography, Cement & Concrete Composites, 18 (1996), 3-8.*
- [13] M. Jamal Shannag, Rune Brincker, Will Hansen: *Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites, Cement and Concrete Research, 27 (1997), 925-936.*
- [14] F. Laranjeira, C. Molins, A. Aguado: *Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers, Cement and Concrete Research, 40 (2010), 1471-1487.*
- [15] Edmunds Zile, Olga Zile: *Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers, Cement and Concrete Research, 44 (2013), 18-24.*
- [16] T. Soetens, A. Van Gysel, S. Matthys, L. Taerwe: *A semi-analytical model to predict the pull-out behaviour of inclined hooked-end steel fibers, Construction and Building Materials, 43 (2013), 253-265.*
- [17] Yun Lee, Su-Tae Kang, Jin-Keun Kim: *Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix, Construction and Building Materials, 24 (2010), 2030-2041.*
- [18] Gilles Chanvillard, Pierre-Claude Aitcin: *Pull-out behavior of corrugated steel fibers, Advanced Cement Based Materials, 4 (1996), 28-41.*

7. A DISSZERTÁCIÓ TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓIM

- [a] Halvax Katalin, Lubl6y va: *Szler6st6s betonok alkalmazsi terlete*, Beton, 20 (2012), pp. 3-8.
- [b] Halvax Katalin, Lubl6y va: *Aclszlak tapad6szilrdsgnak vizsgálata*, pt6anyag, 3-4 (2012), pp. 41-45.
- [c] Katalin Halvax, va Lubl6y: *Steel fiber reinforced concrete – shear strength*, Acta Technica Jaurinensis, 5 (2012), pp. 149-166.
- [d] Katalin Halvax, va Lubl6y: *Investigation of steel fibers bond strength in mortar matrix*, Pollack Periodica, 8 (2013), pp. 101-110.
- [e] Katalin Halvax, va Lubl6y: *Pull-out behavior of steel fibers*, Proceedings of the 7th International Conference Fibre Concrete 2013, Prague, Czech Republic (2013), 10 p.
- [f] Katalin Halvax, va Lubl6y: *Investigation of SFRC beams shear load bearing capacity*, Proceedings of the Second International Conference for PhD Students in Civil Engineering and Architecture, Cluj-Napoca, Romania (2014), pp. 398-405.
- [g] Halvax Katalin, Lubl6y va: *Szler6st6s beton nyrsi teherbrsnak vizsgálata*, Vasbetonpt6s, (megjelen6s alatt)
- [h] Halvax Katalin, Lubl6y va: *Szler6st6s betonok nyrsi teherbrsnak szmt6sa*, Vasbetonpt6s, (megjelen6s alatt)