

GFRP BETÉTEK MECHANIKAI ÉS TAPADÁSI VISELKEDÉSÉNEK NUMERIKUS VIZSGÁLATA HŐMÉRSÉKLETI TERHELÉS HATÁSÁRA



Szél Stefánia Mária - Szinvai Szabolcs

<https://doi.org/10.32969/VB.2025.4.1>

Hagyományos acélbetétekkel vasalt vasbeton szerkezetek élettartamát a betétek korróziója csökkenti. Ahol a tartósság kiemelten fontos, vagy a szerkezet agresszív környezetnek van kitéve, megoldás lehet a nem acél anyagú betétek alkalmazása, amik anyagösszetételükből fakadóan mentesülnek az elektrolitikus korrózió alól. Ilyen anyag az üvegszál-erősítésű polimer (GFRP). A GFRP betétek kiemelten jó tartóssági tulajdonságaik mellett könnyűek, jól vághatóak és nem mágnesezhetőek, így alkalmazásuk sokrétű lehet. Hőmérsékleti terhelésnek kitétt szerkezetek esetén azonban a mátrix (ágyazóanyag) alacsony üvegesedési hőmérséklete problémát jelenthet. A cikkben GFRP betétek mechanikai és tapadási viselkedését vizsgálták numerikus szimuláció segítségével hőterhelés hatására. Nemlineáris végelelemes modellek készültek ATENA szoftver segítségével, ahol a mátrix és a beton térfogatelemekkel lettek definiálva, a szálak pedig beágyazott vonalelemekként jelentek meg. A megemelkedett hőmérséklet hatására a mátrix rugalmassági modulusa lecsökkent, aminek hatására a modellekben a szálak együttléteződésének hatékonysága jelentősen leromlott, így a vizsgált betét veszített merevségéből és szakítószilárdságából is. A beton és a betét közötti együttléteződés is a mátrixon keresztül valósul meg. Az eredmények azt mutatták, hogy a hőmérséklet emelésével a beton és a betét közötti relatív elmozdulások egyre növekszenek, míg nem egy kritikus hőmérséklet esetén tapadási tönkremenetel következett be.

KULCSSZAVAK: GFRP, szakító vizsgálat, kihúzó vizsgálat, hőmérsékleti terhelés

1. BEVEZETÉS

A kompozit anyagok különböző anyagok kombinációjával jönnek létre, és kedvezőbb tulajdonságokat biztosítanak, mint az alkotóelemek külön-külön. A természetben is előfordulnak (pl. fa), és az ember is régóta használja őket (pl. sár és szalma keveréke). A GFRP mérnöki alkalmazása először a repülőgépek és hajógyártásban jelent meg, majd az autópárhuzamosan is elterjedt, főként kedvező mechanikai és kémiai tulajdonsága miatt. Az építőmérnöki alkalmazásuk az 1960-as években kezdődtek (Bank, 2006), főleg pultrúziós eljárással készült szénszálas termékekkel, amelyeket vasbeton és falazott szerkezetek megerősítésére használtak, újabban pedig acélszerkezetek esetében is vizsgálják a használhatóságukat. Mivel a vasbeton acélbetétei korrózióra hajlamosak, ez komoly fenntartási problémákat okoz, gyakran már a tervezett élettartamon belül is. A nagy karbantartási költségek, valamint az agresszív környezetnek kitétt szerkezetek miatt alternatív megoldásokat kell keresni. Erre megoldás az üvegszál-erősítésű polimer (GFRP) betétek.

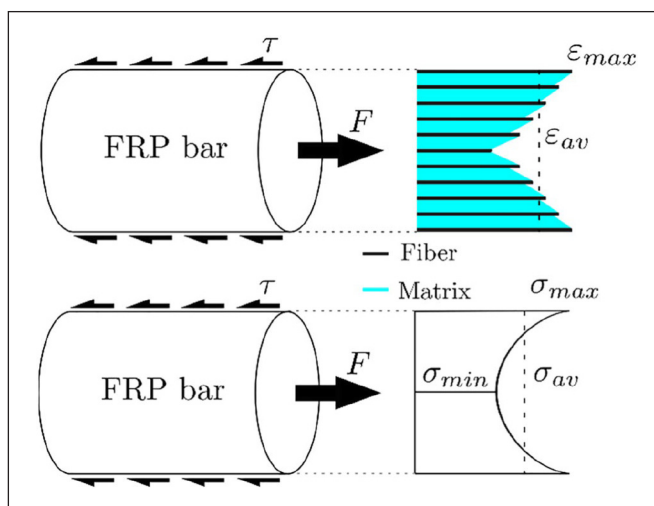
1.1 Mechanikai viselkedés

A GFRP betétek kompozit anyagok, ahol a szálak egymással párhuzamosan, tengelyirányban futnak. Ebből fakadóan viselkedésük anizotrop. A gyenge mátrixnak (ágyazóanyagnak) köszönhetően tengelyirányban mechanikai tulajdonságaik

kiválóak, míg tengelyirányra merőlegesen ezek a tulajdonságok egy nagyságrenddel rosszabbak. A GFRP betétek tengelyirányban jellemzően 50-60 GPa rugalmassági modulusal rendelkeznek, rövid idejű szakítószilárdságuk várható értéke pedig 1000-1500 MPa körül mozog. A szakítószilárdság értéke függ a betétek átmérőjétől is, az úgynevezett shear lag hatásnak köszönhetően.

A shear lag hatás lényege, hogy a húzóerő nem egyenletesen oszlik el az FRP rudak elemi szálai között a mátrix nyírási deformációja miatt. A kisebb merevségű mátrix nem tudja teljesen egységesen továbbítani az erőket, így a külső szálak nagyobb feszültséget vesznek fel, míg a belső szálak kevesebbet. Ennek következménye, hogy a keresztmetszeten belül nem egyenletes a feszültségeloszlás, és a nagyobb átmérőjű betétek-nél ez az egyenlőtlenség fokozódik, tehát csökken az átlagos szakítószilárdság. Ezt mutatja be az 1. ábra. A tönkremenetel során először a külső szálak szakadnak el, mivel ezek vesznek fel a legnagyobb feszültséget. Emiatt a szabványok, például a kanadai CSA-S806 (CSA, 2012), korlátozzák az FRP rudak maximális keresztmetszetét (500 mm²), hogy csökkentsék a shear lag hatás negatív hatásait.

A szakítóvizsgálat az anyagok mechanikai tulajdonságainak meghatározására szolgáló alapvető eljárás, melyet már Leonardo da Vinci is használt. A vizsgálat során egy próbatestet húzóerővel terhelnek egészen tönkremenetelig, miközben mérik az erőt és a hozzá tartozó alakváltozást. A



1. ábra: Shear lag hatás FRP betétekben

vizsgálat pontos végrehajtása kiemelten fontos, mivel kis pontatlanságok is jelentősen torzíthatják az eredményt. Az GFRP betétek szakítóvizsgálatának sajátossága, hogy a betétet egy ágyazóanyaggal kitöltött acélső segítségével fogják be a szakítógépekbe. A vizsgálathoz a szabványok ajánlásokat adnak a próbatest geometriájára (lehorgonyzási hossz), a mérési körülményekre (terhelési sebesség, hőmérséklet), és a mérési eszközökre (pl. extensometer).

Az FRP próbatesteknél jellemzően a szakítószilárdság, szakadó nyúlás és rugalmassági modulus értékek a legfontosabbak. Az ASTM D7205/D7205M-06 (ASTM, 2011) és CSA S806 (CSA, 2012) szabványok különböző vizsgálati módszereket írnak elő, ami jelentős különbségeket eredményezhet a kapott eredményekben. Jelen cikk az amerikai ASTM szabvány szerint végzett vizsgálati elrendezésre épül, amelyet a kettő közül gyakrabban alkalmaznak. A szakítóvizsgálati elrendezést a 2. ábra szemlélteti.

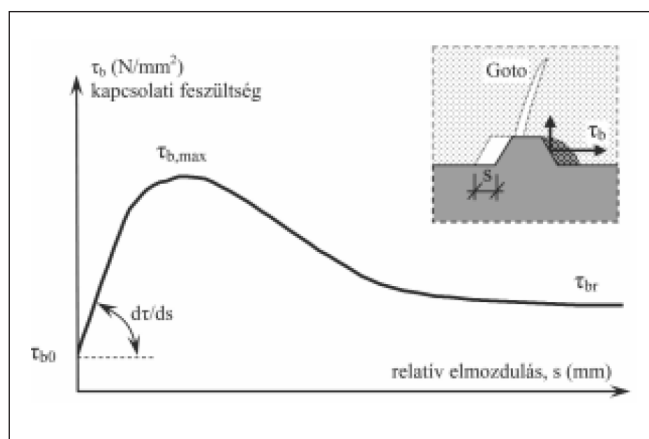
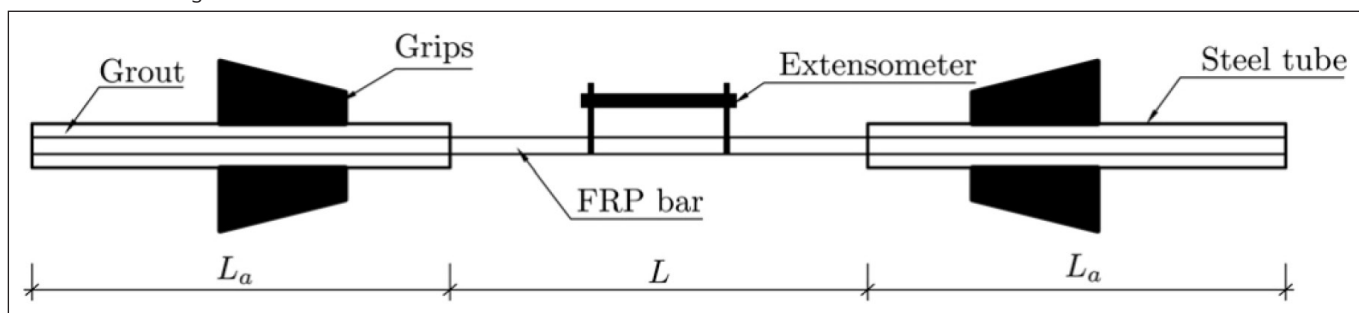
1.2 Tapadási viselkedés

Az FRP (szálerősítésű polimer) betétek tapadási viselkedése jelentősen eltér a hagyományos acélbetétektől, ami befolyásolni fogja az erőátadást, azaz a betonnal történő együttléteződést. A beton és a betétek közötti tapadás határozza meg, hogy a belső erők hogyan adódnak át az együttléteződő keresztmetszetben.

A tapadási viselkedést befolyásolja többek között az anyag inhomogenitás (különösen a külső rétegekben megnövelt mátrixanyag-tartalom miatt), a felületi kialakítás (lehet homokszórt, bordázott, rovátkolt stb.) és a hőmérséklet.

Míg acélbetéteknél a kapcsolat tönkremenetele jellemzően a betonfogak elnyíródásával történik, GFRP betétek esetén a tönkremeneteli mód sokféleképp lehet, és erősen függ a felületi kialakítástól. Mivel a mátrix anyag gyengébb, így elképzelhető kihúzóadás a GFRP betét felületének tönkremenetelével, például a GFRP bordázatának elnyíródásával is.

2. ábra: Szakítóvizsgálat sematikus elrendezése



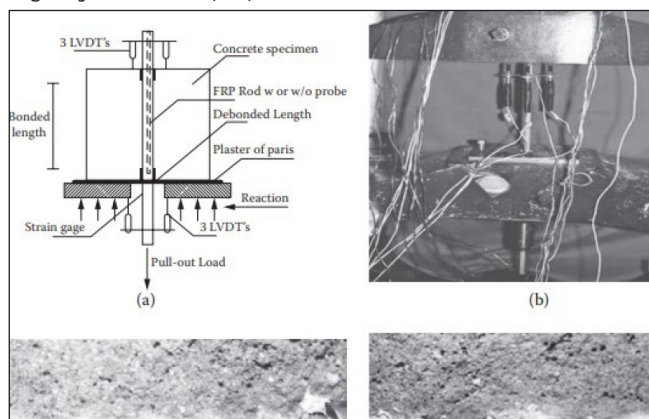
3. ábra: Tipikus tapadási feszültség-megcsúszás diagram

A tapadást két fő jellemzővel írják le: tapadási feszültség (τ), a betétben fellépő húzóerő osztva a teljes súrlódó felülettel; relatív elmozdulás (s), a beton és a betét elmozduláskülönbsége terhelés hatására. Ezeket laboratóriumi kihúzó vizsgálatokkal lehet meghatározni, az eredményeket az úgynevezett tapadási feszültség–elmozdulás (bond stress–slip) diagramokon ábrázolják (erre mutat példát a 3. ábra).

A kihúzó kísérlet (pullout test) célja a betonba ágyazott betétek (lehet betonacél, pászma vagy akár GFRP is) tapadási tulajdonságainak meghatározása. A kísérlet során a vizsgált betétet egyenletesen növekvő húzóerővel van terelve, miközben a beton próbatest valamilyen formában meg van támasztva. A mért adatok között van a terhelő erő, a terheletlen oldali megcsúszás, illetve fontos adat a terhelt oldali megcsúszás is. Így meghatározható a tapadási szilárdságot és következtetni lehet a szerkezeti viselkedésre valós terhelés hatására.

A kísérlet végrehajtására különböző nemzetközi szabványok adnak ajánlást, például az amerikai ACI, a kanadai CSA, valamint az európai Eurocode. A kihúzó kísérletek elrendezése többféle lehet, többek között kocka, direkt kihúzó és gerenda. A cikk csak a kocka kihúzó kísérlettel foglalkozik (erre látható példa a 4. ábrán).

4. ábra: Kocka kihúzó vizsgálati elrendezés (a), és példa sikeresen végrehajtott kísérletre (b-d)



1.3 Termodinamikai viselkedés

A szerkezetek tervezésekor figyelembe kell venni az üzemi és rendkívüli (pl. tűz okozta) hőmérsékleti hatásokat, kifejezetten GFRP-vel vasalt vasbeton szerkezetek esetén. A megemelkedett hőmérséklet kedvezőtlenül befolyásolja a GFRP betét szakító- és tapadási tulajdonságait.

A GFRP termodinamikai jellemzői, mint például a hővezetési tényező, a fajhő és a lineáris hőtágulási együttható, jelentősen eltérnek a hagyományos acélbetétektől. Az FRP betétek hőtágulása irányfüggő: tengelyirányban (α_L) elsősorban a szálak, míg keresztirányban (α_T) inkább a mátrix anyag jellemzői érvényesülnek. Az FRP típusától függően ezek az értékek eltérőek lehetnek, például a GFRP tengelyirányú hőtágulása $\sim 6\text{--}10 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, míg a CFRP esetén akár negatív is lehet. A tipikus értékeket az 1. táblázat foglalja össze. A gyakorlatban a használati hőmérséklet-tartományban az FRP betétek hőtágulása általában nem okoz problémát. Kritikusabb tényező az alkalmazott mátrix anyag üvegesedési hőmérséklete (T_g), amely meghatározza, hogy a kompozit anyag milyen hőmérsékletig őrzi meg mechanikai tulajdonságait. A T_g értéke poliészter gyanták esetén $70\text{--}100^\circ\text{C}$, vinilészter esetén $70\text{--}160^\circ\text{C}$, míg epoxigyanta esetén $70\text{--}175^\circ\text{C}$ közé esik. Szabvány ajánlás szerint szükségeszerű olyan GFRP betétet alkalmazni, amelynek mátrixa legalább 30°C -kal magasabb T_g -vel rendelkezik, mint a várható legnagyobb üzemi hőmérséklet. Rendkívüli hőhatás, például tűz esetén a mátrix lágyulása miatt romlik az erőátadás a szálak között, nő a shear lag hatás, és csökken a beton és betét közötti tapadás. Emellett, ha a betét bordázott, a hőmérsékletnövekedés a bordák merevségének csökkenéséhez, nagyobb elmozdulásokhoz és végső soron tönkremenetelhez vezethet.

1. táblázat: FRP betétek hőtágulási együtthatói

	$\alpha_{cl} [1/^\circ\text{C}]$	$\alpha_{ct} [1/^\circ\text{C}]$
GFRP	$6\text{...}10 \times 10^{-6}$	$21\text{...}23 \times 10^{-6}$
AFRP	$-2\text{...}-6 \times 10^{-6}$	$60\text{...}80 \times 10^{-6}$
CFRP	$-9\text{...}0 \times 10^{-6}$	$74\text{...}104 \times 10^{-6}$

2. PROBLÉMA FELVETÉS

GFRP betéteket előszeretettel alkalmaznak olyan esetekben amikor a tartósság kiemelten fontos, vagy a szerkezet agresszív környezetnek van kitéve. Megemelkedett hőmérséklet ilyen alkalmazásoknál előfordulhat például tűzhatásból magasépítési szerkezeteknél, biológiai bomlásból szennyvíztisztító létesítményeknél, de vízvetékeknél is, például termálvíz vezető csövek esetén.

Magas hőmérsékleten a polimergyanták lágyulnak, azaz csökken a rugalmassági modulusuk, nő a nedvességfelvétel képességük és csökken a szilárdságuk. GFRP betétek esetén ezek közül a rugalmassági modulus csökkenése fogja jelentősen rontani a betét viselkedését. A lágyulás miatt csökken a mátrix teherátadó képessége, így a szálak között a feszültségeloszlás egyenlőtlenebb lesz. Az átlagfeszültség a betét egy keresztmetszetén belül lecsökken, azaz a szakítószilárdság is kisebb lesz. Az erőátadás a beton és a betét között is a mátrixon keresztül valósul meg, így annak lágyulása a tapadási szilárdságot is kedvezőtlenül befolyásolja.

Emiatt a GFRP kompozitokat nem szabad az üvegesedési hőmérséklet felett használni. Ez tipikusan 70°C és 200°C között változik a gyantatípustól függően. A jelenlegi útmu-

tatók ajánlása szerint üzemi állapotban a hőmérsékletnek az üvegesedési hőmérséklet alatt kell lennie legalább 30°C -kal (ACI, 2015). Így felmerül a kérdés, hogy milyen hőmérsékleti körülmények között alkalmazhatóak biztonságosan GFRP betétek, illetve hogy hogyan biztosítható a megfelelő tűzállósága a GFRP-vel vasalt betonszerkezeteknek.

A cikk célja megvizsgálni GFRP betétek viselkedését a hőmérséklet emelésének függvényében mechanikai (tengelyirányú húzás) és tapadási szempontból.

3. MEGOLDÁSI STRATÉGIA

A vizsgálat végrehajtásához nemlineáris végelelemes modellek készültek ATENA szoftver környezetben. A modell építése GiD általános preprocesszor segítségével történt. A jelenségek vizsgálatához két kísérleti elrendezés lett modellezve, egy szakítóvizsgálat és egy kihúzó vizsgálat. Mindkét esetben egy 12 mm átmérőjű Schöck Combar (Schöck, 2022) betét került modellezésre. A modellezés során először statikus terhelés történt tönkremenetelig. Ebben a lépésben történt a verifikáció (megfelelő hálóméret meghatározása) és a validáció (eredmények összehasonlítása a szakirodalmi eredményekkel).

Következő lépésben hőmérsékleti hatás lett vizsgálva. Mind a szakító, mind a kihúzó modell esetében először üzemi teherszint (használatosági állapot) lett definiálva, majd a hőmérséklet egyenletes emelése következtében az alakváltozások monitorozása mellett következett be a tönkremenetel. A gyanta és a beton tulajdonságai hőmérsékletfüggőek voltak. A gyanta hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságai a gyártói adatokat alkalmaztuk.

4. NUMERIKUS MODELLEK

Két numerikus modell készült, egy szakító és egy kihúzó kísérleti. Mindkét esetben először statikus terhelés lett definiálva, egészen tönkremenetelig. Ez a szakító kísérleti modell esetében a szálak szakadását jelentette, a kihúzó kísérleti modell esetében pedig a kapcsolat tönkremenetelét, kihúzóadási tönkremenetelt. Ezen a modellen történt a verifikációs lépés (végelelemes háló és konvergencia ellenőrzése), valamint a validációs lépés (szakirodalmi eredmények alapján).

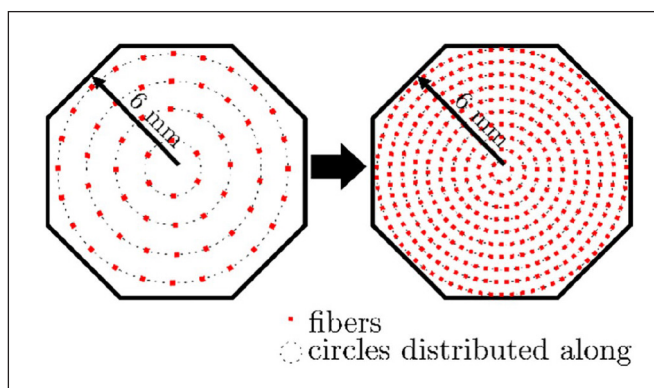
Következő lépésben üzemi teherszintű (használatosági teherintenzitás) teher lett definiálva a modellben, majd a hőmérséklet egyenletes emelése mellett következett be a tönkremenetel, miközben a mátrix és a beton anyagmodell hőmérséklettől függött.

4.1. Geometria

A szakító kísérleti elrendezésben egy 12 mm átmérőjű betét lett modellezve, közelítően kör keresztmetszettel. A modellezett szálak koncentrikus körök mentén helyezkednek el. Egy vonalelem több szálát modellezi. Az alkalmazott vonalelemek száma a verifikációs lépésben lett meghatározva (5. ábra).

A kísérleti elrendezésben 60 cm a szabad hossza a próbatestnek, és két oldalt $40\text{--}40 \text{ cm}$ a lehorgonyzó elem hossza (6. ábra). A bal oldali lehorgonyzó elem peremfeltételként szerepel, a jobb oldali lehorgonyzó elem pedig merev testként lett definiálva.

A modellezett kihúzó kísérletnél a kocka elrendezés szerinti méretek lettek felvéve, $5d$ tapadási hosszal, azaz 60 mm -el. A betét felületének modellezésére több lehetőség van, ezeket mutatja be a 7. ábra. Teljesen hű geometria modellezése pon-



5. ábra: A modellezett szálak elrendezése a keresztmetszetben a verifikációs lépés előtt (balra) és után (jobbra) (Szinvai, 2024)

tosabb eredményt adhat, de bonyolult (Szinvai, 2022), így az ábra jobb oldalán szereplő egyszerűsített geometria szerint lettek definiálva a betét bordái. A kísérleti elrendezésnek csak a negyede szerepel a modellben a 8. ábra szerint, kihasználva a szimmetria feltételeket.

4.2. Anyagok

A mátrix térfogatelemként, lineárisan rugalmas anyagmodellel lett definiálva. A rugalmassági modulusa $E = 3 \text{ GPa}$, Poisson tényezője pedig 0,4 volt (epoxy).

Az üvegszálak lineárisan rugalmas vonalelemként lettek definiálva. Az üvegszál rugalmassági modulusa $E = 80 \text{ GPa}$ -nak lett felvéve (gyártói adat), keresztmetszeti területe pedig az adott szálkiosztás és a szál-térfogat arány függvényében változott.

A beton szintén térfogat elemként jelenik meg, C50/60-as anyagminőséggel, annak szabvány szerinti várható értékeivel, és a programban definiált "CC3DNonLinCementitious2" anyagmodellel.

A beton és a betét között súrlódó kapcsolat lett definiálva, a validációs lépés alapján 0,3-as súrlódási tényezővel.

4.3. Peremfeltételek

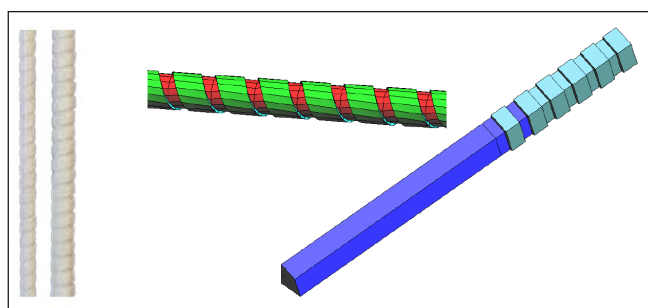
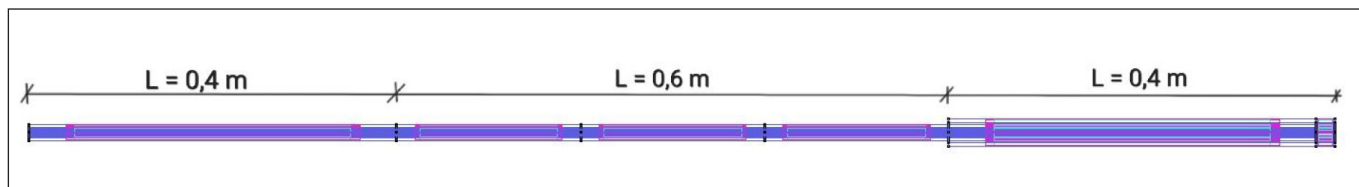
A peremfeltételeket a 9. ábra szemlélteti. A szakító kísérleti esetben a bal oldali lehorgonyzó elem mentén a külső felület tengelyirányban meg lett fogva, illetve a teljes hosszban az él mentén egy helyen keresztirányban lett definiálva megtámasztás, a modell stabilitásának eléréséhez.

A kihúzó kísérleti elrendezésnél a szimmetria feltételeknek megfelelő peremfeltételek mellett a terhelt oldalon egy teherelosztó acél lemez is megjelenik, ami a betét tengelyirányában lett megfogva.

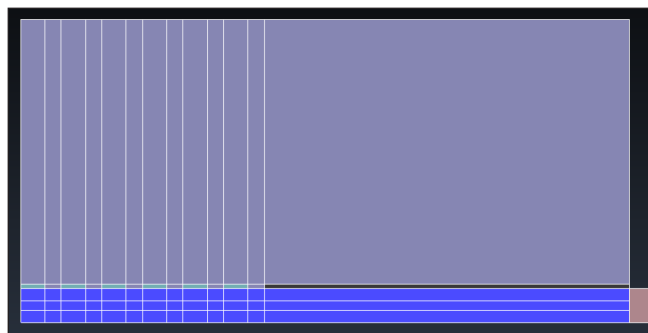
4.4. Végeselemes háló

A verifikációs lépés után alkalmazott végeselemes hálókat a 10. ábra szemlélteti. Mint látható a betét keresztmetszete mentén sűrű hálózásra volt szükség a shear lag hatás megfelelő modellezéséhez, valamint a kihúzó kísérlet esetén a tapadási hossz mentén egy jelentős hálósűrítés történt.

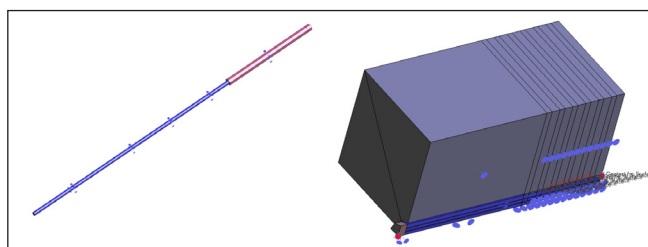
6. ábra: A szakító kísérleti elrendezés a modellben



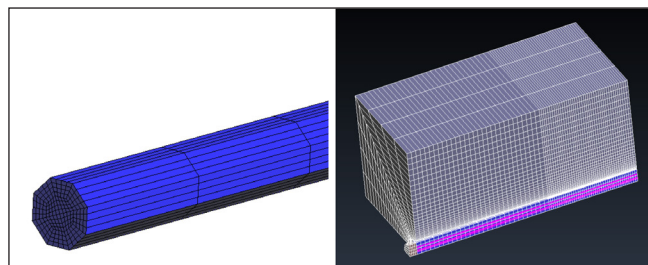
7. ábra: A valós GFRP betét, és a felületének modellezési lehetőségei



8. ábra: Modellezett kihúzó elrendezés oldalnézete



9. ábra: Peremfeltételek a szakító kísérleti elrendezésnél (balra) és a kihúzó kísérleti elrendezésnél (jobbra)

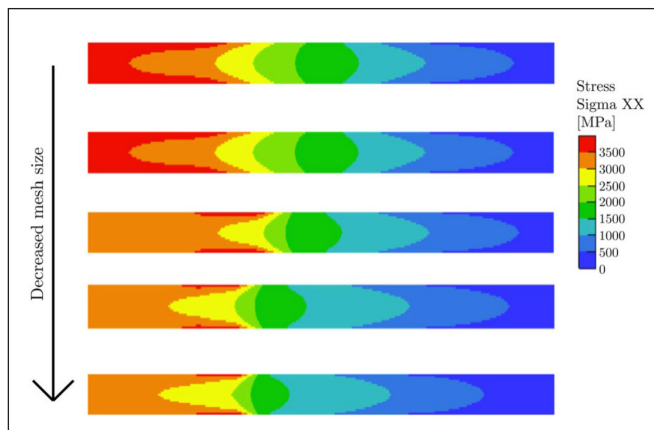


10. ábra: A modellben alkalmazott végeselemes háló a szakító kísérlet esetén (balra) és a kihúzó kísérlet esetén (jobbra)

5. EREDMÉNYEK

5.1 Szakító kísérlet

A szakirodalomban leírt ismeretek alapján a szálakban ébredő feszültségek egyre növekednek, ahogy haladunk a betét belsejétől a betét széle felé. A modellből kapott eredmények alapján a 11. ábrán látható, hogy a shear lag hatás már viszonylag nagy hálóméretnél és kis modellezett szál számnál is megjelenik, azonban a valósához közeli feszültségeloszlás csak a háló sű-



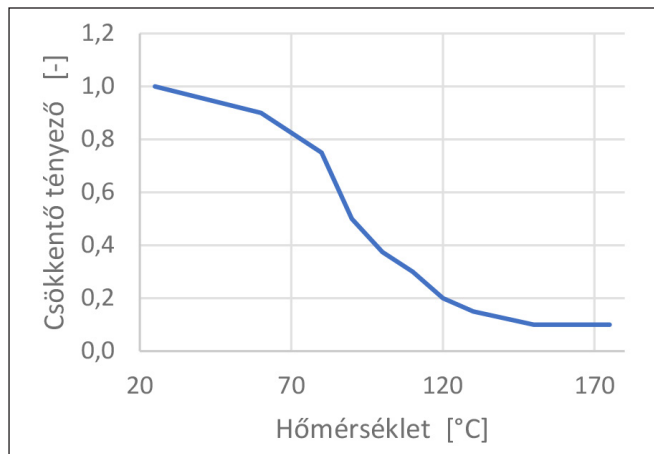
11. ábra: Szálakban ébredő húzófeszültségek [MPa] csökkenő hálóméreténél

ritése és a modellezett szálak számának növelése után alakult ki. Ezzel párhuzamosan az átlagfeszültség is egyre csökkent, azaz a szakítószilárdság is kisebb lett.

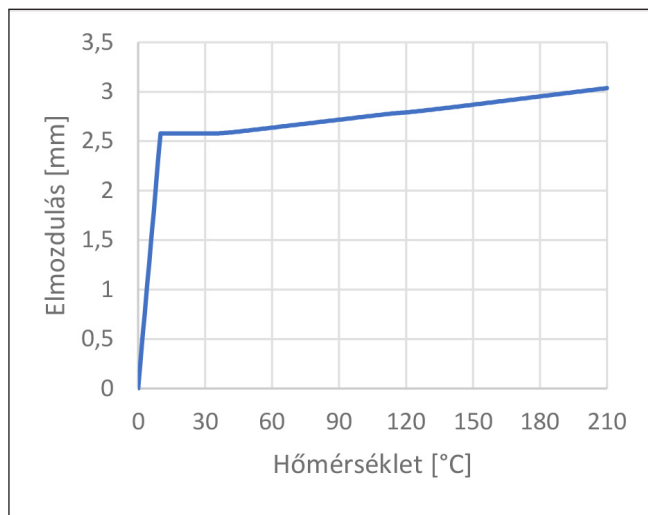
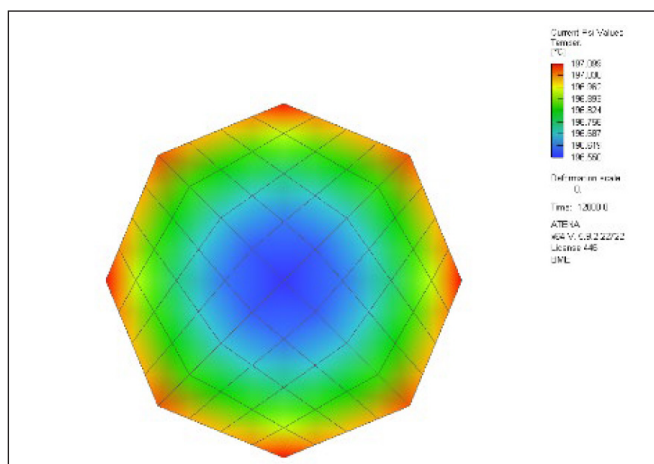
A modellnek nem célja a szakítószilárdság pontos meghatározása, hanem a rugalmassági modulus és a kompozit viselkedés (shear lag hatás) modellezése volt a cél. A statikus terhelés hatására a numerikus modellben a betét rugalmassági modulusa 60 GPa volt, ami a gyártó által megadott érték.

A statikus terhelés után a betétre üzemi teher szinten hatott hőmérsékleti hatás. Ezzel a GFRP betét alap viselkedési mechanizmusainak megértése volt a cél. A későbbiekben a modell felhasználható a GFRP betét hőmérséklettől függő szilárdságának meghatározására is. Ehhez különböző hőmérsékleti terhelés közben tönkremenetelig kell terhelni a vizsgált betétet. A

12. ábra: A mátrix rugalmassági modulusának változása a hőmérséklet függvényében



13. ábra: Hőmérséklet eloszlás keresztmetszeten belül



14. ábra: A terhelési pont elmozdulása a hőmérséklet függvényében

vizsgálati pontok pedig kirajzolják a GFRP betét viselkedését.

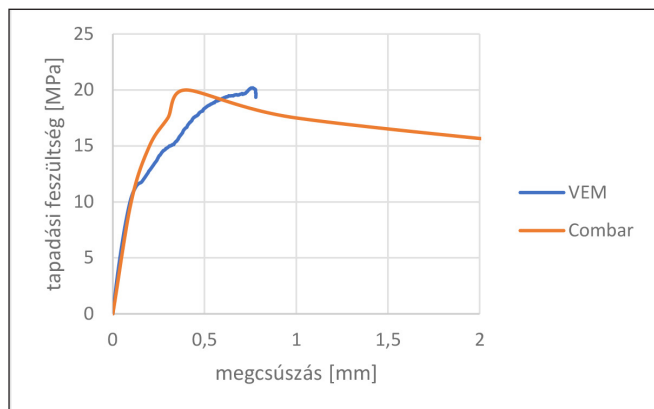
A hőmérsékleti terhelés során a mátrixnak hőmérsékletfüggő anyagtulajdonságai voltak. A mátrix rugalmassági modulusának változása a hőmérséklet függvényében a 12. ábrán látható. A 13. ábrán kirajzolódik a hőmérséklet eloszlás a betéten belül a maximális terhelési hőmérséklet (170 °C) elérésekor. Mint látható, a betét belsejében még lényegesen kisebb a hőmérséklet. Ezek után a hőmérséklet további emelésével, ahol a mátrix már elérte a 170 °C-ot, további merevségcsökkenés már nincs definiálva, de a betét belsejében tovább emelkedett a hőmérséklet.

Ezzel párhuzamosan a konstans terhelő erőhöz tartozó elmozdulás is növekedett. A csökkent merevség miatt az ugyanakkora terhelő erőhöz tartozó elmozdulás megnőtt. Látható, hogy 170 °C-os terhelő hőmérséklet növelése után is még növekedett az elmozdulás, mert a betét belsejében még lényegesen kisebb volt a hőmérséklet.

A tönkremenetel lényegében a szálak közötti feszültségeloszlás átrendeződésével következett be. Az átlagfeszültség nem változott, de a szálak között az együttdolgozás lecsökkent, a feszültségkülönbség a középső és szélső szál között egyre nagyobb lett (shear lag hatás), ami azt jelentette, hogy a szélső szálban a feszültség egyre közelebb került a szakítószilárdságához. A tönkremenetel akkor következett be, amikor a szélső kritikus szál elérte a szakítószilárdságát. Ezután a tönkremenetel hirtelen zajlott le, progresszíven. A szélső szál szakadásával az általa korábban viselt teher áterhelődött a körülötte lévő szálakra, és azok is túlterhelődtek, majd a teljes keresztmetszet elszakadt.

5.2 Kihúzó kísérlet

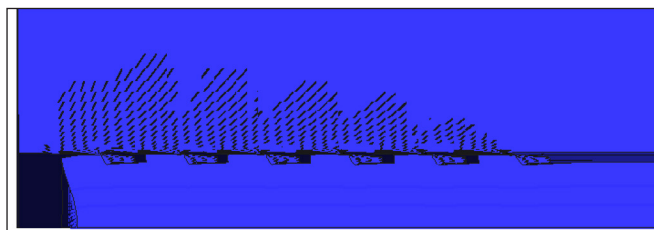
Első lépésben a kihúzó kísérleti numerikus modell tönkremenetelig lett terhelve statikus terheléssel. A validáció alapját a gyártói adatok adták. A numerikus modellből kapott tapadási feszültség-megcsúszás diagramot a gyártói adatokkal összevetve a 15. ábra mutatja be. Látható, hogy a kezdeti merevség azonos, míg ahogyan a betonfogak egyre inkább elkezdnek nyíródni, különbség alakul ki a numerikus modell és a gyártó kísérleti eredménye között. Ez nagy valószínűséggel az ATENA szoftverben alkalmazott elment repedésmodellel magyarázható, és a fix repedésiránnyal. A modellben a repedések a kialakulást követően fixált pozícióban maradtak. A repedésterjedési paraméterek módosításával (például a repedések elfordulását megengedve a beton húzási ellenállásának 20-30%-ig) az eredmény tovább lehetne javítható.



15. ábra: Tapadási feszültség-megcsúszás diagram összevetése: numerikus modell eredménye a gyártó eredményével



16. ábra: Mikrorepedések statikus terhelés hatására, a tönkremeneteli teher 20%-nál

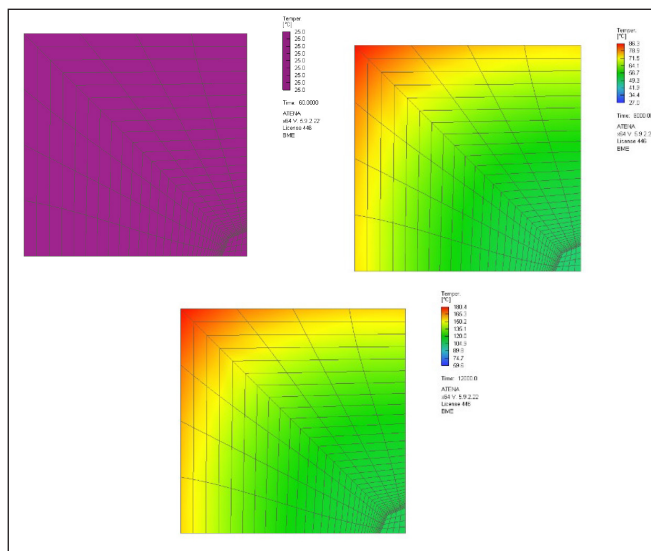
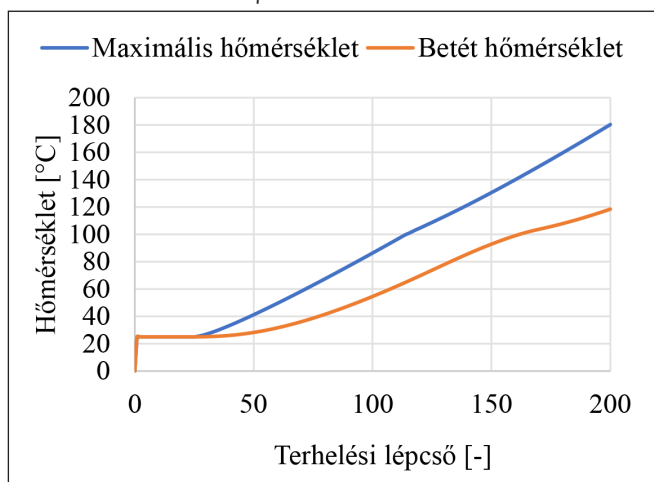


17. ábra: Repedések statikus terhelés hatására kihúzóási tönkremenetel közelében

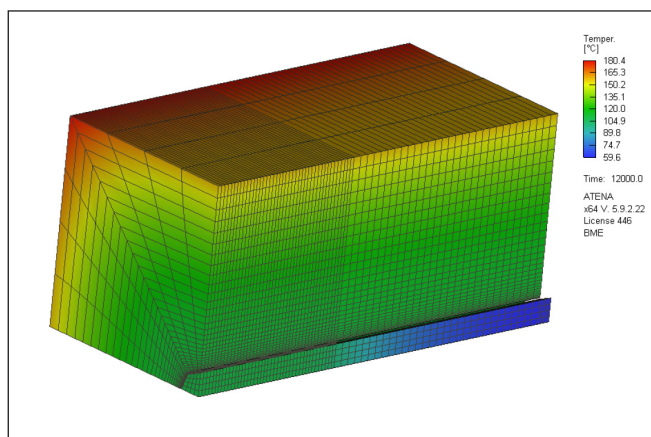
A modell konvergencia és futási idő optimalizálásának érdekében ez a módosítás nem lett elvégezve, a kialakulást követő fix repedésirányt alkalmaztunk.

A kapott eredményeket tovább validálják a repedéseképek. A 16. ábrán láthatóak a kis terhelő erőnél (~tönkremeneteli teher 20%-a) kialakult repedések, és a kihúzóási tönkremenetelnél kialakult repedések. Az utóbbi esetben a betonfogak már lényegében elnyíródtak, és a betét szabadon ki tud húzódni (csak a súrlódási ellenállás nyújt maradék ellenállást).

18. ábra: A betétben ébredő maximális hőmérséklet összevetése a maximális hőmérséklettel a próbatesten



19. ábra: Hőmérséklet változása a keresztmetszeten belül.



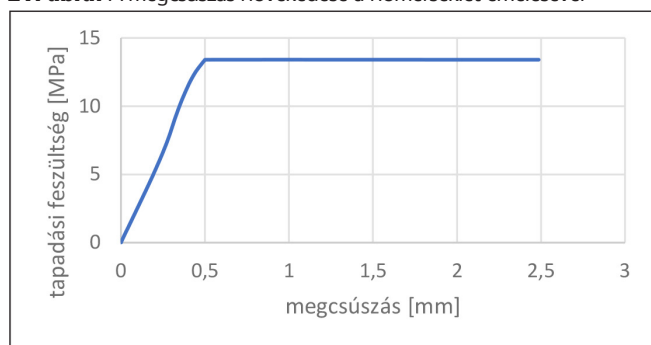
20. ábra: Hőmérséklet változása a próbatesten belül

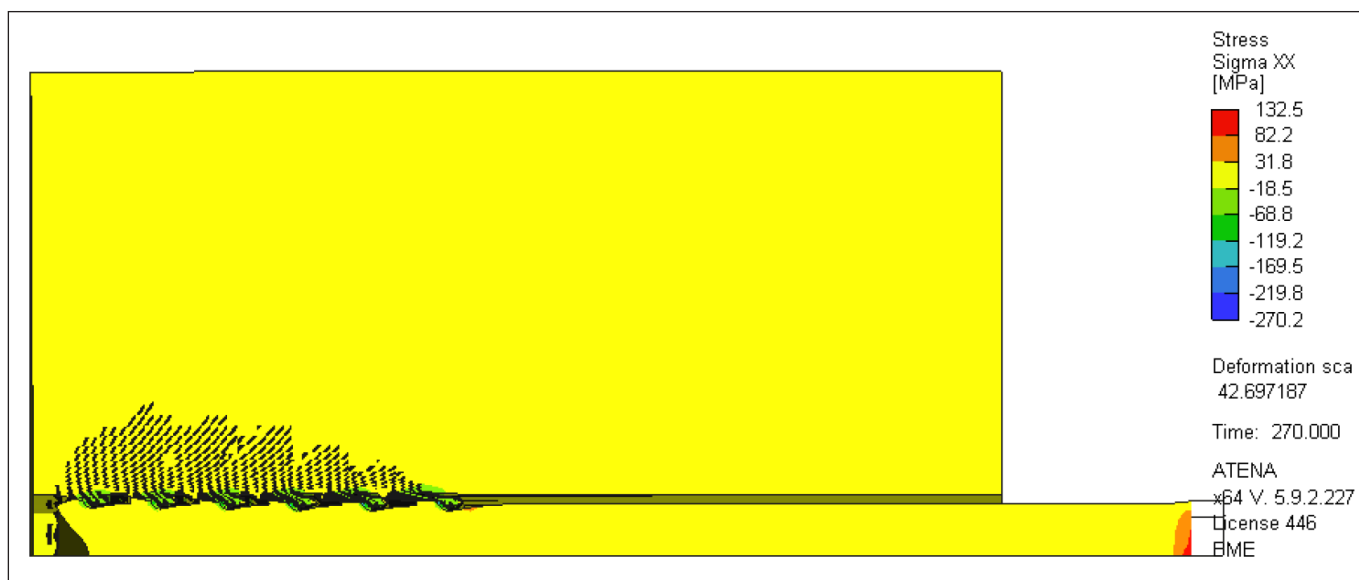
A validált kihúzó kísérleti modell elkészítése után a következő lépésben a kész modell üzemi teherszintre lett terelve, majd a beton próbatest felszínére hőmérsékleti teher lett definiálva. A hőmérsékleti terhelés közben a betétben lévő hőmérséklet és a maximális hőmérséklet alakulásának összehasonlítását a 18. ábra mutatja be. Látható, hogy a betétben a hőmérséklet lényegében mindig 50-60 °C-kal alulmaradt.

A hőmérséklet emelése során a maximális terhelő hőmérsékletnél a hőmérséklet eloszlását a próbatesten belül a 19. és 20. ábrák mutatják be. A beton belseje felé haladva a hőmérséklet folyamatosan csökkent.

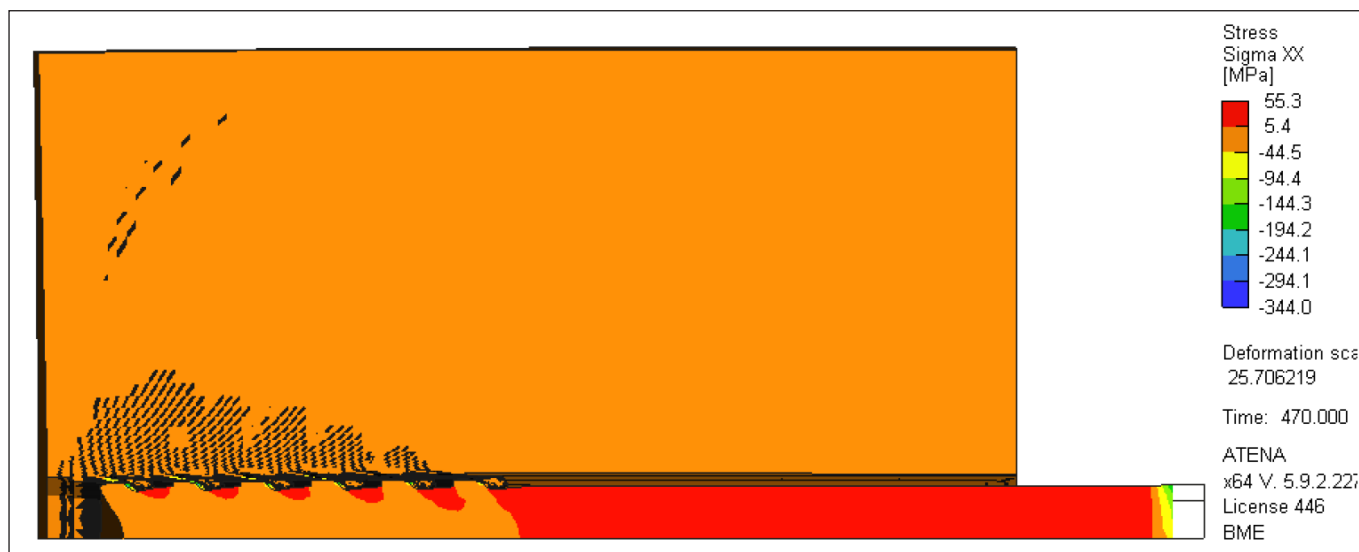
A hőmérséklet emelésével párhuzamosan a mátrix és beton anyagi tulajdonságai romlottak. A 21. ábrán látható, hogy a hőmérséklet emelkedésével ahogyan lágyult a beton-betét kapcsolat, a terheletlen oldalon mért megcsúszások is egyre növekedtek.

21. ábra: A megcsúszás növekedése a hőmérséklet emelésével





22. ábra: Repedéskép és feszültségeloszlás a statikus terhelés végén



23. ábra: Repedéskép és feszültségeloszlás a hőmérsékleti terhelés végén (tönkremenetel)

A statikus terhelés végén kialakuló repedésképet és feszültségeloszlást a 22. ábra szemlélteti, míg a hőmérsékleti terhelés során kialakuló kihúzóási tönkremenetel pillanatában ezt a 23. ábra mutatja be. A repedések száma és kiterjedése megnőtt, a tönkremenetele azonban nem a betonfogak elnyíródásával következett be, hanem a GFRP betét bordáinak kilágylásával. Kellően magas hőmérsékletnél a bordák annyira lágyak lettek, hogy a betét kicsúszott a beton próbatestből, csak a súrlódás biztosított maradó ellenállást.

6. KONKLÚZIÓK

GFRP betétek alkalmazása egyre elterjedtebb az olyan esetekben, ahol a tartósság kiemelten fontos, vagy a szerkezet agresszív környezetnek van kitéve. A GFRP betétek anyagi összetételükből fakadóan mentesülnek az elektrolitikus korrózió alól. Felhasználásukat azonban nehezíti a mátrix anyag alacsony üvegesedési hőmérsékletéből fakadó problémák. Amennyiben a GFRP betét felhasználásával készült beton szerkezetek ki vannak téve magas üzemi hőmérsékleteknek, vagy rendkívüli tűzhatásoknak, akkor megkérdőjeleződik a GFRP alkalmazhatósága, vagy külön hőszigetelésre, hőgátló anyagok alkalmazására lehet szükség.

A GFRP betétek két legfontosabb tulajdonságát vizsgáltuk

a cikkben: a mechanikai és tapadási tulajdonságok, üzemi teherszint alatt, egyenletes hőmérséklet emelésével. A vizsgálat elvégzéséhez nemlineáris végelelemes modellek készültek ATENA szoftverkörnyezetben, ahol a mátrix és a beton térfogatelemekkel lettek definiálva, a szálak pedig beágyazott vonalelemekként jelentek meg. Két kísérleti elrendezés lett vizsgálva, egy szakító és egy kihúzó kísérletei elrendezés. Mindkét esetben egy 12 mm átmérőjű Schöck Combar nevű GFRP termék volt a vizsgálat alanya, ami rovátkolt felületi kialakítású.

Az eredmények azt mutatták, hogy állandó húzóerő mellett, a hőmérséklet emelésével a betét keresztmetszetén belül az átlagfeszültség nem változik, viszont a mátrix rugalmassági modulusának csökkenése a shear lag hatást növeli, azaz a feszültségkülönbség a középső és a legjobban terhelt szélső szál között megnőtt. Így a hőmérséklet további emelésével a szélső kritikus szálban a feszültség megnőtt, majd amikor elérte a szál szakítószilárdságát progresszív tönkremenetel következett be, mígnem a teljes keresztmetszet elszakadt.

A kihúzó kísérlet során a betét bordázata egyszerűsített módon térfogatelemekkel lett modellezve. Így meg lehetett vizsgálni a hőmérséklet növekedésével bekövetkező GFRP borda lágyulásának hatását a tapadásra. A hőmérséklet emelésével a kapcsolat merevsége lecsökkent, a terheletlen oldalon a megcsúszások folyamatosan emelkedtek. A repedé-

sek is tárgultak és terjedtek a betonban, azonban a tönkremenetel a statikus terheléssel ellentétben nem a betonfogak nyírási tönkremenetelével következett be, hanem a GFRP bordák kilágylásával. A betét a bordák merevségének elvesztése után kihúzódott a betonból, csak a súrlódás nyújtott maradó ellenállást.

Összességében elmondható, hogy a validált numerikus modellek alkalmasak voltak a GFRP betét viselkedésének vizsgálatára hőmérsékleti terhelés hatására. A kapott eredmények további validálása szükséges laborkísérleti eredményekkel, valamint a létrehozott modellekkel további vizsgálatok hajthatók végre annak érdekében, hogy a GFRP betéteket magasabb, vagy rendkívüli hőmérsékleti terhelések mellett is alkalmazni lehessen.

7. KÖSZÖNET NYILVÁNÍTÁS

A cikk Szél Stefánia Mária 2025-ben beadott és megvédett diplomamunkát mutatja be, összefoglalva annak céljait, megoldási mechanizmusát és konklúzióját. Szeretnénk köszönetet mondani Szinvai Szabolcsnak, hogy vállalta a konzulensségét a diplomamunkámnak, és egész félév alatt biztatott és támogatta a munkámat, hogy ez a legtöbbet tudjam kihozni ez idő alatt a témából.

A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg.

„A BME-380 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az EKÖP-24-3 pályázati program finanszírozásában valósult meg.



8. HIVATKOZÁSOK

- Bank, L., C. (2006). „Composites for Construction.” *John Wiley & Sons*, <https://doi.org/10.1002/9780470121429>
- CSA, S806-12. (2021). „Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers.” *Canadian Standards Association*
- ASTM, D7205/D7205M. (2011). „Test Method for Tensile Properties

- of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars.” *American Society for Testing and Materials*
- ACI, 440.1R. (2015). „Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.” *American Concrete Institute*
- Schöck. (2022). „Combar Brochure.” *Schöck Bauteile GmbH*
- Szinvai, S., & Kovács, T. (2024). „Numerical modeling of the shear lag effect in GFRP as function of fiber content.” *Pollack Periodica*, 20(2), 1-7, <https://doi.org/10.1556/606.2024.01049>
- Szinvai, S., & Kovács, T. (2022). „Numerical modelling of the bond behaviour between uncracked concrete and deformed steel and fibre reinforced polymer bars.” *Proceedings of the 14th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, 621-628, <https://www.fib-international.org/publications/fib-proceedings/14th-phd-symposium-in-rome-italy-2022-proceedings-em-pdf-em-detail.html>

Szél Stefánia Mária (2000) okleveles építőmérnök, Acélhidak Kft. Minőségellenőrzési Osztály (MEO). A BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén diplomázott 2025-ben. Fő érdeklődési területek: hidak tervezése és kivitelezése, különös tekintettel a gyakorlati kérdésekre, hidak építése és gyártás közbeni ellenőrzése.

Szinvai Szabolcs (1997) okleveles építőmérnök, PhD hallgató, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék. Fő érdeklődési területek: szálerősítésű polimerek alkalmazása betonszerkezetekben, középpontban a tapadási kérdésekkel és a szerkezeti viselkedéssel. *fib* (Nemzetközi Betonszövetség) Ifjúsági Tagozatának vezetője, *fib* TG10.3 és TG5.1 mukacsoport tagja.

Finite Element Investigation of the Bond and Mechanical Behavior of GFRP Bars Exposed to Elevated Temperatures

Mária Stefánia Szél - Szabolcs Szinvai

Corrosion reduces the service life of traditional steel-reinforced concrete structures. In cases where durability is critical or the structure is exposed to an aggressive environment, the use of non-metallic reinforcement may be a solution, as these materials are inherently immune to electrolytic corrosion. One such material is glass fiber reinforced polymer (GFRP). In addition to their excellent durability properties, GFRP bars are lightweight, easy to cut, and non-magnetic, allowing for a wide range of applications. However, for structures exposed to elevated temperatures, the relatively low glass transition temperature of the matrix material can present a problem. In this paper, the mechanical and bond behavior of GFRP bars subjected to thermal loading was investigated using numerical simulation. Nonlinear finite element models were developed in the ATENA software, where the matrix and the concrete were modeled with solid elements, while the fibers were represented as embedded line elements. Due to the elevated temperature, the elastic modulus of the matrix decreased, significantly reducing the efficiency of force transfer between the fibers within the models, which resulted in a loss of stiffness and tensile strength. Matrix properties also influence bond performance. The results showed that with increasing temperature, the relative displacements between the concrete and the reinforcement increased progressively, until a critical temperature was reached at which bond failure occurred.