

Szálerősítésű polimer (FRP) betétek alkalmazása betonszerkezetekben

Application of fibre reinforced polymer (FRP) bars in concrete structures

SZINVAI Szabolcs doktorandusz¹, Dr. KOVÁCS Tamás egyetemi docens²

^{1,2}BME, Hidak és Szerkezetek Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.,
¹szinvaiszab@edu.bme.hu, <https://epito.bme.hu/szinvai-szabolcs>, ²+36 1 463 1743,
kovacs.tamas@emk.bme.hu, <https://epito.bme.hu/kovacs-tamas>

Abstract

The durability of our concrete infrastructure is becoming increasingly more important. Compared to traditional steel rebars, the fibre reinforced polymer (FRP) bars can be a viable alternative because of their corrosion resistance, low weight, and high tensile strength. In this article we will explain the special material and mechanical properties of FRP bars, and their typical field of applications.

Keywords: FRP bars, durability, application, corrosion, composite

Kivonat

Betonszerkezeteink tartóssága kiemelten fontos napjainkban. A hagyományos acélbetétekkel szemben kedvező alternatívát nyújthatnak a szálerősítésű polimer (FRP) betétek korrózióállóságuk, kis tömegük és nagy húzószilárdságuk miatt. A cikkben bemutatjuk az FRP betétek speciális anyagi- és mechanikai tulajdonságait, és az ezekből következő jellemző alkalmazási területeket.

Kulcsszavak: FRP betétek, tartósság, alkalmazás, korrózió, kompozit

1. BEVEZETÉS

A bevezetésben röviden áttekintjük a szálerősítésű kompozitok történetét, hogy miért merül fel az FRP betétek alkalmazása, és hogy mit is jelent pontosan, hogy FRP betét.

1.1. Történeti áttekintés

A szálerősítésű kompozitok megtalálhatóak a természetben is, ilyen például a csont, ami ásványokból (ágyazóanyag) és kollagénből (szálerősítés) áll, vagy a fa, ami ligninből (ágyazóanyag) és cellulózból (szálerősítés) áll [1].

Az ember által készített szálerősítésű kompozitok már több ezer évvel ezelőtt, az ősi Mezopotámiában megjelentek, mind sár és szalma keveréke. Egyes ma is megmaradt tradicionális Szíriai vályogházak (úgynevezett „beehive houses”) korát több ezer évre becsülik [2]. Ez az agyag (ágyazóanyag) és szalma (szálerősítés) keverékéből létrejött szálerősítésű kompozit.

Fejlett szálerősítésű kompozit felhasználásra jó példa a kompozit íj. Ez az íj fenyőgyantának, bambusznak, fának, inaknak és selyemnek a kombinálásából jött létre. Egy egyszerű fából készült íjhoz képest sokkal jobb tulajdonságokkal rendelkezik, akár 250 méterig is el lehet vele lőni.

Szálerősítésű kompozitnak tekinthető a Damaszkuszi acél is, ahol az acél (ágyazóanyag) van erősítve szén nanoszálakkal. A Damaszkuszi acél a középkorban híres volt arról, hogy amellelt, hogy rendkívül erős és éles, ugyanakkor hajlékony is. A közép-keleti kovácsmunka titkát az európai kovácsok egészen a 18. századig nem tudták megfejteni [4].

Később a nagy áttörést a polimerek megjelenése okozta, a 20. században megjelentek először a gépészetben az üvegszál erősítésű polimerek. 1935 körülre tehető az első ilyen alkalmazás. Repülőgépek és űrhajók készítésénél jelentettek nagy előnyt a könnyű szerkezetük és nagy szilárdságuk miatt.

Építőmérnöki alkalmazásként csak jóval később kezdtek megjelenni. Betonba ágyazott FRP betétek az 1980-as években jelentek meg, elterjedésük azonban lassú. Ehhez képest a megerősítéshez használt FRP szalagok az 1990-es években jelentek meg, és azóta is előszeretettel alkalmazzák őket [3].

1.2. Motiváció

Az utóbbi időben előtérbe kerültek a betonszerkezetek tartóssági kérdései. Ennek egyik oka, hogy a nagymennyiségű vasbeton műtárgyak a korróziós károk miatt jelentős karbantartási terhet jelentenek. A romlás üteme gyakran gyorsabb, mint a helyreállítás, így a szerkezeteink állapota egyre rosszabbodik.

További ok, hogy az építőiparban is csökkenteni kell a szén-dioxid kibocsátást. A cementipar nagy szén-dioxid kibocsátó, ezért a betonszerkezetek különös figyelmet kapnak. Tartós szerkezetek építésével csökkenthető a szerkezet élettartama során kibocsátott szén-dioxid, mert a karbantartás igénye közel nulla. Ezzel akár 70%-kal is csökkenthető a szerkezet teljes élettartama alatt kibocsátott szén-dioxid mennyiség [5].

A leggyakoribb tartóssági problémája a vasbetonszerkezeteknek a korrózió. A korróziót elősegíti az útszóró sózás, illetve egyéb agresszív környezetek (például tengerpart). A nem acél anyagú betétek, mint az FRP betétek, esetében nincs elektrolitikus korrózió, ezért megoldást jelenthetnek erre a problémára.

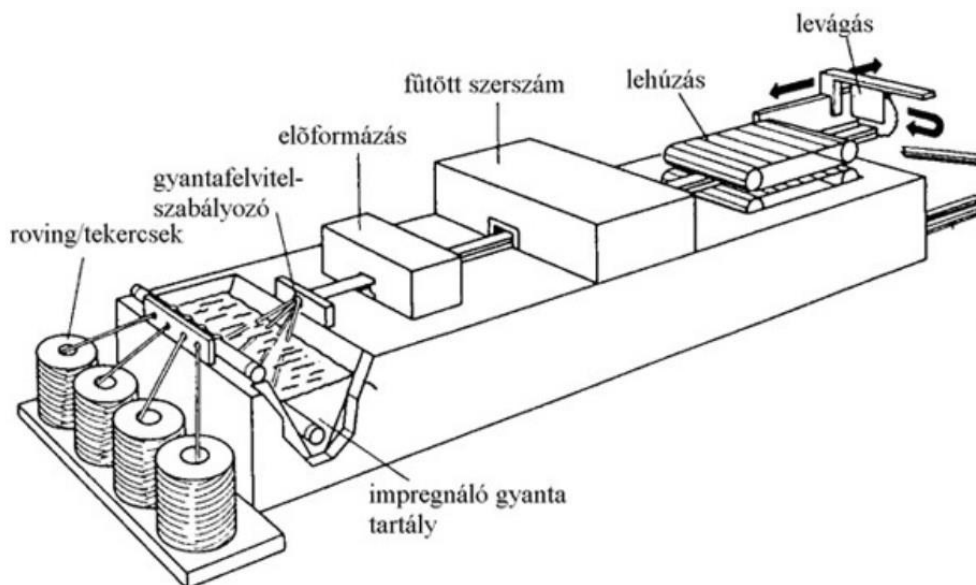
1.3. FRP betétek

Az FRP betétek szálerősítésű kompozit anyagok, szálakból, ágyazóanyagból és a kettő közötti határfelületről állnak. Az ágyazóanyag, vagy más néven mátrix veszi körül a szálakat, biztosítja a szálak között az erőátadást és véd a mechanikai hatásoktól. A legelterjedtebbek a polimer mátrixok, ezek közül is a poliészter, vinyl észter és az epoxy.

Betétek esetén egyirányban, folytonos szálakkal erősített mátrixról beszélhetünk. A szálak nagy szilárdsággal rendelkeznek, ők az elsődleges teherviselő elemek. A legjellemzőbb szálanyagok az üveg, a bazalt, a szén és az aramid. Az FRP betétek a felhasznált anyagoktól és a kialakítástól függően jelentősen eltérő tulajdonságokkal rendelkezhetnek [3].

A kompozit anyagokat különféle speciális módokon lehet előállítani. FRP betétek esetén a legelterjedtebb eljárás az úgynevezett pultrúzió. Ez egy magasan automatizált eljárás, amit az 1950-es években fejlesztettek ki [2]. Az eljárás során prizmatikus termékeket lehet gazdaságosan gyártani. A késztermék nemcsak FRP betét lehet, de FRP szalag vagy profil is. A legtöbb esetben hőre keményedő ágyazóanyagot alkalmaznak, ezért a gyártás után a termék már tovább nem alakítható. A pultrúziós gyártósor jellemző kialakítási módját az 1. ábra szemlélteti.

Ez okozza azt a sajátosságot, hogy a meghajlított FRP betétek (például kengyelek) előállítása jelentősen nehezebb, így költségesebb is. Ráadásul a meghajlítás környezetében a szálak veszítenek párhuzamosságukból, és mikrokihajlásokat szenvednek el, így a szilárdságuk jelentősen lecsökken.



1. ábra. Pultrúziós gyártósor [6].

2. TULAJDONSÁGOK

Ahhoz, hogy megértsük hol érdemes alkalmazni az FRP betéteket először szükséges áttekinteni a legfontosabb fizikai és mechanikai tulajdonságaikat. Mint látni fogjuk, kompozit természetükből adódóan, az FRP betétek tulajdonságai nagyban eltérnek a szokványos építőanyagainktól.

2.1. Fizikai tulajdonságok

A kompozit betétek tulajdonságait alapvetően meghatározza a szál térfogat arány [3]. Ez megmondja, hogy a betét térfogatának hány százalékát teszik ki az erősítő szálak, amik biztosítják a teherviselést. Ez az érték jellemzően 50-75%. Pultrúziós eljárással a fizikailag elérhető maximum körülbelül 80%. A fizikai és mechanikai tulajdonságok innen származtathatóak. A fizikai tulajdonságokat az 1. táblázat foglalja össze.

Ahogy a táblázatban látható, száltípustól függően a tulajdonságok jelentősen változnak. Az FRP betétek sűrűsége nagyjából 1500-2500 kg/m³ között mozog, ami az acél sűrűségének mintegy harmada. A gyártástechnológiából adódóan tetszőleges hosszban és átmérőben előállíthatóak.

Fontos megemlíteni, hogy az üvegesedési hőmérséklet jellemzően 70-175°C, az ágyazóanyagtól függően. Tűzhatás esetén a polimer anyag kilágyul, jelentősen rontva az együttdolgozást a beton és a betét között. Ezért tűzhatással szemben az FRP betétek kedvezőtlenek.

Érdekesség, hogy szén és aramid szálak esetén a tengelyirányú hőtágulási tényező negatív, vagyis hőmérséklet emelésével a hossz csökken. Keresztirányban a hőtágulási együttható az ágyazóanyag miatt egy nagyságrenddel nagyobb, ez okozhat sugárirányú feszültségeket a betétek körül (például tűzhatáskor).

Az FRP betétek fizikai tulajdonságai

1. táblázat

	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	Acél
Sűrűség [kg/m³]	1730-2180	1430-1670	1300-1450	1990-2500	7850
Átmérő [mm]	3-40	3-40	3-40	3-40	6-40
Hossz [m]	-	-	-	-	12
CTE hosszirányban [10⁻⁶/°C]	6-10	-9-0	-2(-6)	~8	11
CTE keresztirányban [10⁻⁶/°C]	21-23	74-104	60-80	18-27	11
Üvegesedési hőmérséklet [°C]	70-175	70-175	70-175	70-175	(~300)

2.2. Mechanikai tulajdonságok

A betétek mechanikai tulajdonságait meghatározza a kompozit viselkedés. Az ágyazóanyag lineráisan rugalmas, izotróp és duktilis. A szálak anyaguktól függően izotrópok vagy anizotrópok, lineárisan rugalmasak és ridegek. A kompozit betét anizotróp, lineárisan rugalmas és rideg. A mechanikai tulajdonságokat a 2. táblázat foglalja össze.

Az FRP betétek hosszirányú húzószilárdsága a normál betonacélénak többszöröse. Ehhez képest merevségük jóval kisebb, a leggyakrabban használt üvegszál esetén 50-60 GPa. Kivételt képeznek a szénszálak, itt a szénszáltípustól függően a rugalmassági modulus akár jóval nagyobb is lehet az acélhoz képest. A nagy teljesítmény viszont nagy költséget is jelent, a szénszálak betétek jóval drágábbak, mint az üvegszálak.

Az egyirányú erősítés következménye, hogy keresztirányban a szilárdság és a merevség egy nagyságrenddel kisebb, mint hosszirányban. Ez sok szempontból hátrányt jelent, például megfogni sem lehet egyszerűen ezeket a betéteket. Egy egyszerű húzószilárdság teszt elvégzéséhez is speciális lehorgonyzóelemek alkalmazására van szükség.

Húzás hatására a betétek a szálak szakadásával mennek tönkre, nyomás hatására pedig a szálak kihajlása, illetve keresztirányú tönkremenetel a jellemző. A betétek nyomásra jóval gyengébbek.

Az FRP betétek mechanikai tulajdonságai

2. táblázat

	GFRP	CFRP	AFRP	BFRP	Acél
Hosszirányú húzószilárdság [MPa]	450-1600	600-3500	1000-2500	1000-1700	450-700
Hosszirányú rugalmassági modulus [GPa]	35-60	100-580	40-125	40-70	200
Keresztirányú rugalmassági modulus [GPa]	2.1-4.1	2.1-4.1	2.1-4.1	2.1-4.1	200
Szakadó nyúlás [%]	1.2-3.7	0.5-1.7	1.9-4.4	2.0-2.7	5-20

2.3 Tulajdonságok összefoglalása

A kompozit betétek alkalmazásának fő oka a korrózióállóságuk, ami tartósabb betonszerkezeteket ígér. Mechanikai előny a nagy húzószilárdság, de ez kis merevséggel párosul, így ennek előnyeit nem feltétlenül könnyű kihasználni.

További speciális tulajdonságuk az FRP betéteknek a mágneses semlegesség (kivéve szénszálas) és a jó hőszigetelő képesség. Az előnyöket és hátrányokat a 3. táblázat foglalja össze.

Az FRP betétek előnyei és hátrányai

3. táblázat

Előny	Hátrány
Korrózióállóság	Kis keresztirányú szilárdság
Magas húzószilárdság	Kis merevség
Kis sűrűség	Rideg tönkremenetel
Könnyű vághatóság	Nyomásra gyengébb
Mágneses semlegesség	Később nem alakítható
Jó hőszigetelés	Rossz tűzállóság

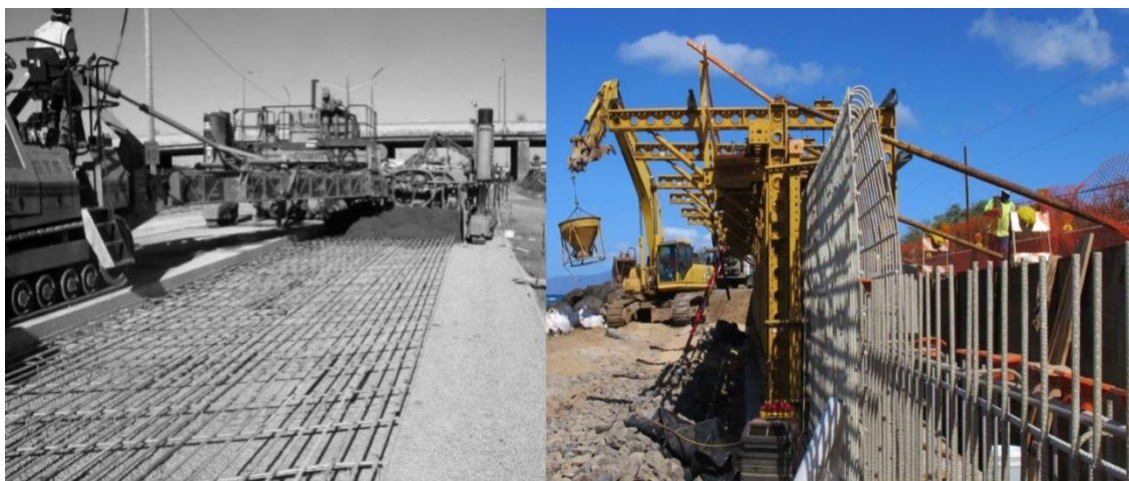
3. ALKALMAZÁSI TERÜLETEK

Az FRP betétek tulajdonságainak áttekintése után rátérhetünk az alkalmazási területekre. Ezeket három nagyobb csoportra bontottuk: közlekedési infrastruktúra, vízzel érintkező szerkezetek és különleges alkalmazások.

3.1. Közlekedési infrastruktúra

Infrastruktúra szerkezeteknél kiemelten fontos a tartósság, így gyorsan felmerül az FRP betétek alkalmazása. Fontos különbség acélbetétekhez képest, hogy drót helyett gyorskötözőt szokás használni, sámlivasak helyett pedig műanyag rögzítő elemeket, hogy azok se tudjanak korrodálni.

FRP betéteket lehet alkalmazni folytonosan vasalt betonutakban. Ebben az esetben csak egyenes betétekre van szükség, amiket jól automatizáltan lehet gyártani. Építés közben fugázásra nincs szükség. Az esetlegesen kialakuló repedéseket a betétek megfelelően áthidalják. Utaknál nagyon fontos a kis karbantartási igény, ugyanis a javítás csak a forgalom megzavarásával lehetséges. Ha mégis szükség lenne javítási munkára, FRP vasalás esetén az könnyen és gyorsan végrehajtható, mert az FRP betéteket könnyű vágni. Továbbá az építést jelentősen megkönnyíti a betétek kis súlya. Kanadában számos esetben alkalmazták már [7, 8], egy építés közbeni állapotot mutat a 2. ábra (balra).



2. ábra. Folytonosan vasalt betonút építés közben (balra) [7], és tengerparti fal (jobbra) [12].

Hidak esetén az útszóró sózások miatt a korrózió legkitettebb rész a hídpálya. Ha itt alkalmazunk FRP betéteket vasalásként azzal jelentősen megnöveljük a híd élettartamát. Megfelelően kialakítva gazdaságos és környezetbarát szerkezetet tudunk létrehozni. Világszerte találhatunk példákat, elsősorban Kanadában [10] és az Egyesült Államokban, majd Európában és Japánban is.

Az FRP betétek kis merevsége miatt gyorsan felmerül az igény a betétek feszítve alkalmazására. Erre már történt több próbálkozás is [9]. A gyakorlatban azonban eddig csak a drága, de nagy teljesítményű szénszálal FRP betétek bizonyultak igazán alkalmasnak feszített szerkezetekben történő alkalmazásra. A betétek feszítésekor speciális eszközökre, lehorgonyzófejekre és feszítésre van szükség a kis keresztirányú szilárdság miatt.

Különböző spirális kengyelekkel jól készíthetők oszlopok, illetve cölöpök is FRP armatúrával, ahogy a 3. ábrán is látható. Az ilyen armatúráknak jól automatizálható a gyártása, nem kell különálló kengyeleket nehézkesen legyártani. Ez a kengyelezés akár gerendáknál is alkalmazható.

FRP betétek alkalmazhatóak még garázsoknál, alagutaknál és egyéb szerkezeteknél, amik ki vannak téve agresszív hatásoknak.



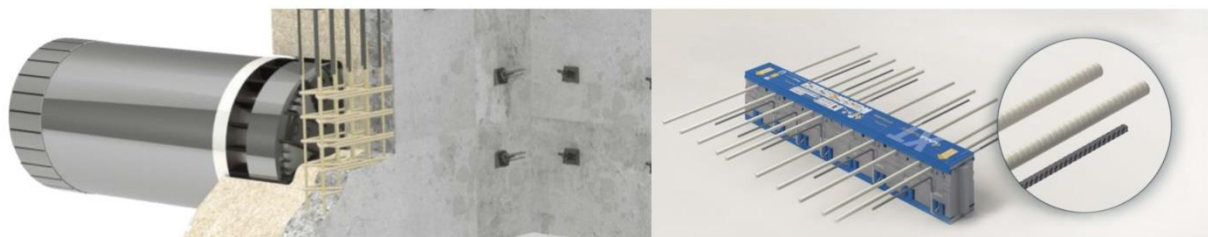
3. ábra. FRP hídpálya építés közben (balra) [8] és FRP cölöp armatúra (jobbra) [10].

3.2. Vízrel érintkező szerkezetek

Vízrel, illetve klóros, vagy egyéb módon agresszív vízzel érintkező betonszerkezetek esetén gyorsan tartóssági problémák tudnak fellépni. A szerkezetbe bejutó kloridionok idő előtt elkorrodálják az acélbetéteket, ezzel gyorsan tönkre téve a szerkezetet.

Ezért felmerül FRP betétek használata medencéknél a tisztító klórozás miatt, valamint tengerben, illetve tenger közelében épülő betonszerkezeteknél. Ezek lehetnek házak, hidak, tengerpart menti támfalak, de akár beton közvilágító oszlopok is. Építés közben látható egy példa 2. ábrán (jobbra).

Azonban nemcsak a tengervíz lehet agresszív, ilyen jellemzően agresszív folyadék még a szennyvíz is. FRP betétekkel vasalva lehet gyártani tartályokat, előregyártott szennyvízcsöveket, vagy akár szennyvíztisztító medencéket is. Az FRP betétek nemcsak a korrózió mentességet biztosítják, de áthidalják a repedéseket is, javítva ezzel a vízzáróságot.



4. ábra. FRP alkalmazása alagútfúrásnál (balra), és FRP betét hőszigetelő elemekben (jobbra) [11]

3.3. Különleges alkalmazások

A különleges alkalmazások az FRP betétek valamilyen speciális tulajdonságán alapulnak. Az egyik ilyen a mágneses semlegesség. Kórházakban az MRI készülékek nem kompatibilisek az acélbetétekkel, az FRP betétek kiválthatják azokat. A mágneses semlegesség előnyt jelenthet katonai alkalmazásoknál is, mert nem zavarja meg a radar jeleket.

Jó hőszigetelő képességük miatt lehet őket hőhídmegszakító elemekben is alkalmazni [11], illetve homlokzat vagy hőszigetelés rögzítésére is alkalmasak lehetnek. Egy ilyen hőhídmegszakító elemre mutat példát a 4. ábra (jobbra).

A szénszalakon kívül a többi betét elektromosan is szigetel, ami vasúti alkalmazásnál jelenthet előnyt. A betétek könnyű vághatósága miatt van még egy speciális alkalmazási területük: ideiglenes vasalásként. Alagutak fúrásakor például a fúrófej érkezési pontját előszeretettel vasalják meg üvegszál FRP-vel, amin majd a fúrófej könnyedén áthalad. Ezt szemléltet a 4. ábra (balra).

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatjuk az FRP betétek sokféle tulajdonságait, és az ezekből következő jellemző alkalmazási területeket, módokat. Jelenleg a kompozit betéteket acélhoz képest magasabb költségük miatt csak ott érdemes alkalmazni, ahol igazán megmutatkoznak az előnyeik. Ilyenek például az olyan betonszerkezetek, ahol a tartósság kulcskérdés, illetve az erős agresszív hatásoknak kitett szerkezetek.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Fatima M., Canhao H., Eurico J. *Bone: A Composite Natural Material*, Advances in Composite Materials – Analysis of Natural and Man-Made Materials, 2011.
- [2] Zoghi M., *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*, CRC Press, USA, 2013.
- [3] Bank L. C., *Composites for Construction*, John Wiley & Sons, Kanada, 2006.
- [4] Yong E., *Carbon nanotechnology in an 17th century Damascus sword*, National Geographic, <https://www.nationalgeographic.com/science/article/carbon-nanotechnology-in-an-17th-century-damascus-sword> , elérve: 2023. 05. 18.
- [5] Kasuga A., *A challanging concrete structure for the low carbon society*, Concrete 2021 – Smart and Innovative concrete from Disruption, Online conference, 2021.
- [6] ***, *Pultrúzió*, Műgyanták, <https://mugyantak.hu/pultuzio> , elérve: 2023. 05. 18.
- [7] Benmokrane B., Eisa M., El-Gamal S., El-Salakawy E., Thebeau D., *First Use of GFRP Bars as Reinforcement for Continous Reinforced Concrete Pavement*, Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), Zurich (Svájc), 2008.
- [8] Mohamed H., Benmokrane B., *Building Durable Concrete Infrastructure Using Fibre-Reinforced Polymer (FRP) bars*, Basheer International Symposium on Advances in Science and Technology of Concrete, Mumbai (India), 2016.
- [9] Wu Z., Wang X., Iwashita K., *State-of-the-Art of Advanced FRP Applications in Civil Infrastructure in Japan*, Composites & Polycon, Tampa (USA), 2007.
- [10] Ali A., Mohamed H., Benmokrane B., *Use of TUF-BAR GFRP Rebars in Circular Concrete Beams and Columns*, Research Chair in Innovative FRP Reinforcement for Concrete Infrastructure (NSERC), Kanada, 2016.
- [11] ***, *Schöck Combar*, Schöck, <https://www.schoeck.com/en/combar> , elérve: 2023. 05. 18.
- [12] Nanni A., Luca A. D., Zadeh H. J., *Reinforced Concrete with FRP Bars*, CRC Press, USA, 2014.