

# **GFRP (üvegszál-erősítésű polimer) betétek geometriai, mechanikai, együttdolgozási (tapadás) és tartóssági vizsgálatai**

Munkaközi változat

— Készült a Megbízó (ARMOTEK KFT.) **előzetes** tájékoztatására —

Sólyom Sándor  
doktorjelölt  
BME, Építőanyagok és Magasépítés  
solyom.sandor@epito.bme.hu

Budapest, 2020. 07. 08.

# KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEINEK ELŐZETES ÖSSZEFOGLALÁSA

A vizsgálatok elvégzésekor elsődlegesen az ISO 10406-1 - *Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete - Test methods - Part 1: FRP bars and grids* szabvány előírásait követtük.

## 1. Szakítószilárdság vizsgálat

A terhelési sebességet 350 MPa/s választottuk. Vizsgált próbatestek névleges átmérői: 6, 12 és 16 mm. Vizsgáló berendezés: Instron 5989 univerzális anyagvizsgáló gép, 600 kN kapacitással és 0,01 N mérési pontossággal rendelkezik.

A GFRP betétek anizotrop tulajdonságai miatt (azaz, a szálakra merőleges irányú mechanikai tulajdonságaik alacsonyabbak, mint a száliránnyal párhuzamosak) a vizsgálat elvégezhetősége miatt a vizsgált próbatestek két végére nagyszilárdságú epoxi ragasztóval fémcsövet rögzítettünk a CSA S806-12:2012 (Annex B) szabvány előírásai alapján.

A húzószilárdsági ( $f_t$ ) értékeket a következő képlettel számoltuk:

$$f_t = \frac{F_{max}}{A}$$

Ahol:

$F_{max}$  maximális terhelő erő, (N)

$A$  névleges keresztmetszeti terület ( $\text{mm}^2$ ).

A jellemző húzószilárdság vizsgálati kísérleti beállítást az 1. ábrán mutatjuk be, az eredményeket az 1. táblázatban foglaljuk össze és a 2. ábrán is bemutatjuk.



1. ábra: Jellemző kísérleti beállítás: Szakítószilárdság, rugalmassági modulus és fajlagos nyúlás vizsgálat (a fényképfelvétel nem az aktuális vizsgálatok alatt készült, csupán a kísérleti kialakítást hivatott bemutatni). Instron 5989 univerzális anyagvizsgáló gép és AVE1 Video extensometer

1. táblázat: Szakítószilárdsági vizsgálatok kísérleti eredményei

Átmérő (névleges) (mm)	Keresztmetszet (mm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (kN)	Húzószilárdság (f <sub>t</sub> )			
			Egyedi (MPa)	Átlag (MPa)	SD <sup>1</sup> (MPa)	CV <sup>2</sup> (%)
6	28.27	37.68	1333	1 252	61.9	4.94
		37.39	1322			
		33.58	1188			
		34.17	1209			
		34.24	1211			
12	113.10	139.86	1237	1 295	61.5	4.75
		136.35	1206			
		152.84	1351			
		152.15	1345			
		151.24	1337			
16	201.06	232.40	1156	1 219	51.4	4.21
		232.93	1158			
		257.16	1279			
		250.49	1246			
		252.13	1254			

<sup>1</sup> Az egyedi eredmények szórása

<sup>2</sup> Variációs koefficiens

A *SD* a *Standard deviation* angol kifejezést jelöli, ami az eredmények átlagtól való átlagos eltérését, vagyis a minta szórását jelöli. A *CV* (*Coefficient of Variation*) a variációs koefficiens, amit a szórás és az átlag hányadosaként képezünk.

A szórást (*s*) a következő módon számítjuk:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

ahol:

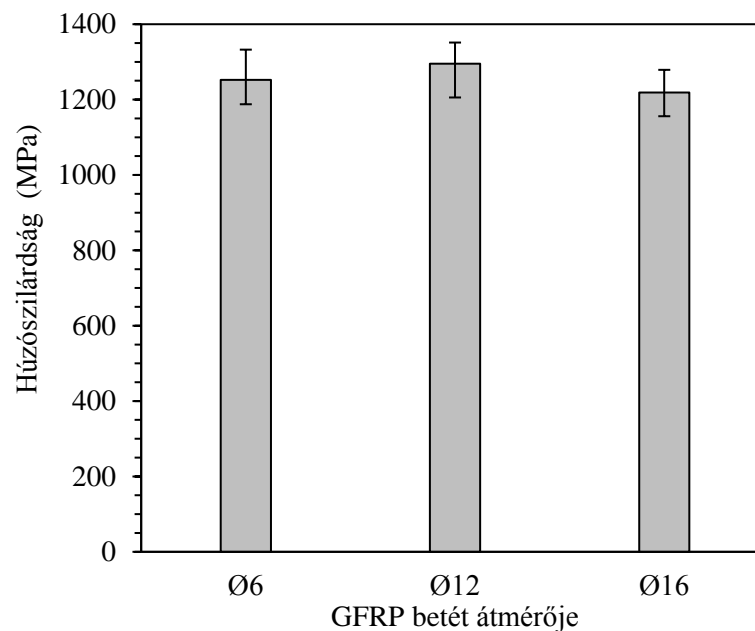
- N a minta elemszáma,
- i a minta sorszáma,
- $x_i$  egyedi érték,
- $\bar{x}$  az egyedi értékek átlaga.

A variációs koefficiens (*CV*) az következő módon számítjuk:

$$CoV = \frac{s}{\bar{x}}$$

ahol:

- s szórás,
- $\bar{x}$  az egyedi értékek átlaga.



2. ábra: Szakítószilárdsági vizsgálatok kísérleti eredményei — átlagértékek, illetve minimum és maximum értékek

## 2. Rugalmassági modulus vizsgálat

A vizsgálatokat az 1. pontban leírtak alapján végeztük. A fajlagos alakváltozást AVE1 Video extensometer-rel mértük.

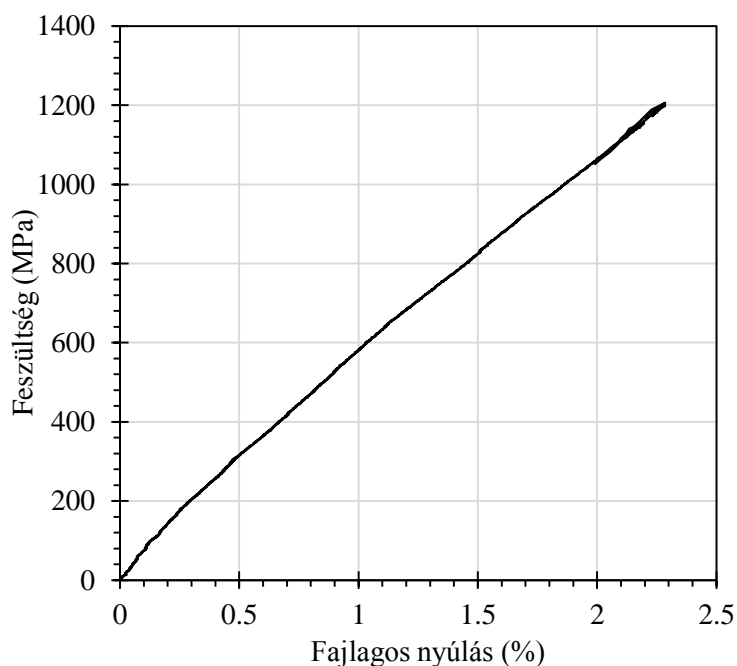
A rugalmassági modulus ( $E$ ) értékét a következő képlettel számoltuk:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

A  $\Delta\sigma$  és  $\Delta\varepsilon$  a szakítószilárdság 20 és 50%-a között meghatározott húzófeszültség ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) és fajlagos alakváltozás (-) növekmény.

A jellemző rugalmassági modulus vizsgálati beállítást az 1. ábrán mutatjuk be, az eredményeket az 2. táblázatban és a 4. ábrán foglaljuk össze.

GFRP betétekre jellemző feszültség-alakváltozás ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) diagramot a 3 ábrán mutatunk be.



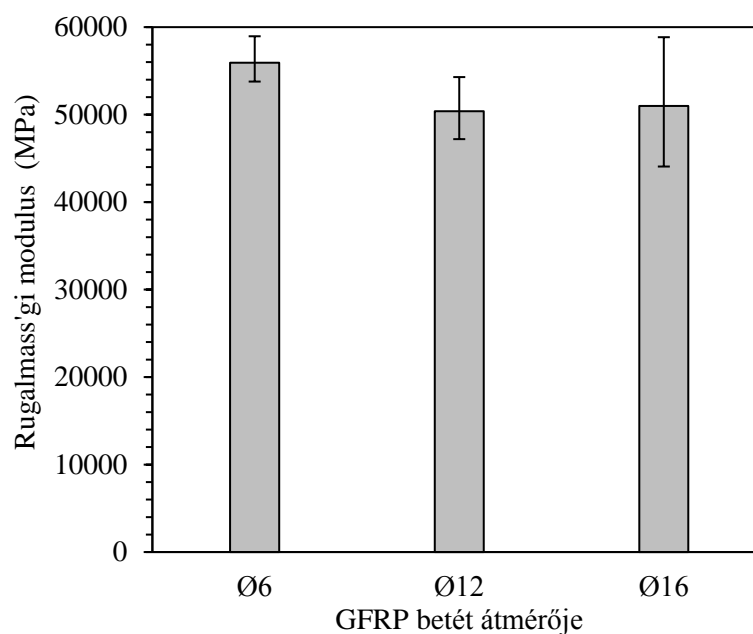
3. ábra: Jellemző feszültség-alakváltozás ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) ábra (Ø6 GFRP)

2. táblázat: Rugalmassági modulus vizsgálatok kísérleti eredményei

Átmérő (névleges) (mm)	Rugalmassági modulus (E)			
	Egyedi (MPa)	Átlag (MPa)	SD <sup>1</sup> (MPa)	CV <sup>2</sup> (%)
6	55895	55 933	1885.1	3.37
	53781			
	54168			
	56865			
	58958			
12	50595	50 387	2292.5	4.55
	54293			
	49479			
	50367			
	47201			
16	44069	50 985	4703.1	9.22
	50442			
	51279			
	50284			
	58852			

<sup>1</sup> Az egyedi eredmények szórása

<sup>2</sup> Variációs koefficiens



4. ábra: Rugalmassági modulus vizsgálatok kísérleti eredményei — átlagértékek, illetve minimum és maximum értékek

### 3. Szakadónyúlás vizsgálat

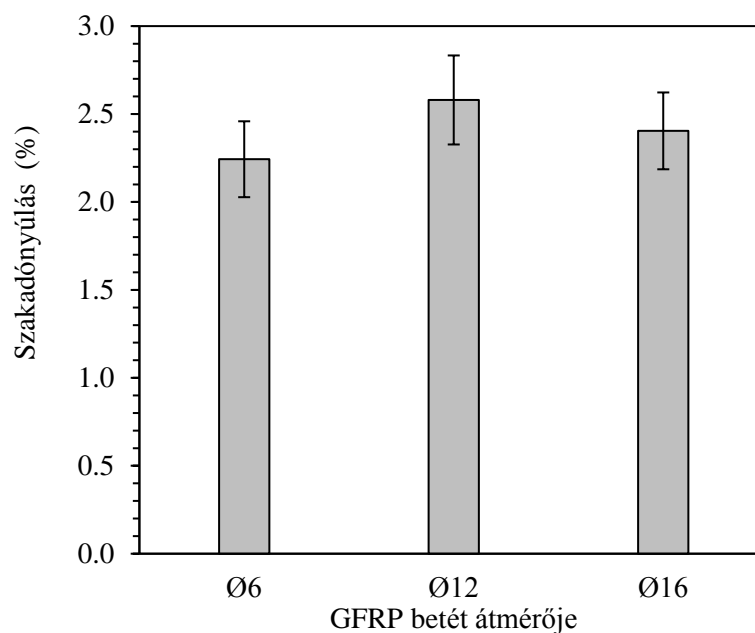
A vizsgálatokat az 1. pontban leírtak alapján végeztük. A fajlagos alakváltozást AVE1 Video extensometer-rel mértük.

3. táblázat: Szakadónyúlás vizsgálatok kísérleti eredményei

Átmérő (névleges) (mm)	Fajlagos nyúlás (%)			
	Egyedi (%)	Átlag (%)	SD <sup>1</sup> (%)	CV <sup>2</sup> (%)
6	2.38%	2.24%	0.15%	6.86
	2.46%			
	2.19%			
	2.13%			
	2.05%			
12	2.44%	2.58%	0.22%	8.54
	2.22%			
	2.73%			
	2.67%			
	2.83%			
16	2.62%	2.40%	0.17%	7.15
	2.30%			
	2.49%			
	2.48%			
	2.13%			

<sup>1</sup> Az egyedi eredmények szórása

<sup>2</sup> Variációs koefficiens



5. ábra: Szakadónyúlás vizsgálatok kísérleti eredményei — átlagértékek, illetve minimum és maximum értékek

#### 4. Nyírószilárdság vizsgálat

A terhelési sebességet 45 MPa/min-ra választottuk. Vizsgált próbatestek névleges átmérő: 6, 12 és 20 mm. Instron 3367 (Ø6 GFRP betétek) és Instron 5989 (Ø12 és Ø20-s GFRP betétek) univerzális anyagvizsgáló berendezéseket használtunk a vizsgálatokhoz, melyek 30 kN és 600 kN kapacitással, illetve 0,01 N mérési pontossággal rendelkeznek.

A nyírószilárdsági ( $\tau$ ) értékeket a következő képlettel számoltuk:

$$\tau = \frac{F_{max}}{2 \cdot A}$$

Ahol:

$F_{max}$  maximális terhelő erő, (N)

$A$  névleges keresztmetszeti terület ( $\text{mm}^2$ )

A jellemző nyírószilárdság vizsgálati kísérleti beállítást a 6. ábrán mutatjuk be, az eredményeket az 4. táblázatban, illetve a 7. ábrán foglaljuk össze.

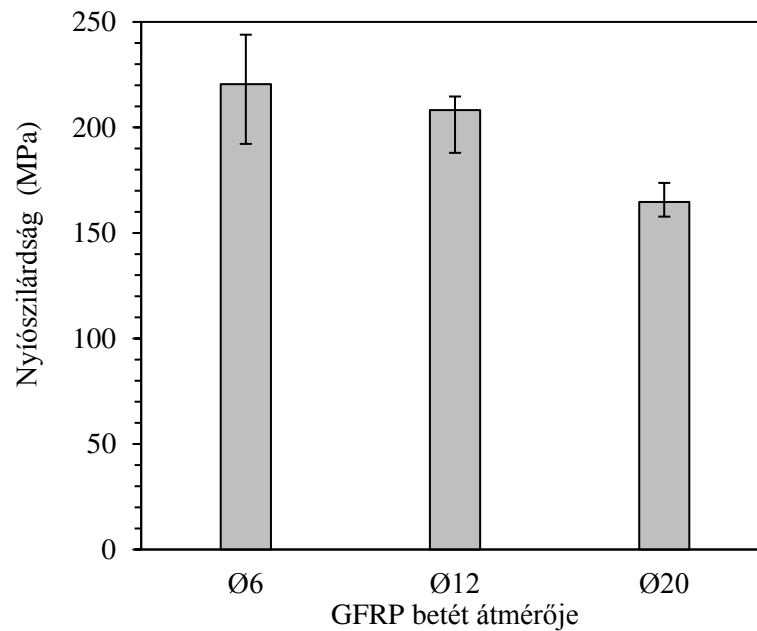


6. ábra: Jellemző kísérleti beállítás — Nyírószilárdság vizsgálat



4. táblázat: Nyírószilárdsági vizsgálatok kísérleti eredményei

Átmérő (névleges) (mm)	Keresztmetszet (mm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (N)	Nyírószilárdság			
			Egyedi (MPa)	Átlag (MPa)	SD <sup>1</sup> (MPa)	CV <sup>2</sup> (%)
6	28.27	10869	192.2	221	18.3	8.28
		12929	228.6			
		13294	235.1			
		13795	244.0			
		11380	201.2			
		12563	222.2			
12	113.10	47326	209.2	208	9.4	4.51
		42516	188.0			
		48459	214.2			
		48556	214.7			
		48510	214.5			
		47280	209.0			
20	314.16	102037	162.4	165	5.4	3.27
		104887	166.9			
		99114	157.7			
		109149	173.7			
		102110	162.5			



7. ábra: Nyírószilárdsági vizsgálatok kísérleti eredményei — átlagértékek, illetve minimum és maximum értékek

## 5. Szakítószilárdság vizsgálat – lúgos környezetben való tárolás után (tartóssági vizsgálat)

A próbatesteket („csupasz” GFRP betétek, betontakarás nélkül, de a végek epoxi ragasztóval bevonva) a szabványban megadott körülmények között tároltuk:

- 12,6 pH oldatban (mely a beton pórusvizét hivatott szimulálni)
- 60 °C hőmérsékleten (az öregedési folyamat felgyorsítása miatt).

A szabványban ajánlott oldat összetételt alkalmaztuk: 8,0g NaOH és 22,4 g KOH egy liter ionmentes vízben (deionized water) feloldva.

A tárolás után a próbatesteket az oldatból kivettük és tiszta vízben megmostuk, az esetleges lerakódások eltávolítása miatt. A próbatestek kiszáradása után az 1. pontban leírtaknak megfelelően végeztük el a szakítóvizsgálatot a húzószilárdság meghatározása érdekében.

Az eredményeket az 5-7. táblázatokban foglaljuk össze.

5. táblázat: Lúgoldatban tárolt próbatestek húzószilárdság kísérleti eredményei

Átmérő (névleges) (mm)	Keresztmetszet (mm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (kN)	Húzószilárdság (f <sub>t</sub> )			
			Egyedi (MPa)	Átlag (MPa)	SD <sup>1</sup> (MPa)	CV <sup>2</sup> (%)
6	28.27	27.26	964	1 032	49.6	4.81
		30.20	1068			
		29.55	1045			
		31.16	1102			
		27.47	971			
		29.51	1044			
12	113.10	128.56	1137	1 134	21.3	1.88
		130.13	1151			
		130.28	1152			
		128.25	1134			
		123.13	1089			
		129.24	1143			

<sup>1</sup> Az egyedi eredmények szórása

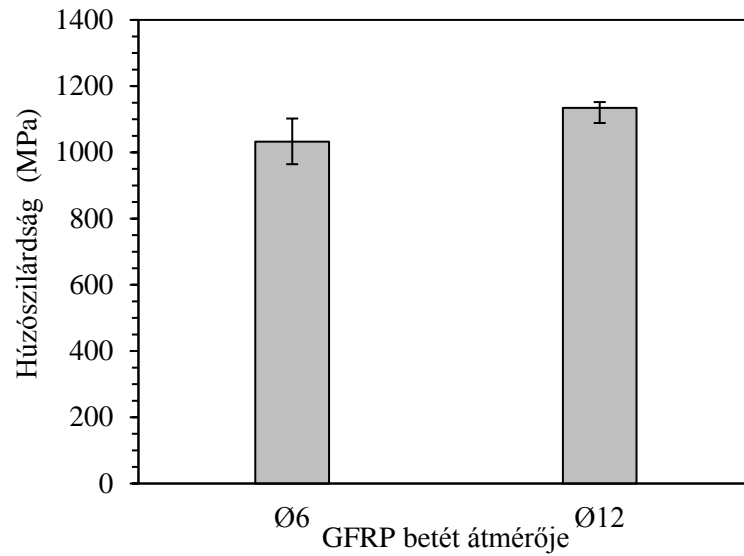
<sup>2</sup> Variációs koefficiens

6. táblázat: Lúgoldatban tárolt próbatetek rugalmassági modulus kísérleti eredményei

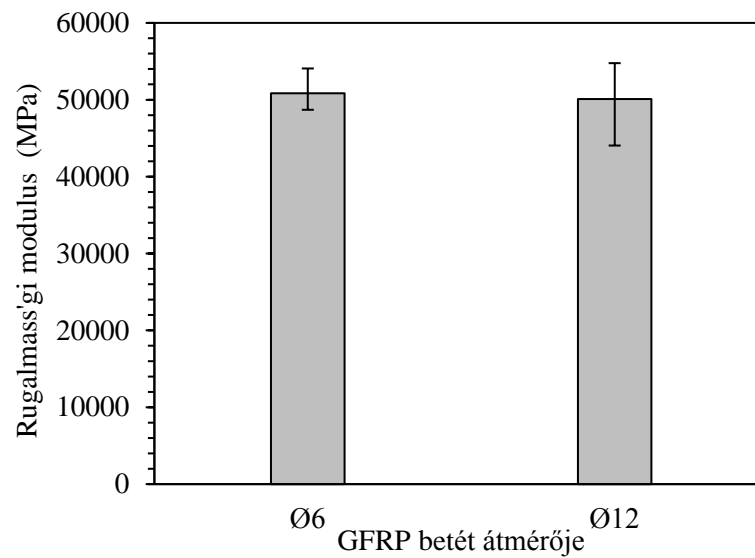
Átmérő (névleges) (mm)	$F_{\max}$ (kN)	Rugalmassági modulus (E)			
		Egyedi (MPa)	Átlag (MPa)	SD <sup>1</sup> (MPa)	CV <sup>2</sup> (%)
6	27.26	54070	50 835	1907.8	3.75
	30.20	48800			
	29.55	51556			
	31.16	49917			
	27.47	51974			
	29.51	48695			
12	128.56	54676	50 098	3860.9	7.71
	130.13	47258			
	130.28	44047			
	128.25	54761			
	123.13	50925			
	129.24	48923			

7. táblázat: Lúgoldatban tárolt próbatetek fajlagos nyúlás kísérleti eredményei

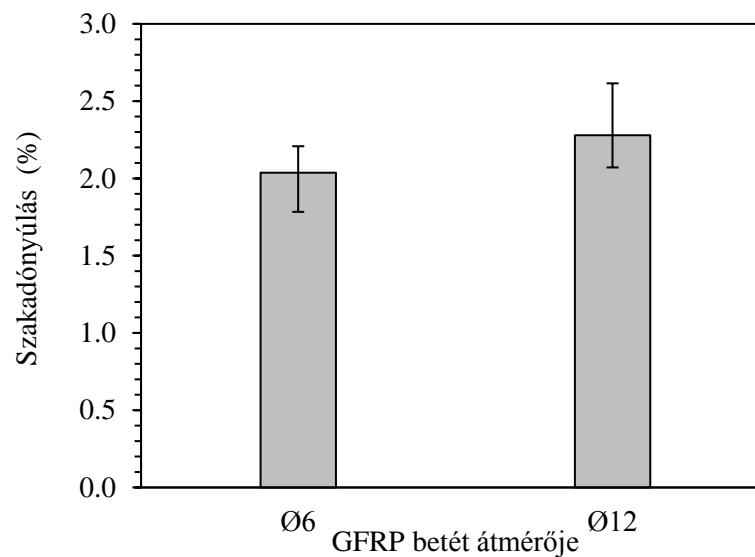
Átmérő (névleges) (mm)	$F_{\max}$ (kN)	Fajlagos nyúlás (%)			
		Egyedi (%)	Átlag (%)	SD <sup>1</sup> (%)	CV <sup>2</sup> (%)
6	27.26	1.78%	2.04%	0.16%	7.92
	30.20	2.19%			
	29.55	2.03%			
	31.16	2.21%			
	27.47	1.87%			
	29.51	2.14%			
12	128.56	2.08%	2.28%	0.20%	8.84
	130.13	2.43%			
	130.28	2.62%			
	128.25	2.07%			
	123.13	2.14%			
	129.24	2.34%			



8. ábra: Lúgoldatban tárolt próbatetek húzószilárdság kísérleti eredményei



9. ábra: Lúgoldatban tárolt próbatetek rugalmassági modulus kísérleti eredményei



10. ábra: Lúgoldatban tárolt próbatetek fajlagos nyúlás kísérleti eredményei

## 6. Együttdolgozás (tapadás) vizsgálat

Kísérleteinkhez a kihúzó vizsgálatot választottunk. 150 mm élhosszúságú kocka sablonokban készítettük a próbatesteket. A GFRP betéteket függőlegesen helyeztük el a sablonokban, miután az  $5\varnothing$  hosszúságú tapadási zónát alakítottuk ki a próbapálcák felületén, ahol  $\varnothing$  a betét névleges átmérője. Vegyes tárolás után, 28 napos korban végeztük el a kísérleteket. A kihúzó vizsgálatokat elmozdulás vezérelten, 1 mm/perc sebességgel terheltük, annak érdekében, hogy a kapcsolati szilárdság elérése utáni viselkedést is megfigyelhessük. A terhelő erőt és a relatív elmozdulásokat terhelt (3 elektromágneses indukció elvén működő útdó segítségével), illetve terheletlen (1 elektromágneses útdó) oldalon is mértük. Öt, névlegesen azonos próbatestet vizsgáltunk az egyes átmérők esetében.

A GFRP betétek beágyazási hossza rövid ( $5\varnothing$ ), ezért a kapcsolati feszültség egyenletes eloszlását feltételezzük a tapadási hosszban. A kapcsolati feszültséget az (1) egyenlet segítségével számoljuk:

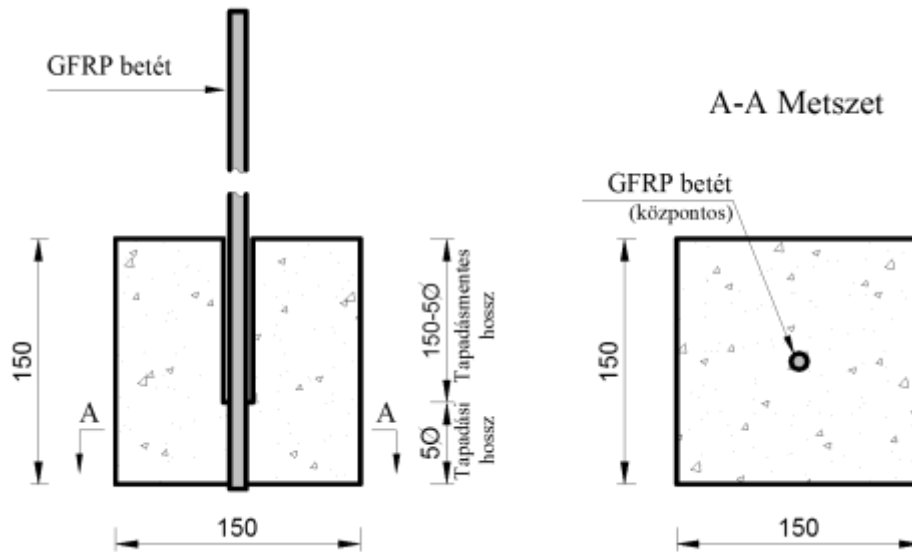
$$\tau_b = \frac{F}{\pi\varnothing l_b} \quad (1)$$

ahol:            F – terhelő erő  
                   $\varnothing$  – FRP betét névleges átmérője  
                   $l_b$  – tapadási (beágyazott) hossz.

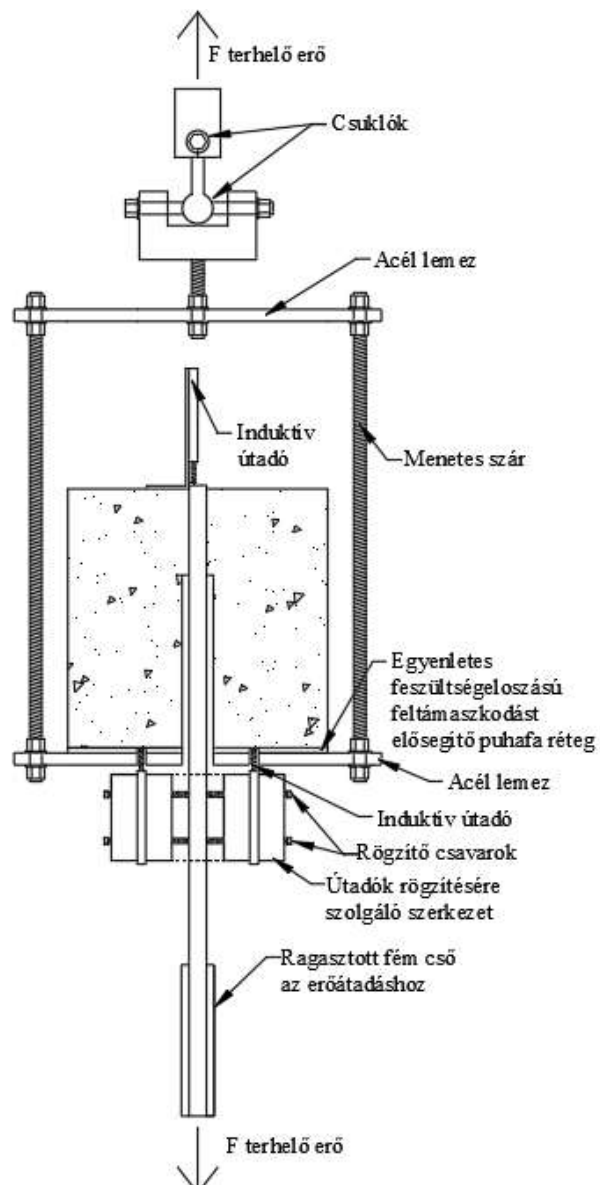
Vizsgálóberendezés: Instron 5989 univerzális anyagvizsgáló gép, 600 kN (0,01 N pontosság), elmozdulás mérésre HBM WI/10MM-T elektromágneses útdókat használtunk.

A kihúzó próbatestek sematikus ábrázolását a 11. ábrán mutatjuk be. A kihúzó vizsgálat kialakításáról egy vázlatot adunk meg a 12. ábrán.

A kihúzó vizsgálatok eredményeit 8. táblázatban és 13. ábrán adjuk meg.



11. ábra: Kihúzó vizsgálat próbatest vázlata (150 mm)



12. ábra: Kihúzó (P-O) kísérleti elrendezés vázlata

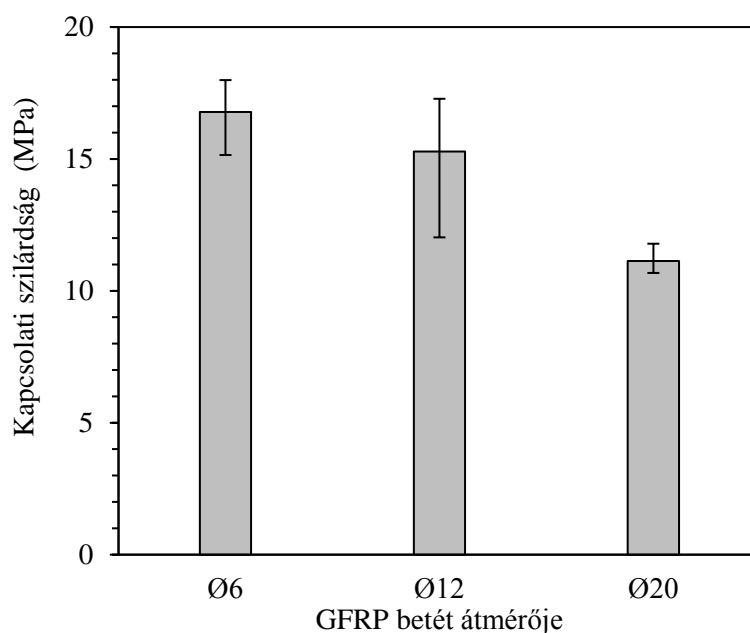
8. táblázat: Együttdolgozás (tapadás) vizsgálatok kísérleti eredményei

Átmérő (névleges) (mm)	Tapadási hossz (5Ø) (mm)	Tapadási felület (mm <sup>2</sup> )	F <sub>max</sub> (kN)	τ <sub>b,max</sub> (MPa)	τ <sub>b,max</sub> (MPa)	SD (MPa)	CV (%)
6	30	565.5	9.31	16.46	16.78	0.95	5.69
			9.60	16.99			
			8.57	15.15			
			9.79	17.32			
			10.17	17.99			
12	60	2261.9	39.09	17.28	15.28	1.87	12.26
			27.21	12.03			
			38.37	16.97			
			33.81	14.95			
			34.32	15.17			
20	100	6283.2	67.10	10.68	11.13	0.44	3.97
			74.06	11.79			
			70.92	11.29			
			67.74	10.78			
			-	*megrepedt a beton			

<sup>1</sup> Az egyedi eredmények szórása

<sup>2</sup> Variációs koefficiens

τ<sub>b,max</sub> = kapcsolati szilárdság (tapadás)



13. ábra: Kihúzó vizsgálatok kísérleti eredményei — átlagértékek, illetve minimum és maximum értékek

## 7. Kísérleti (egyenértékű) átmérő

Az egyenértékű átmérőket, kísérleti úton, folyadék kiszorítás elve alapján meghatározott

9. táblázat: Egyenértékű átmérő

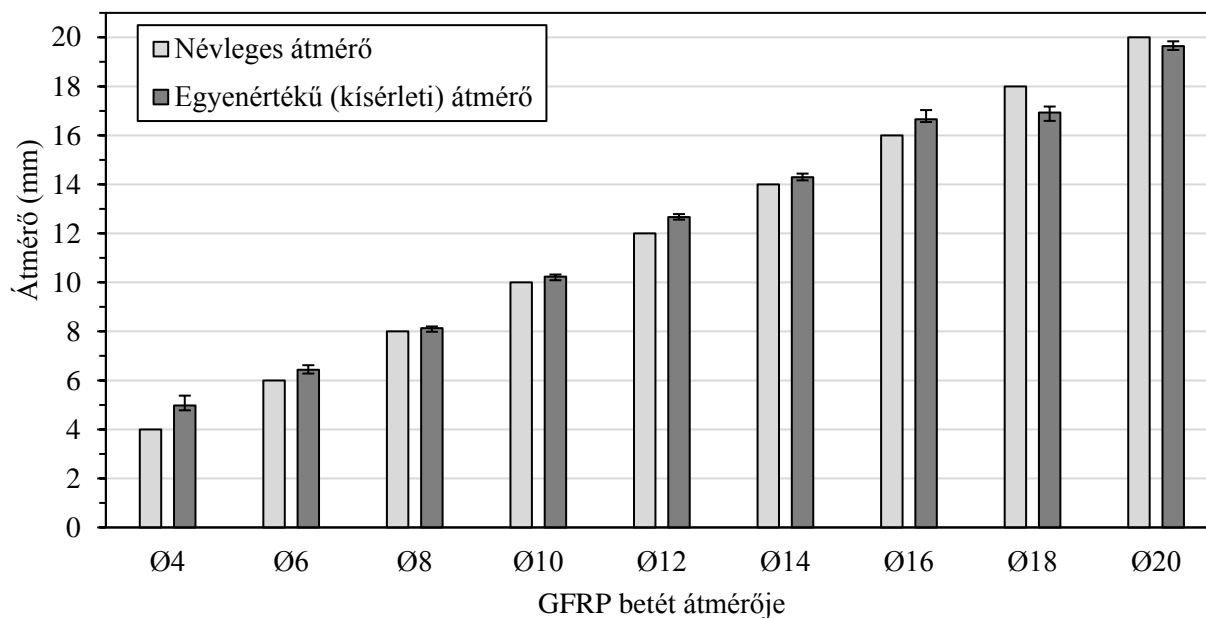
Átmérő (névleges) (mm)	Kísérleti úton meghatározott egyenértékű átmérő			
	Egyedi (mm)	Átlag (mm)	SD <sup>1</sup> (mm)	CV <sup>2</sup> (%)
4	5.38	4.98	0.22	4.44
	4.86			
	4.81			
	5.05			
	4.78			
6	6.42	6.44	0.11	1.69
	6.28			
	6.44			
	6.42			
	6.62			
8	8.14	8.13	0.08	0.96
	8.15			
	7.99			
	8.20			
	8.20			
10	10.09	10.23	0.08	0.82
	10.21			
	10.25			
	10.30			
	10.32			
12	12.67	12.66	0.07	0.58
	12.63			
	12.56			
	12.67			
	12.79			
14	14.38	14.29	0.10	0.70
	14.16			
	14.24			
	14.44			
	14.25			
16	16.62	16.66	0.19	1.13
	16.55			
	16.55			
	16.54			
	17.03			



18	16.95	16.93	0.19	1.12
	17.01			
	16.93			
	17.18			
	16.59			
20	19.77	19.65	0.14	0.71
	19.62			
	19.51			
	19.84			
	19.48			

<sup>1</sup> Az egyedi eredmények szórása

<sup>2</sup> Variációs koefficiens



14. ábra: Névleges és egyenértékű átmérők összehasonlítása

## 8. Geometriai jellemző meghatározása: méretellenőrzés

Az alábbiakban a GFRP betétek legfontosabb felületi és geometriai jellemzőit adjuk be.

10. táblázat: Geometriai jellemzők

Átmérő (névleges) (mm)	Külső átmérő ( $D_E$ )				Belső átmérő ( $D_I$ )				Bordák menetemelkedése (t)				Bordamagasság ( $h_i$ )				Bordaszélesség ( $w_i$ )			
	Egyedi (mm)	Átlag (mm)	SD <sup>1</sup> (mm)	CV <sup>2</sup> (%)	Egyedi (mm)	Átlag (mm)	SD <sup>1</sup> (mm)	CV <sup>2</sup> (%)	Egyedi (mm)	Átlag (mm)	SD <sup>1</sup> (mm)	CV <sup>2</sup> (%)	Egyedi (mm)	Átlag (mm)	SD <sup>1</sup> (mm)	CV <sup>2</sup> (%)	Egyedi (mm)	Átlag (mm)	SD <sup>1</sup> (mm)	CV <sup>2</sup> (%)
4	6.27	6.35	0.09	1.44	4.39	4.37	0.06	1.30	12.54	13.20	0.54	4.12	0.96	0.98	0.04	3.74	1.73	1.79	0.12	6.43
	6.43				4.43				12.94				1.03				1.98			
	6.25				4.39				13.61				0.93				1.80			
	6.45				4.31				13.89				0.98				1.67			
	6.33				4.30				13.01				0.99				1.78			
6	7.75	7.82	0.05	0.59	5.98	5.98	0.04	0.62	12.95	13.75	0.85	6.15	0.97	1.02	0.05	4.88	1.83	1.91	0.10	5.44
	7.84				5.99				14.11				1.03				1.86			
	7.80				5.98				15.05				1.02				2.08			
	7.86				6.03				13.18				1.00				1.95			
	7.85				5.93				13.46				1.10				1.85			
8	9.52	9.54	0.10	1.00	7.96	7.89	0.07	0.88	13.68	13.72	0.60	4.39	0.59	0.76	0.10	13.55	1.99	2.23	0.20	8.77
	9.39				7.78				13.54				0.80				2.50			
	9.65				7.93				12.82				0.74				2.20			
	9.54				7.90				14.22				0.84				2.34			
	9.58				7.86				14.32				0.84				2.14			
10	11.41	11.46	0.05	0.39	9.78	9.89	0.08	0.77	14.07	14.54	0.87	5.96	0.75	0.81	0.09	11.24	2.39	2.52	0.14	5.57
	11.47				9.97				15.73				0.75				2.57			
	11.42				9.86				13.44				0.88				2.54			
	11.53				9.94				14.95				0.93				2.38			
	11.47				9.91				14.49				0.73				2.72			

12	13.87	13.92	0.04	0.31	12.08	12.14	0.07	0.55	10.74	11.13	0.33	2.95	0.98	0.91	0.11	12.39	2.52	2.81	0.23	8.22
	13.91				12.14				10.85				0.85				2.68			
	13.94				12.17				11.17				0.91				3.00			
	13.99				12.08				11.43				1.04				2.76			
	13.92				12.24				11.47				0.76				3.08			
14	15.66	15.55	0.12	0.79	14.04	13.90	0.20	1.42	10.48	10.45	0.04	0.42	0.73	0.87	0.09	10.14	2.98	3.10	0.08	2.58
	15.38				13.64				10.39				0.94				3.13			
	15.45				13.73				10.45				0.87				3.18			
	15.63				14.08				10.45				0.95				3.07			
	15.61				13.98				10.50				0.87				3.15			
16	18.03	17.94	0.18	1.02	16.11	16.16	0.18	1.14	11.70	10.77	0.74	6.88	1.37	1.11	0.22	20.06	2.80	3.08	0.28	9.07
	17.98				16.10				11.38				1.27				2.77			
	18.18				15.96				10.44				1.12				3.34			
	17.79				16.46				10.40				0.83				3.18			
	17.73				16.16				9.93				0.96				3.33			
20	20.97	20.82	0.22	1.05	19.18	19.09	0.12	0.62	10.90	10.93	0.10	0.88	0.92	0.87	0.08	9.67	3.06	2.96	0.26	8.74
	20.97				19.21				10.80				0.89				2.92			
	20.48				18.91				10.93				0.83				2.56			
	20.97				19.08				11.06				0.96				3.01			
	20.72				19.08				10.98				0.74				3.27			

<sup>1</sup> Az egyedi eredmények tapasztalati szórása

<sup>2</sup> Variációs koefficiens

Megj.:

Belső átmérő ( $D_I$ ): borda nélküli átmérő

Külső átmérő ( $D_E$ ): átmérő a bordával együtt

A 18 mm átmérőjű GFRP betétre a 16 mm átmérőhöz tartozó jellemzők érvényesek.