



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

## **Ultra nagy teljesítőképességű szálerősítésű beton (UHPFRC) tervezése és laboratóriumi vizsgálatai**

Készítette: Molnár Gábor János (AFYTG5)

Konzulensek: Dr. Sólyom Sándor

Szijártó Anna

Budapest, 2024.

# Tartalomjegyzék

|        |                                       |    |
|--------|---------------------------------------|----|
| 1.     | Szakirodalmi áttekintés .....         | 3  |
| 2.     | Célkitűzések .....                    | 11 |
| 3.     | Kísérleti terv .....                  | 12 |
| 3.1.   | Kísérleti anyagok.....                | 12 |
| 3.1.1. | Alkalmazott szálak .....              | 12 |
| 3.1.2. | Alkalmazott beton összetételek .....  | 13 |
| 3.2.   | Próbatestek elkészítése .....         | 14 |
| 3.3.   | Vizsgálatok.....                      | 14 |
| 3.3.1. | Frissbeton vizsgálatok. ....          | 14 |
| 3.3.2. | Szilárd beton vizsgálatok: .....      | 15 |
| 4.     | Eredmények.....                       | 20 |
| 4.1.   | Nyomó- és hajlító-húzószilárdság..... | 20 |
| 4.2.   | Rugalmassági modulus.....             | 23 |
| 4.3.   | CMOD vizsgálat.....                   | 25 |
| 5.     | Összefoglalás.....                    | 31 |
| 6.     | Summary .....                         | 34 |
| 7.     | Köszönetnyilvánítás .....             | 36 |
| 8.     | Hivatkozások .....                    | 37 |
| 9.     | Ábrajegyzék .....                     | 40 |
| 10.    | Táblázatjegyzék.....                  | 41 |
| 11.    | Mellékletek.....                      | 42 |

## Bevezetés

Napjainkban a beton az egyik legnagyobb mennyiségben felhasznált építőanyag. A ma ismert beton a 19. században ért el jelentős áttörést, azonban egyes tulajdonságai, mint például a húzószilárdsága több esetben sem bizonyult megfelelőnek, ezen tulajdonságok javítása érdekében több megoldás is született, így terjedt el a vasbeton és a szálerősítésű beton.

Szálerősítésű betonok alkalmazása egyre elterjedtebb napjainkban. A szálerősítésű beton készítése azon az elven alapszik, hogy a ridegnek tekinthető betonból igyekszünk duktilisabb anyagot létrehozni. A szálerősített betonoknak létezik egy speciális csoportja, az ultra nagy teljesítőképességű szálerősítésű beton, amelyek kiemelkedően magas mechanikai tulajdonságokkal, kopásállósággal, időjárás és vegyszerállósággal rendelkeznek. Nemzetközi szinten és magyarországi viszonylatban is kevésbé elterjedtek az UHPFRC-hez alkalmazott szálak a normál szálerősítésű betonoknál alkalmazott szálakhoz képest, ezzel a problémával már az acélszálak beszerzésekor szembesültem.

Dolgozatom célja a szakirodalomban fellelhető UHPFRC betontervezési módszertanok felkutatása és szintetizálása után több recept elkészítése eltérő arányú száladagolással, és az elkészült próbatesteken a szálak hatásait igazolni. A folyamat során kifejlesztett betonösszetételen laboratóriumi körülmények között az alábbi vizsgálatokat végeztem el:

Frissbeton vizsgálatok:

- Testsűrűség vizsgálat
- Konzisztencia vizsgálat

Szilárd beton vizsgálatok:

- Nyomószilárdság vizsgálat
- Hajlító-húzószilárdság vizsgálat
- CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) vizsgálat
- Rugalmassági modulus vizsgálat

Concrete is one of the most widely used construction materials today. The concrete known today achieved significant breakthroughs in the 19th century; however, some of its properties, such as tensile strength, have often been found lacking. To improve these properties, various solutions have emerged, leading to the adoption of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete.

There exists a special group of fiber-reinforced concretes known as ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC), which exhibits exceptionally high strength properties, abrasion resistance, and weather and chemical resistance. Internationally, and particularly in Hungary, the fibers used in UHPFRC are less common compared to those in standard fiber-reinforced concrete, which I encountered when sourcing steel fibers.

The aim of my thesis is to explore and synthesize the concrete design methodologies for UHPFRC found in the literature, and to investigate several basic recipes with varying fiber dosages and to validate their effects through trial mixes. In the laboratory, I plan to conduct the following tests on the developed concrete composition under controlled conditions:

#### Fresh Concrete Tests:

- Density test
- Consistency test

#### Hardened Concrete Tests:

- Compressive strength test
- Flexural strength test
- CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) test
- Modulus of elasticity test

## 1. Szakirodalmi áttekintés

A beton az egyik leggyakrabban használt építőanyag napjaikban, a beton természetes tulajdonságaiból adódnak hibák is, mint például a nagyfokú ridegség, alacsony szakító szilárdság, gyenge repedésállóság. E hátrányok leküzdése érdekében a betonba szálakat alkalmaznak a szívósság növelése érdekében, például fémszálakat, szintetikus szálakat, ásványi szálakat stb. [Li P.P. et al. 2020]

A szálak betonban történő felhasználása az 1960-as évek elejére vezethető vissza, amikor is Batson először módszeresen javasolta a szálerősítésű beton (FRC) koncepcióját és bevezette a szálak eloszlásának elméletét. Azóta az FRC-ket az elmúlt 60 évben folyamatosan továbbfejlesztették. A nagy szilárdságú és tartós beton iránti növekvő kereslet miatt az UHPC-t (ultra high performance concrete) az 1990-es évek közepén fejlesztették ki, amelynek jellemzője a nagy tömörségű struktúra és a kiváló mechanikai tulajdonságok. [Zollo RF et al 1997]

Az UHPFRC egy fejlett szálerősítésű beton, amely magas cementtartalomból, szilikapor, szálak, szuperfolyósítószer (SP) és egyéb anyagok keverékéből, illetve kiegészítő cementtartalmú anyagokból áll. Az UHPFRC-nél a 'packing theory of solid materials' alapján célszerűen alacsonyan tartani a víztartalmat ( $w/b < 0,2$ ), hogy magas nyomószilárdságot tudjunk elérni. Ezek a tulajdonságok eredményezik az UHPC magas nyomószilárdságát ( $>150$  MPa), ami körülbelül 3-16-szor nagyobb a normál betonhoz képest. [Meng Q et al 2020]

Számos különböző kritérium létezik az UHPC meghatározására, pl. az Amerikai Beton Intézet (ACI) 239. bizottsága, American Society for Testing and Materials (ASTM) C1856, U.S. Közlekedési Minisztérium Szövetségi Autópálya-felügyelet (FHWA) valamint a Japán Society of Civil Engineers (JSCE) mind különböző definíciót határoz meg. A legtöbb meghatározás azt írja elő, hogy az UHPC-nek 150 MPa-nál nagyobb nyomószilárdsággal és legalább 5 MPa szakítószilárdsággal kell rendelkeznie. Ezekkel a kiváló mechanikai tulajdonságokkal, amikor az UHPC-t alkalmaznak a szerkezetben, az képes redukálni annak önsúlyának 1/2-2/3-át a normál betonhoz képest, miközben teljesíti a teherbírási feltételeket. [ACI. ACI 239R-18 2018, ASTM International; 2017.]

Shi et al. rámutatott, hogy az UHPC előállításának legfontosabb paraméterei közé tartozik a porozitás csökkentése, a mikroszerkezet javítása és a friss beton homogenitásának fokozása. Ezek a tényezők szorosan összefüggenek a keveréktervezéssel és az UHPC-ben használt nyersanyagokkal. Kiterjedt kutatásokat végeztek a nyersanyagok és adalékanyagok UHPC-re gyakorolt hatásáról, mint például a nanorészecskék, a szilícium-dioxid-füst, pernye, mészkőpor, stb hatásairól. Különböző modelleket javasoltak az UHPC keveréktervezésének irányítására, pl. Lagrangian Particle Dispersion Model (LPDM), Compressive Packing modell (CPM), Aim & Goff modell stb. [Shi C et al 2015]

A módosított Andreassen és Andersen-modell (AAM) az egyik legnépszerűbb a modellek közül, amelyeket az utóbbi években az UHPC keveréktervezéséhez alkalmaznak. A szálak alkalmazása alapvető fontosságú az UHPC esetén a magas mechanikai tulajdonságok eléréséhez.

A szálak közül az acélszálak a legmegfelelőbbek erre a célra, ezek az UHPC esetén leggyakrabban használt szálak, tekintettel kiváló mechanikai tulajdonságaikra. Abbas és munkatársai megállapították, hogy a magasabb acélszál-tartalmú UHPC nagyobb csúcsterhelést és képlékeny viselkedést mutatott a terhelések során. Wille és munkatársai arról számoltak be, ha a UHPC 8V% szálakat tartalmaz, akkor a nyomószilárdság elérheti a 292 MPa értéket 28 napos korában. [Yu R 2014 et al. 2014, Yu R et al. 2015]

Az UHPC hajlítószilárdsága és lehajlása a csúcsterhelésnél szintén javul az acélszálak használatával. Más szintetikus szálak, pl. PVA szálak és PP szálak alkalmazásával kedvezőbb tulajdonságokat érünk el az UHPC-nél tűzvédelmi szempontok tekintetében. Ásványi szálak alkalmazása esetén, mint például bazaltszálak és wollastonitszálak az UHPC mechanikai tulajdonságaira és alakíthatóságaira lesznek kedvező hatással. [Du J et al. 2021]

Az utóbbi években a szénszálakról megállapították, hogy kis adagolásban szintén jelentősen javítják az UHPC mechanikai tulajdonságait. A szálak típusa, a száltartalom, a szálgeometria, a szálak orientációja mind fontos tényezők, amelyek befolyásolják az UHPC teljesítőképességét, beleértve a bedolgozhatóságot, mikroszerkezetet, zsugorodást és tartósságot is. [Meng W 2018]

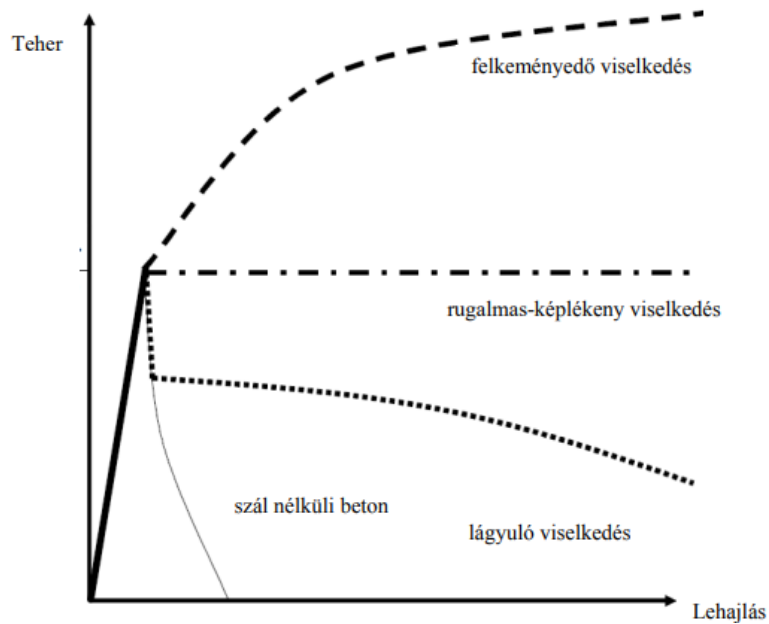
Szálerősítésű betonhoz különböző anyagú szálakat alkalmaznak: acél-, műanyag-, üveg-, aramid-, valamint természetes szálakat. Az ASTM C 116-03 szabvány a szálerősítésű betont 3 általános osztályba sorolja [elastoplastic.com]:

- 1. típus: acélszál erősítésű beton
- 2. típus: üvegszál erősítésű beton
- 3. típus: szintetikusszál erősítésű beton

Az UHPC-ben leggyakrabban használt szálak közé tartoznak az acélszálak, PE-szálak, PVA-szálak, PP-szálak, szénszálak és bazaltszálak. [Ayub T 2014]

A szintetikus szálaknak, mint például a PP-szál, PVA-szál és a PE-szálak, az acélszálakhoz képest alacsonyabb a szakítószilárdságuk. Használatuk korlátozottan javítja a nyomó- és szakítószilárdságot. Másrészt képesek javítani a tűzállóságot. A szénszálak, amelyek a legmagasabb szakítószilárdsággal és Young-modulusal rendelkeznek, javíthatják a mechanikai tulajdonságokat és csökkentik a beton autogén zsugorodását kis adagolás esetén. [Hannawi K 2016]

Általánosan elfogadott, hogy az acélszálak szokásos adagolása nem növeli jelentősen a beton hajlító-húzószilárdságát, azonban acélszálak alkalmazása esetén a mikro repedések kialakulása után az acélszálak veszik fel a húzófeszültséget.



1. ábra: Terhelés-lehajlás diagram [CCANZ, 2009]

Az acélszálak számos területen használatosak [Balázs, Lublóy, 2006], ideértve

- az ipari padlókat,
- kültéri betonlapokat,
- alagútelemeket,
- lövellt betonokat,
- csőelemeket,
- vékony előregyártott szerkezeteket,
- valamint páncélszekrények és páncéltermek falait.

Az acélszállal erősített beton alkalmazására néhány példa:

- Magyarországon az 1970-es években már gyártottak acélszál erősítésű betonból készült SIOME csöveket, melyek összesen 80 km hosszan készültek, 2400 mm szerkezeti hosszal. Az acélszálak alkalmazása akár 1,5-2,7-szeres teherbírás-növekedést biztosított, a csövek átmérőjétől függően. [Balázs, 2002]
- Az első nagy méretű acélszál erősítésű ipari betonpadló 1989-ben készült a Suzuki esztergomi autógyárának szerelőcsarnokában, ahol DRAMIX acélszálakat használtak. [Balázs, Polgár, 1999].
- Félix Candela által tervezett valenciai Oceánográfiai Múzeum héjszerkezetében a feszített vasbeton és acélszál erősítés kombinációját alkalmazták, amely mindössze 60 mm vastag, lövellt betonból készült szerkezetet eredményezett [Bergmeister, Fingerloos, Wörner, 2011]

A műanyagszálak használata napjainkban egyre elterjedtebbé válik. Különböző szabványok eltérően osztályozzák ezeket, Magyarországon az MSZ EN 14889-2:2007 szabvány szerint a polimerek, például poliolefin, polietilén, polipropilén, nylon, poliészter, PVA és aramid szálak két fő kategóriába sorolhatók [Balázs, Lublói, 2006]:

1. Mikro szálak:

- I.a osztály: mono-szálak, amelyek átmérője kisebb, mint 0,3 mm,
- I.b osztály: fibrillált szálak, szintén 0,3 mm-nél kisebb átmérővel.

2. Makro szálak: ide tartoznak a 0,3 mm-nél nagyobb átmérőjű szálak.

Kutatások alapján a mikro műanyagszálak kedvezően befolyásolják a friss beton tulajdonságait, mivel segítenek csökkenteni a képlékeny zsugorodásból eredő repedések kialakulását vagy akár teljesen meg is szüntethetik. Magyarországon többek között Fenyvesi vizsgálta a beton korai zsugorodási érzékenységét [Balázs, Lublói, 2006].

A mikro műanyagszálak előnyei közé tartozik [Balázs, Lublói, 2006]:

- a kivérzés csökkentése,
- a beton szállítás és bedolgozás alatti szétosztályozódásának megelőzése,
- a zsugorodási repedések kialakulásának megakadályozása vakolatoknál,
- lövellt technológia esetén az anyagveszteség csökkentése,
- a repedések csökkenése, ami javítja a beton vízzáróságát, fagyállóságát, olvasztósókkal szembeni ellenállását, fáradási szilárdságát és hangelnyelő képességét,
- a vakolatréteg vastagításának lehetősége,
- a beton tűzállóságának növelése, mivel a szálak égése során keletkező kapillárisok segítik a betonba zárt vízpára távozását, csökkentve a belső feszítőerőket.

A mikro műanyagszálakat leggyakrabban vakolatokhoz, esztrichekhez, lövellt betonokhoz és kisebb terhelésű ipari padlókhöz használják.

A makro műanyagszálakat csak néhány évtizede kezdték el alkalmazni, de korrózióállóságuk miatt egyre több típus és felhasználási mód válik elérhetővé. Ezeket a szálakat általában repedésáthidalásra, valamint acélszálak, acélhálók vagy szerkezeti acél helyettesítésére használják. A műanyagszálak előnye az acélszálakkal szemben, hogy korróziómentesek, sav- és lúgállóak, nem vezetnek az elektromos áramot és nem indukálnak mágneses teret. A makro műanyagszálak a betonban kialakuló repedések után kezdik el kifejteni hatásukat, ami növeli a beton duktilitását. [Kerényi, 2014]

Korábbi kutatások alapján a makro műanyagszálak emellett csökkentik a hőhatásra kialakuló réteges leválás kockázatát. Míg acélszálak használatakor 500–800 °C-on végzett kísérletek során robbanásszerű tönkremenetelt figyeltünk meg, makro műanyagszálak esetében csak a szálak megolvadása és kiégése történt, robbanás nélkül.

A makro műanyagszálak leggyakoribb felhasználási területei [Juhász, 2013]:

- ipari padlók,
- villamospálya,
- különböző előregyártott elemek.

A 2000-es évektől kezdve számos ország foglalkozott az UHPC különféle alkalmazásaival. Franciaországban számos szerkezetet, például hidat, homlokzatot és födémeket építettek UHPC-ből. Az UHPC-nek egyre nagyobb alkalmazásai vannak az amerikai autópálya-infrastruktúrák karbantartásában és fejlesztésében. Ausztráliában jelentős UHPC-fejlesztési tevékenységeket végeztek a hídszerkezetek terén. Svájcban az UHPC-t leginkább szerkezetek in situ megerősítésére alkalmazták. UHPC hidak épültek Hollandiában és Spanyolországban. Malajziában az UHPC-t hídszerkezetekhez használták a fenntartható hídépítési kezdeményezés érdekében, 2010 óta összesen 113 UHPC hidat építettek vagy építenek jelenleg is. [N.M. Azmee, N. Shafiq 2018]

A legelső UHPC szerkezet egy Kanadában felelhető gyalogos hídnál készítették el, amely Sherbrooke városában található (2. ábra). Építésének éve 1997. [N.M. Azmee, N. Shafiq 2018]



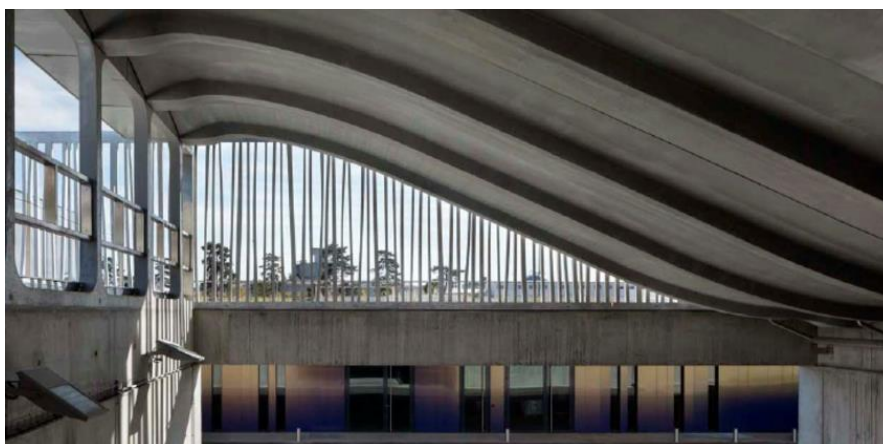
2. ábra: Sherbrooke-Footbridge (<https://structurae.net>)

Az elsőként a SAMARIS európai projekt keretében kifejlesztett UHPFRC-t vékony fedőrétegben használták vasbeton vagy feszített beton hídpályák javítására. Így növelték a szerkezet merevségét, mechanikai szilárdságát, valamint tartósságát, miközben mellőzték a vízszigetelő membránt és annak további karbantartását. Az alkalmazás gyakorisága jelenleg növekszik a svájci infrastruktúrában. Ennek a koncepciónak a kiterjesztését alkalmazzák acél hidak esetén. Az özönvíznek és kopásnak kitett szerkezetek javítására és védelmére nagyon hatékony megoldásokat kínál az UHPFRC használata. [Thibaux T 2011]



3. ábra: Ilzbach híd javítása UHPFRC-vel

Az első ikonikus példa az UHPFRC-re a Millau híd kapuja feletti tető, mely kiemelte az UHPFRC tulajdonságát, hogy összetett formákban használható és vékony membránokat képezzenek belőle, mivel az UHPFRC anyagok általában hajlításkor megkeményednek, de tiszta feszítésben lágyulnak. Ezen túlmenően a nagyméretű UHPFRC szegmensek gyártása megköveteli a reológia tökéletes szabályozását, a korai hőhatások és a vastagságváltozások miatti termikus gradiensek szigorú nyomon követését, valamint az elemek kezelésére és összeszerelésére vonatkozó speciális rendelkezéseket az elhajlás és feszültség szabályozása érdekében. [Hajar Z et al 2004]



4. ábra: Achères plant for water treatment [researchgate.net]

A mára megvalósult legnagyobb UHPFRC szerkezet a Japánban található Haneda repülőtér (5. ábra) bővítése során készült el. A tenger felett acél cölöpökre készítettek egy UHPFRC lemezt, amely előregyártott elemekből készült. Az UHPFRC alkalmazása a hagyományos betonnal szemben lehetővé tette a szerkezet súlyának csökkentését. A Haneda repülőtér egy szeizmikus zónán helyezkedik el, ahol a földrengések mellett tengervíz is károsítja a szerkezet. Ezek az körülmények követelték meg, hogy a tengeren történő építkezések során a UHPFRC legyen alkalmazva, mivel mind a tenger által generált dinamikus terhet, mind a kopást jobban viseli, ezáltal kevesebb karbantartás szükséges és lassabban öregszik a szerkezet, mint ha hagyományos betont használnának. [Tanaka Y. et al 2011]



5. ábra: Haneda repülőtér bővítése [reserchgate.net]

Franciaország vezető szerepet tölt be UHPFRC alkalmazásban. Az árnyékoló szerkezetek, burkolatok és tetőszerkezetek kialakításában versenyeznek a UHPFRC szerkezetek az acél és alumínium ötvözetekből készült szerkezetekkel a nagy karcsúságuknak és tartósságuknak köszönhetően. A párizsi Jean Bouin stadion tetője és homlokzata egy háromdimenziós hálót alkot, amely nagy, háromszög alakú, bordás UHPFRC lemezekből áll (maximum 9 m hosszúságban), melyeket egy acél szerkezet tart (6. és 7. ábra) [Gazon G., Ricciotti et al.].



6. ábra: Jean Bouin stadion Francia ország ([aida-architecture.blogspot.com](http://aida-architecture.blogspot.com))



7. ábra: Bouin stadion Francia ország (aida-architecture.blogspot.com)

Az **UHPFRC** felhasználhatósága sokoldalú [Behloul M 2007, Toutlemonde F 2011]:

1. **Agresszív környezetnek kitett szerkezetek:** Az olyan helyeken, ahol a környezet különösen károsító hatású (pl. tengeri környezet, kémiai támadások), az UHPFRC kiválóan ellenáll az abrazív hatásoknak és a korróciónak.
2. **Szerkezetek, ahol fontos a súlycsökkentés:** Földrengésveszélyes területeken, gyenge talajon alapozott szerkezeteknél, vagy távoli helyszíneken építendő, karcsú szerkezeteknél az alacsony súly előnyös, amit az UHPFRC alkalmazása biztosíthat.
3. **Ütésállóságot igénylő szerkezetek:** Például hulladéktároló konténerek vagy védőburkolatok esetében, ahol a szerkezeteket ütések érhetik.
4. **Magas minőségű felületet és különleges formákat igénylő szerkezetek:** Az UHPFRC lehetővé teszi az egyedi formák és kiváló felületminőségű elemek előállítását.
5. **Kompozit szerkezetek:** Az UHPFRC magas szilárdság/modulus aránya miatt előnyös, ha acéllal vagy szénzállal kombinálva használják. Alacsony zsugorodása és kúszása ideálissá teszi a kompozit szerkezetekhez.
6. **Bonyolult és sűrű vasalást igénylő szerkezetek:** Az UHPFRC lehetővé teszi az ilyen szerkezetek egyszerűbb kialakítását és öntését, elkerülve a hagyományos vasalat túlkomplikáltságát és a nehézkes kivitelezést.

Az UHPFRC tehát kiváló lehetőséget nyújt számos olyan esetben, ahol fontos a tartósság, a nagy szilárdság, az alacsony súly és a különleges formák kialakítása.

## 2. Célkitűzések

Az ultra nagy teljesítőképességű szálerősítésű beton (UHPFRC) hazánkban, de még a világban is kevésbé elterjedt, amit jól tükröz, hogy nincsen egységes nemzetközi szabvány sem. Némely országokban nagyobb teret tudott hódítani az UHPFRC, amit jól mutat, hogy ugyan léteznek szabványok, de egyesített nemzetközi szabvány nincs, valamint jelenleg a fellelhető szakirodalom is elég csekély. A dolgozat egyik fő célja ezen anyag jellemzőinek laboratóriumi vizsgálatok által vezérelt megismerése, megvalósíthatóságának kimutatása, a hazai szakmával való megismertetésének elősegítése.

A dolgozat elkészítése során több betontervezési módszertant kutattunk fel, amelyek szintetizálása után három referenciát készítettünk eltérő száltartalommal (1,5, 2, 2,5, 3 és 4V%). A kutatás során 14 betonkeveréket vizsgáltam meg, amelyekből kettő szál nélküli referencia beton volt. Minden betonösszetételből 9 próbatestet készítettem. A rugalmassági modulus vizsgálatot 70×70×250 mm élhosszúságú hasábon végeztem el, amely egy roncsolás mentes vizsgálat ezért a próbatesteket fel tudtam használni ezután a CMOD vizsgálatához. A 100×100×100 mm-es próbatesteken nyomószilárdság vizsgálatot, a 40×40×160 mm-es próbatesteken pedig hajlító-húzószilárdság és nyomószilárdság vizsgálatot végeztem el. Mind a száltípus, mind pedig a szálak mennyisége kísérleti paraméter volt. Három féle száltípust alkalmaztam, kettő acél (SAM 0,22×6, Wirex 20/13) illetve egy műanyagszálat (BASF Masterfibre 401). Az iteratív folyamatok során kifejlesztett betonösszetételeket laboratóriumban vizsgáltam meg a TDK dolgozat során. A dolgozat során a betonösszetételek fontosabb tulajdonságait, úgy, mint húzó-hajlító- és nyomószilárdságát, valamint rugalmassági modulusát vizsgáltam meg.

Az acélszálak a betonacél részleges, illetve esetleg teljes kiváltására szolgál. A szálak a berepedés utáni állapotban felveszik a betonban keletkező maradó húzóerőket. A szálak mennyiségétől és típusától függően nő a beton repedésáthidaló képessége törési összenyomódása, nő a beton szívóssága, nő a fáradási szilárdsága, valamint a fajlagos ütmunka bírása. Az egyik legfontosabb jellemző, melyet befolyásolnak a szálak az UHPFRC-ben, az a strain hardening. A normál szálerősítésű betonokban éppen csak annyi szál van, hogy a rideg tönkremenetelt elkerüljük és nincsen felkeményedés sem. A strain hardening (felkeményedés) azt jelenti, hogy a beton az első repedések megjelenése után is képes további terhelést elviselni, mert a szálak fokozatosan aktiválódnak és átveszik a terhelést. Az UHPFRC-nél a berepedéshez szükséges terhelő erőből is többet tudnak a szálak felvenni, mint a normál szálerősítésű betonoknál. Ez esetben az a kérdés merül fel, hogy milyen tulajdonságú szálak mennyire hatékonyan befolyásolják a hajlító-húzószilárdságot? Ez a fajta deformáció-ellenállás a beton viselkedésének fokozatos javulásához vezet, ami miatt a szálerősítésű betonok kifejezetten hasznosak például földrengésálló építményekben és egyéb, dinamikusan terhelt szerkezetekben. A dolgozatom másik fő célja pedig az, hogy a strain hardening tulajdonságot méréséssel alátámasszuk, valamint a szálak további hatásait eredményekkel igazolhassuk.

### 3. Kísérleti terv

#### 3.1. Kísérleti anyagok

A vizsgálatokhoz 14 recept készítettem el, amelyhez az alábbi anyagokat használtuk:

- cement: CEM I 52,5 N (Duna-Dráva- Cement Kft.)
- adalékanyag: 0/4 osztályozott kvarc homok  
SIMIX 0,2/0,6 és 0,8/0,6 osztályozott homok
- kiegészítő anyag: FL30 kvarcliszt
- adalékszer: Glenium C300 folyósító (BASF Hungária Kft)

##### 3.1.1. Alkalmazott szálak

A vizsgálatokhoz 3 fajta szálát alkalmaztam, két acél és egy műanyag szálát.

A két féle acél szál SAM 0,22×6 és Arcelormittal Wirex 20/13 típus volt, a műanyag szál pedig BASF Masterfibre 401. A szálak tulajdonságai a gyártók által megadott adatok alapján az 1. táblázatban találhatóak. Az Arcelormittal Wirex 20/13 húzószilárdságára a gyártó nem adott meg pontos adatot, úgy fogalmazott vele kapcsolatban, hogy az alapanyag szilárdsága 3000 N/mm<sup>2</sup> feletti.

A keverések 1,5, 2, 2,5, 3 és 4 V% száltartalommal készültek.

1. táblázat: Alkalmazott szálak jellemzői

| Típus                               | SAM 0,22×6 | Wirex 20/13 | BASF Masterfibre 401 |
|-------------------------------------|------------|-------------|----------------------|
| Jelölés                             | S          | W           | M                    |
| Anyag                               | Acél       | Acél        | Műanyag (PVA)        |
| Alak                                | Egyenes    | Egyenes     | Egyenes              |
| Sűrűség (kg/m <sup>3</sup> )        | 7850       | 7850        | 1,3                  |
| Hossz (mm)                          | 6          | 13          | 12 ± 10%             |
| Szín                                | Arany      | Arany       | Fehér                |
| Sav- és lúgállóság                  | Nincs adat | Nincs adat  | Kitűnő               |
| Húzószilárdság (N/mm <sup>2</sup> ) | 2400       | 3000        | 800 ± 15%            |
| Rugalmassági modulus (Mpa)          | -          | -           | 8500 ± 15%           |
| Átmérő (mm)                         | 0,22       | 0,2         | 0,20 ± 50%           |

### 3.1.2. Alkalmazott beton összetételek

A vizsgálatom során 14 különböző beton receptúrát készítettem el, melyek során azonos vizet, cement típust és folyósító adalékszerzt, míg az adalékanyagokból kétfélét alkalmaztam. Így jól látható, hogy azonos összetételek és azonos anyagok esetén milyen hatást érhetünk el különböző szál típusok és adagolások esetén. Az alkalmazott receptúrákat a 2., 3. és 4. táblázat mutatja.

2. táblázat: Alkalmazott receptúrák

| Keverék jele:               | E-D4        | S1,5-D4             | S2,0-D4           | S4,0-D4           |
|-----------------------------|-------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| Cement, kg/m <sup>3</sup> : | 750         | 750                 | 750               | 750               |
| Víz/cement:                 | 0,29        | 0,29                | 0,29              | 0,29              |
| FL30, kg/m <sup>3</sup> :   | 75          | 75                  | 75                | 75                |
| Adalékanyag:                | 100% OH 0/4 | 100% OH 0/4         | 100% OH 0/4       | 100% OH 0/4       |
| Szál, V%                    | 0           | SAM 0,22×6<br>1,5V% | SAM 0,22×6<br>2V% | SAM 0,22×6<br>4V% |
| Folyósító, m <sub>c</sub> % | 0,82        | 1,05                | 1,08              | 1,45              |

3. táblázat: Alkalmazott receptúrák

| Keverék jele:               | E-D2                       | S1,5-D2                    | S2,0-D2                    | S2,5-D2                    | S3,0-D2                    | S4,0-D2                    |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Cement, kg/m <sup>3</sup> : | 750                        | 750                        | 750                        | 750                        | 750                        | 750                        |
| Víz/cement:                 | 0,29                       | 0,29                       | 0,29                       | 0,29                       | 0,29                       | 0,29                       |
| FL30, kg/m <sup>3</sup> :   | 75                         | 75                         | 75                         | 75                         | 75                         | 75                         |
| Adalékanyag:                | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 |
| Szál, V%                    | 0                          | SAM 0,22×6<br>1,5V%        | SAM 0,22×6<br>2V%          | SAM 0,22×6<br>2,5V%        | SAM 0,22×6<br>3V%          | SAM 0,22×6<br>4V%          |
| Folyósító, m <sub>c</sub> % | 0,92                       | 1,18                       | 1,28                       | 1,50                       | 1,55                       | 1,72                       |

4. táblázat: Alkalmazott receptúrák

| Keverék jele:               | W2,0-D2                    | W4,0-D2                    | M2,0-D2                    | M4,0-D2                    |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Cement, kg/m <sup>3</sup> : | 750                        | 750                        | 750                        | 750                        |
| Víz/cement:                 | 0,29                       | 0,29                       | 0,29                       | 0,29                       |
| FL30, kg/m <sup>3</sup> :   | 75                         | 75                         | 75                         | 75                         |
| Adalékanyag:                | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 | 50% 0,2-0,6<br>50% 0,8-1,6 |
| Szál, V%                    | Wirex 20/13<br>2V%         | Wirex 20/13<br>4V%         | Masterfibre 401<br>2V%     | Masterfibre 401<br>4V%     |
| Folyósító, m <sub>c</sub> % | 1,33                       | 1,73                       | 1,20                       | 1,42                       |

### 3.2. Próbatetek elkészítése

A keveréshez egy 15 literes beton keverőt használtam, amibe először az adalékanyag, majd ezt követően a cement és kvarcliszt, majd a víz és folyósító került. A kész keverékhez adagoltam hozzá a szálakat, amelyeket kis ideig tovább kevertem, hogy elkerüljem a szálak összecsomósodását és megfelelően eloszoljanak a keverékben. Egyes keverékek esetén a szálak adagolása után még javítottam a konzisztencián Glenium 300-as folyósítóval. A friss betonon terülés és testsűrűség mérést végeztem el, ezután került sor a bedolgozásra.

A frissbetont 70×70×250 mm, 40×40×160 mm és 100×100×100 mm élhosszúságú zsalukba dolgoztam be, amit vibroasztalon tömörítettem két rétegben. Először a zsalut félig megtöltött, majd teljesen megtöltött állapotban vibráltam meg. Vibrálást követően a beton felületét lesimítottam, majd a próbatetek egy nap elteltével kiszaluzásra kerültek. Ezt követően 7 napos korukig vízbe helyeztem a próbateteket. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem „MM” épületének laboratóriumában tároltam őket 14 napos korukig. Minden egyes keverésből 3 db 70×70×250 mm-es és 3 db 40×40×160 mm-es hasáb, valamint 3 db 100×100×100 mm-es kocka készült a vizsgálatok elvégzéséhez.

### 3.3. Vizsgálatok

A szilárd beton vizsgálatokra a próbatetek 14 és 15 napos korában került sor, a frissbeton vizsgálatokat pedig közvetlenül a keverés után végeztem el.

#### 3.3.1. Frissbeton vizsgálatok.

##### 3.3.1.1. Testsűrűség mérés

A kocka próbatetek esetén először megmértem a sablont üresen, majd betonnal megtöltve, majd pedig kiszámoltam a testsűrűséget, amelyek közel azonosak voltak a tervezett frissbeton testsűrűségekkel. Erre azért volt szükség, hogy leellenőrizsem a megfelelő bedolgozást.

$$\text{Sűrűség [kg/m}^3\text{]} = \frac{\text{Töltött forma tömege [kg]} - \text{Üres forma tömege [kg]}}{\text{Forma térfogata [m}^3\text{]}}$$

### 3.3.1.2. Terület mérés

A vizsgálat során egy Abrams kúpba két rétegben helyeztem el a friss betont, minden réteget gondosan tömörítettem 10-10 csömöszöléssel (csömöszölő rúddal), hogy elkerüljem a légzárványokat és biztosítsam az egyenletes eloszlást. Miután a kúp megtelt, a felső réteget lesimítottam a kúp peremével egy szintre. A következő lépés a kúp eltávolítása volt, majd az asztalt tizenötször ejtettem. Amint a beton szétterült, megmértem a terület legnagyobb és erre merőleges átmérőjét.

### 3.3.2. Szilárd beton vizsgálatok:

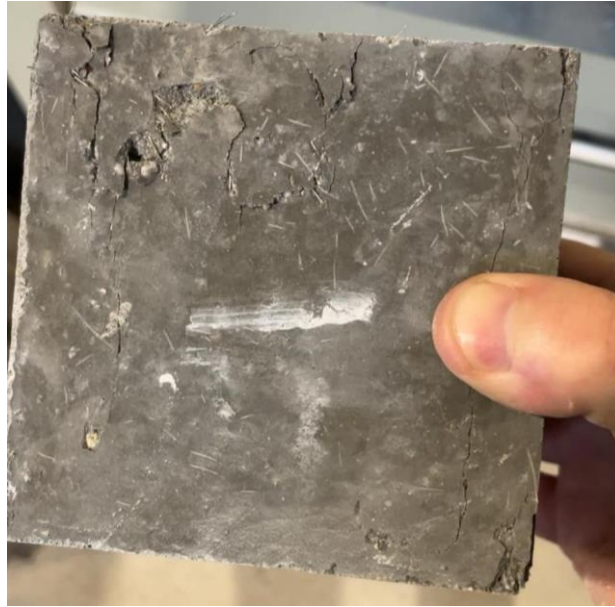
#### 3.3.2.1. Nyomószilárdság vizsgálatok:

#### Nyomószilárdság vizsgálat 100×100×100 mm-es próbatesten

A próbatest tényleges méretei lemérése után a törőgépbe helyeztem őket, majd folyamatosan, 5 kN/s sebességgel terheltem azt a tönkremenetelig.



8. ábra: Nyomószilárdsági vizsgálat 100×100×100 mm-es próbatesten



9. ábra: 100×100×100 mm-es próbatest vizsgálat után

### Hajlító-húzószilárdság és nyomószilárdság vizsgálat 40×40×160 mm-es próbatesten

Ennél a vizsgálatnál szintén lemértem a tényleges méreteit a próbatestnek, majd annyi eltérés történt, hogy a hasábot először ketté hajlítottam 0,05 kN/s-mal fokozatosan terhelve, ezután mind a két felét visszahelyeztem a törőgépbe és külön-külön megvizsgáltam mind a jobb, mind a bal oldal nyomószilárdságát, 2,5 kN/s-mal terhelve.



10. ábra: Hajlító-húzószilárdság vizsgálat 40×40×160 mm-es próbatesten

#### 3.3.2.2. Rugalmassági modulus:

A 70×70×250 mm-es próbatesteket még a CMOD vizsgálat elvégzése előtt rugalmassági modulus vizsgálatnak vettem alá. A vizsgálat során az INSTRON 5989 gépet használtam.

A vizsgálat előtt a próbatestek egyik oldalát befestettem feketére és fehér lakk filctollal egymástól 80 mm-re két pontot helyeztem el, a gép előkészítése után pedig behelyeztem a próbatesteket. Az INSTRON 5989 által ciklikusan történt a terhelés, háromszor terheltem fel, majd le, a harmadik mérésből történt a számítás.

A rugalmassági modulus során a próbatesteket a teherbírásuk harmadáig terheltem fel, így nem roncsoltam még a próbatesteket. A próbatestre ható erő (F) és a keresztmetszeti terület (A) hányadosából feszültséget számoltam, ami:

$$\sigma = \frac{F}{A}.$$

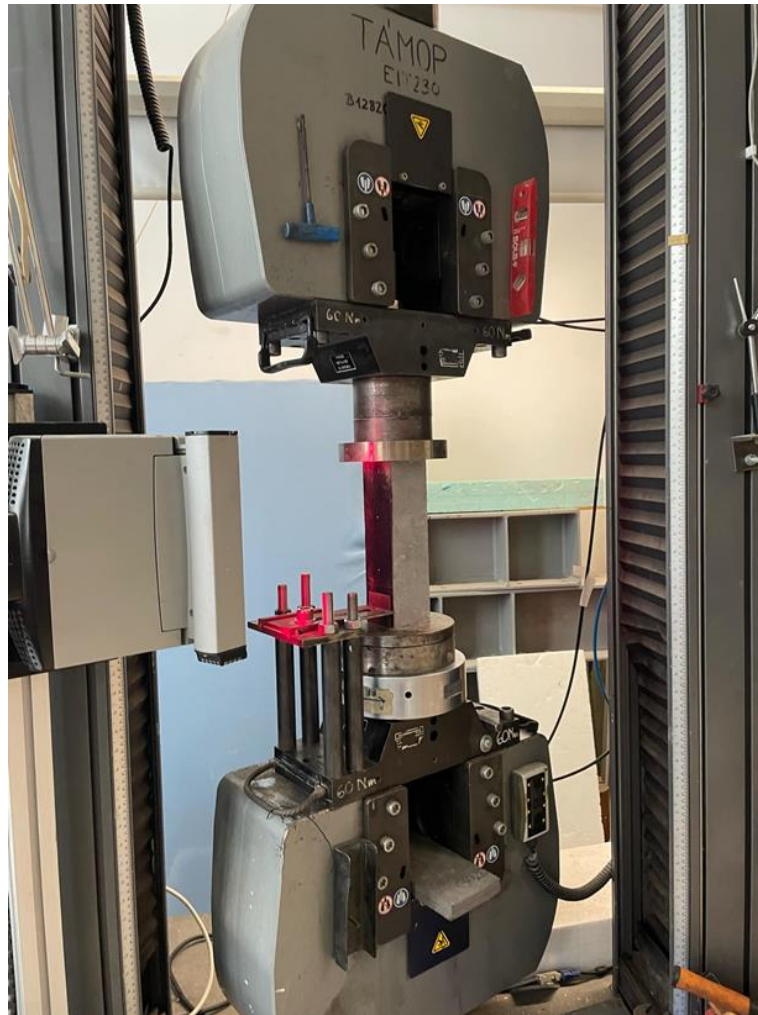
Az alakváltozást ( $\varepsilon$ ) pedig úgy kaptam meg, hogy eredeti hosszhoz ( $L_0$ ) viszonyítottuk a hosszváltozást ( $\Delta L$ ):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}.$$

A rugalmassági modulus (E) meghatározása a Hooke-törvény alapján történik, amely szerint a feszültség ( $\Delta\sigma$ ) és az alakváltozás ( $\Delta\varepsilon$ ) közötti kapcsolat lineáris a rugalmas tartományban:

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

A mérésből kapott adatokat a program grafikonon ábrázolta, ahol a feszültség-alakváltozás görbéje általában kezdetben lineáris, majd egy bizonyos ponton túl az anyagban plasztikus deformáció lép fel, és a görbe eltért a lineáristól. A rugalmassági modulust a feszültség-alakváltozás görbéjének lineáris szakaszából határoztam meg.



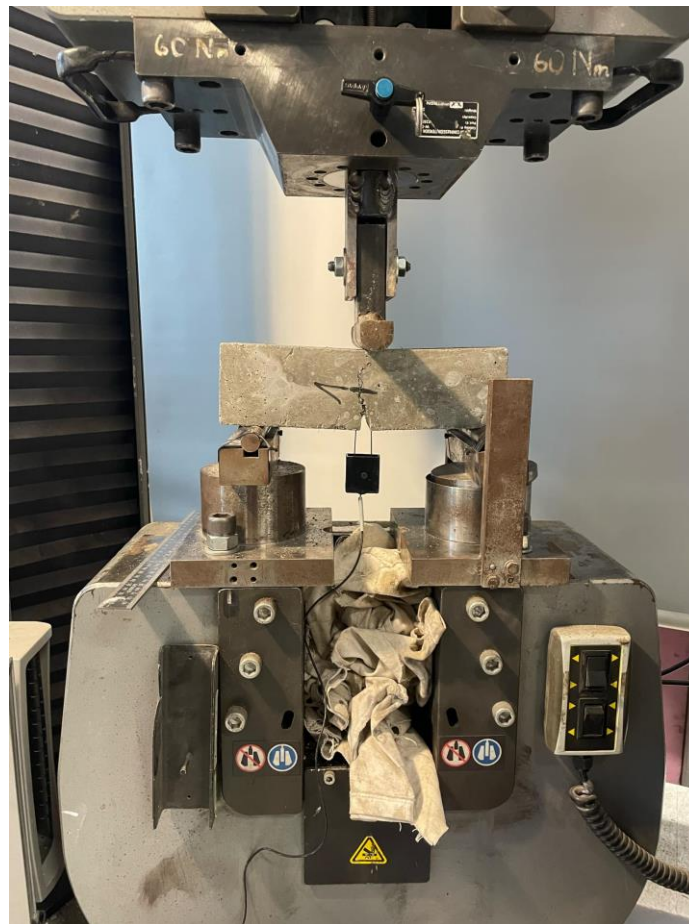
11. ábra: Rugalmassági modulus vizsgálat

### 3.3.2.3. CMOD vizsgálat

Az MSZ EN 14651:2005+A1 szabvány alapján végeztem a vizsgálatot. A próbatestet 90 fokkal elforgattam a bedolgozási felülethez képest. Az elforgatás célja a szabvány előírása szerint az, hogy kiküszöbölje a szálorientáció szilárdságra gyakorolt hatását, például az acélszálak esetleges süllyedését vagy a műanyagszálak felúszását.

A vizsgálat előtt vizesvágóval 1 cm mélyen bevágtam a próbatesteket, melyre azért volt szükség, hogy a repedés mindenképpen ebben a keresztmetszetben alakuljon ki.

A bemetszés mindkét oldalára, egymástól 10 mm távolságban két fémdarabot ragasztottam fel, amelyekhez a repedéstágasság mérőt csatlakoztattam. Végül elvégeztem a hasáb törését, 0,5 mm/perc repedéstágasság növekedési (CMOD) sebességgel terhelve.



12. ábra: CMOD vizsgálat

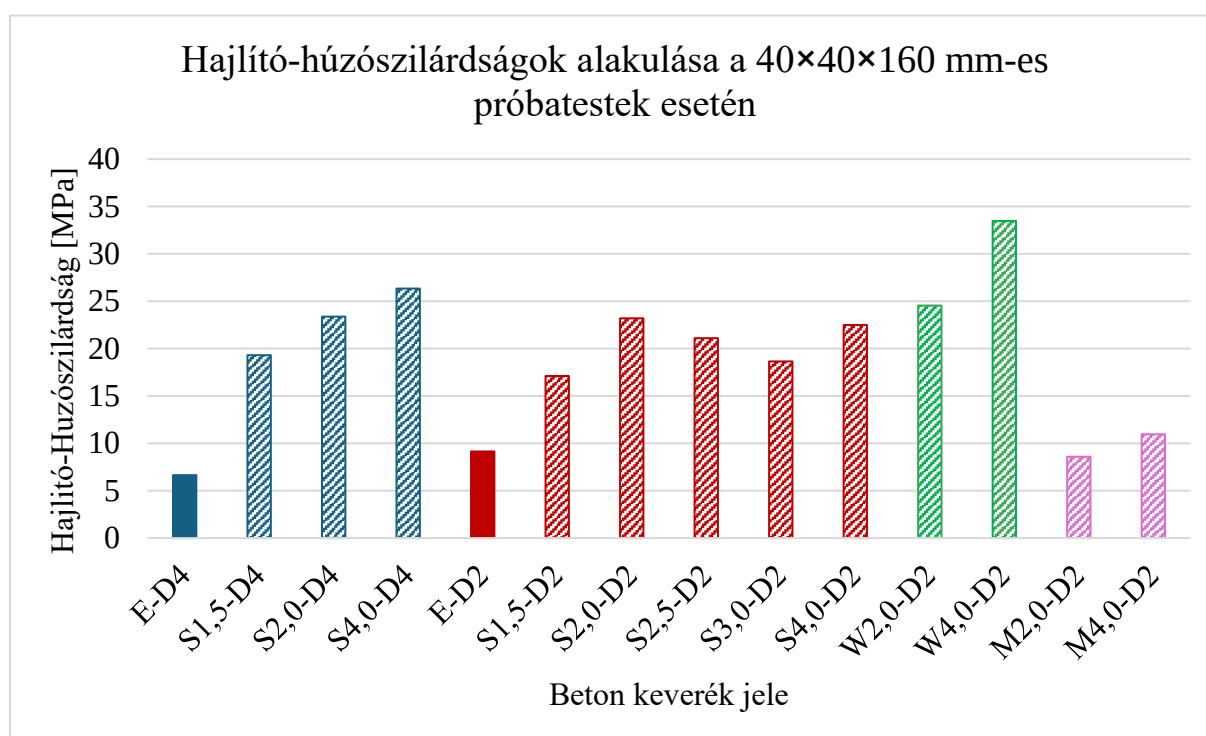
## 4. Eredmények

Az ábrázolt diagramok során a jelölések minden esetben az alábbiakat jelentik: az első tag az alkalmazott száltípust mutatja, ahol E az „Etalon”, azaz szál nélküli referenciára vonatkozik, az S a SAM 0,22×6 szál típust, a W a Wirex 20/13 szál típust, míg az M pedig a BASF Masterfibre 401 műanyag szálat jelöli. A szám a betű után az adagolt mennyiséget V%-ban, a D2 és a D4 pedig a homok típusát mutatja. D4 a normál osztályozott homok, D2 pedig a Simix homok jele.

### 4.1. Nyomó- és hajlító-húzószilárdság

A 13. ábra mutatja be a hajlító-húzó szilárdságok eloszlását. A diagramon az vehető észre, hogy a száladagolás megnövelt mennyisége nem feltétlen vezet a hajlító-húzószilárdság növekedéséhez, ami alátámasztja a szakirodalomban olvasottakat. Ez a tendencia legjobban az S-D2 értékeinél érzékelhető, ahol hiába lett növelve a száltartalom, az 1,5-2 V% között még növekedett, a 2-2,5-3 V% közötti keveréknél viszont csökkent a maximális hajlító-húzószilárdság.

A 13. ábra mindezek mellett igazolja a szakirodalom azon állítását, hogy acélszálakból készült keverék jelentősen nagyobb húzószilárdságot képes felvenni, mint a műanyag szálból készült.

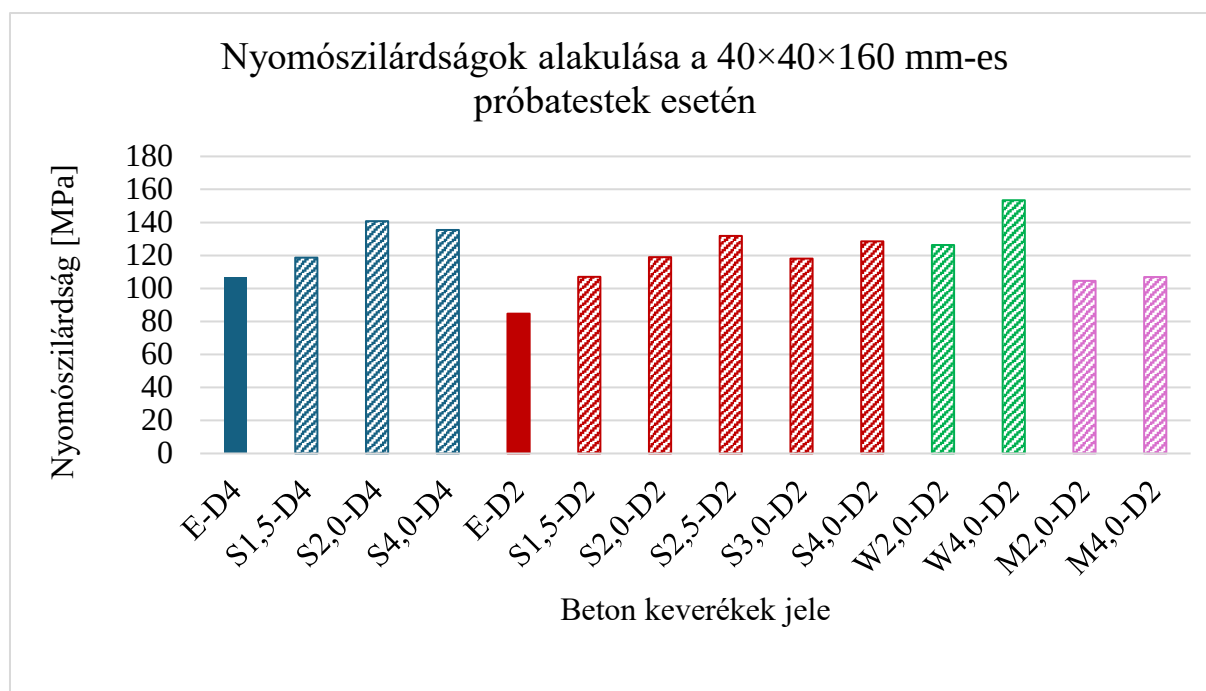


\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

13. ábra: 40×40×160 mm-es hasábok hajlító-húzószilárdsága



\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

14. ábra: 40×40×160 mm-es próbatetek nyomószilárdsága

A szálak hozzáadásával jelentősen javultak a betonok nyomószilárdsági értékei, ezeknek mértékét az 6. táblázatban, a mellékletek fejezetben tüntettem fel.

A dolgozat elején az irodalomkutatás részben ismertettem, hogy 150 MPa-nál nagyobb nyomó szilárdságú betonokat tekintenek UHFRFC-nek. A próbatestjeimet 14 napos korokban vizsgáltam az idő szükségé miatt, ezért a próba testek nem érték el a maximális szilárdságukat. A betonok 28 napig szilárdulnak és 14 napos korukba a szilárdulás nagy része végbe megy.

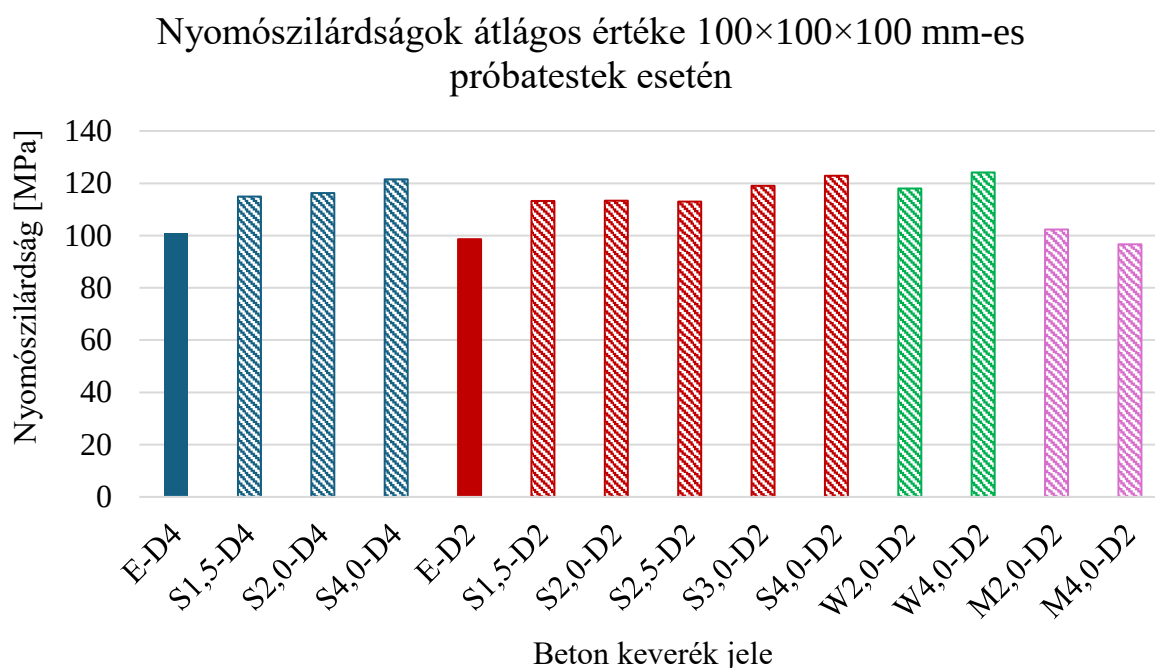
A Wirex szálakkal készült 4V%-ú keverék 100×100×100 mm-es próbatetek esetén tudtam legnagyobb mértékben növelni a nyomószilárdság értékét, a keverék átlagosan 26%-os növekedést mutatott az etalonhoz képest.

A 40×40×160 mm-es próbateteknél szintén a fent említett keveréknél növekedett legnagyobb mértékben a nyomószilárdság értéke, átlagosan 80%-al a szál nélküli referenciához képest. A hajlító-húzószilárdsága pedig 33,47 MPa volt szemben az etalonnal, aminek csak 9,14 MPa. Ez 3,66-szoros növekedés az etalonhoz képest, ami jól mutatja, hogy az acélszálak ilyen nagymértékű alkalmazása esetén javul mind a nyomószilárdság mind a hajlító-húzószilárdság.

Azonban száltartalom növelésével nem kapunk egyértelműen lineáris növekedést a szilárdsági értékeknél, ahogyan a szakirodalom áttekintésben írtam is róla.

A Simix és a normál osztályozott homok alkalmazása esetén a szilárdsági értékek között nem tapasztalható nagyobb növekedés, ezzel kimutattuk, hogy ezen keverékeknél a homok minősége nem befolyásolja nagy mértékben a keverék szilárdságát. A magyarázatot valószínűleg a nagy ( $750 \text{ kg/m}^3$ ) cement tartalom adhatja.

A két féle alkalmazott acélszál közül a W jelű Wirex 20/13 típus bizonyult jobbnak, főleg 4V% adagolás esetén. A SAM 0,22×6 típusú szál hatása a két referencia keverékre közel azonos volt. A műanyagszál nem növelte jelentős mértékben sem a referencia keverék hajlítóhúzó-, sem pedig a nyomószilárdságát.



\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

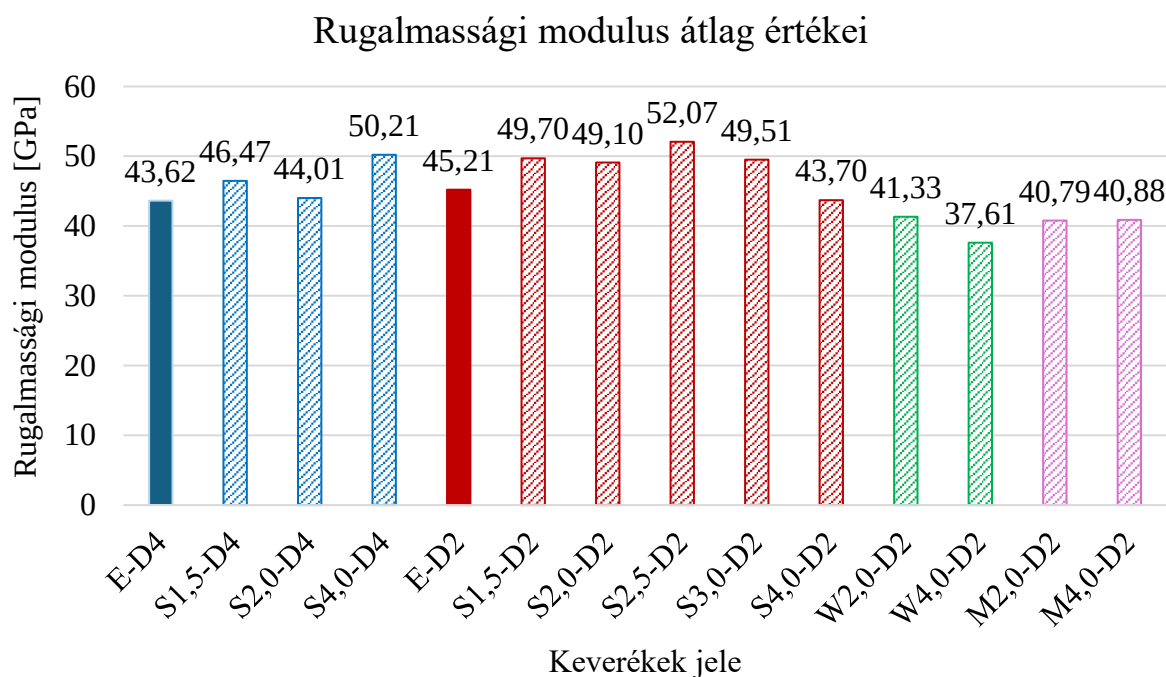
D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

15. ábra: 100×100×100 mm-es próbatetek nyomószilárdsági értékei

## 4.2. Rugalmassági modulus

A 16. ábrán a rugalmassági modulusok átlag értékeit szemléltetem, minden esetben három próbatest átlagából számítva. Az ábrán jól látszik, hogy sem a megnövelt szál tartalom, sem pedig a Simix homok nem változtatott minden esetben kedvezően a rugalmassági modulus értékén. Míg a sima osztályozott homokkal készült, szálnélküli referencia beton E (rugalmassági modulus) értéke 43,62 GPa volt, addig a 1,5 és 2 és 4 szál térfogat százaléku keverékeké 46,47, 44,01, 50,21 GPa volt, ezeknél a referenciáknál csekély mértékű javulás tapasztalható.

A Simix homok alkalmazású, szál nélküli referencia E értéke 45,21 GPa volt, a SAM 0,22×6 szállal készült referenciáké pedig a következő módon alakultak: 1,5 V%: 49,70 GPa, 2 V%: 49,10 GPa, 2,5 V%: 52,07 GPa (ennek a keveréknek volt a legnagyobb Rugalmassági modulus értéke), 3V%: 49,51 GPa, 4V%: 43,70 GPa. A 2,5 V%-nál nagyobb szál tartalmú keverékeknel csökkenni kezdett a rugalmassági modulus érték. A 4V%-ú keverék esetén pedig kisebb rugalmassági modulusot értünk el, mint a szál nélküli referencia esetén.



\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

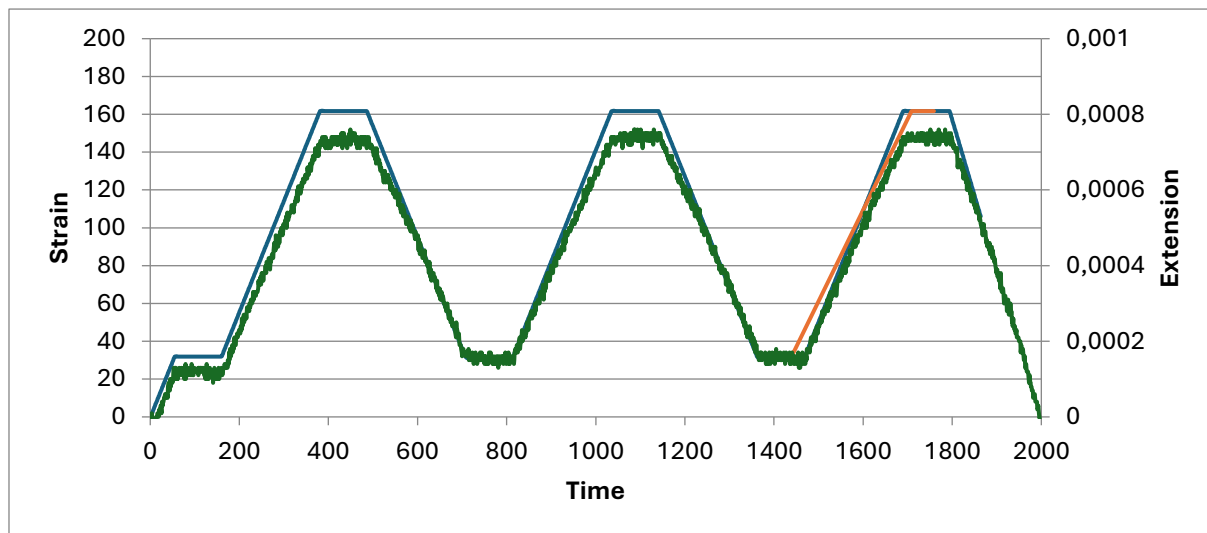
1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

16. ábra: Rugalmassági modulusok átlagos értéke

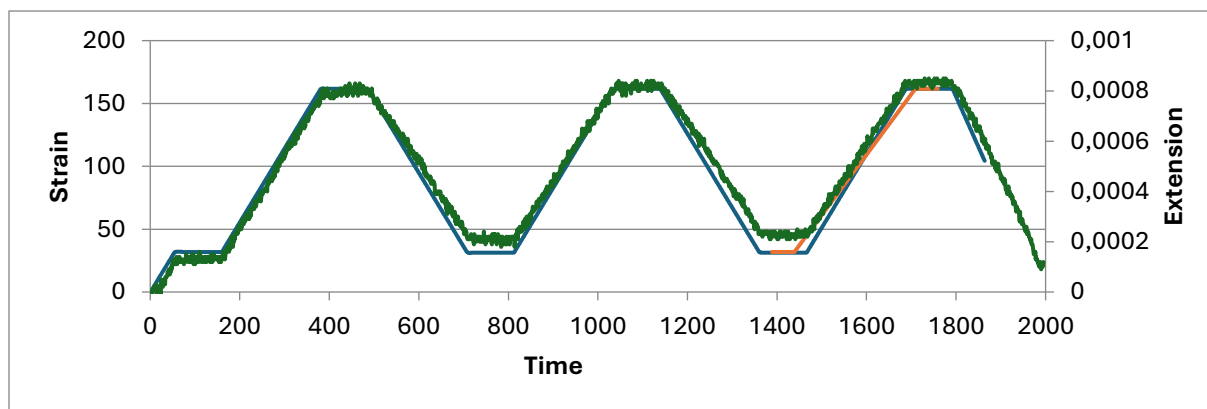
A Wirex Acél szállal készült keverékek E értékei minden esetben kisebbek voltak, mint a szál nélküli referenciáé, 2V%-nál 41,33 GPa-t, 4V%-nál pedig 37,61 GPa értéket kaptam (Ez volt a legkisebb rugalmassági modulus érték, amit a vizsgálatok során kaptam).

Masterfiber szál alkalmazása esetén szintén minden esetben kisebb E értéket kaptam, mint a szál nélküli referenciáé, 2V%-nál 40,79 GPa, 4V%-nál pedig 40,88 GPa volt a rugalmassági modulus értéke.



17. ábra: S4,0-D4 III. próbatest rugalmassági modulus diagramja

A 17. ábra a 4V%-ú Sam szállal készült keverék 3. próbatestjének rugalmassági modulus diagramjának alakulását ábrázolja. A narancssárgával ábrázolt helyen számítottam a rugalmassági modulus értékét. A strain a videoextensométer értékeit mutatja mm/mm-ben, az extension pedig az Instron vizsgáló berendezés keresztfej elmozdulását mm-ben. A rugalmassági modulus minden esetben a videoextensométer értékeiből lett számolva.



18. ábra: E-D4 I. próbatestjének rugalmassági modulusa

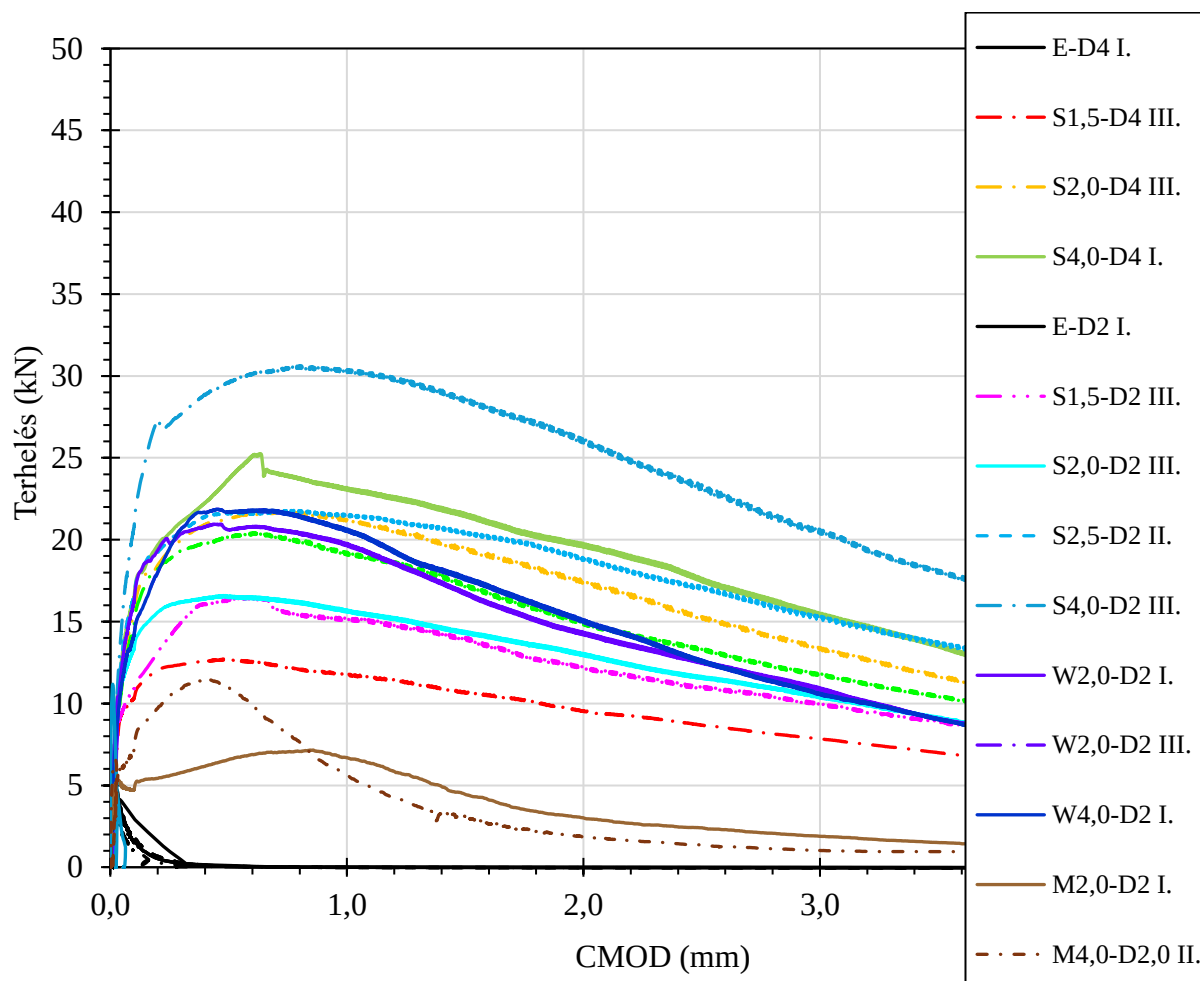
A 18. ábrán a szálnélküli referencia beton rugalmassági modulus vizsgálatának diagramját szemléltetem.

### 4.3. CMOD vizsgálat

A hajlító-húzószilárdság vizsgálatokat (CMOD vizsgálat), 70×70×250 mm-es hasábokon végeztem.

A Mellékletek 27. ábrája az összes betonkeverék során készült próbatestek hajlító-húzószilárdság vizsgálati eredményeit mutatja teher-repedéstágaság-CMOD diagramok formájában. Jól látható, amint a szál nélküli beton (fekete görbék), a műanyag, valamint a kisméretű acélszálas keverékek különböző tendenciájú görbéket rajzolnak ki.

Mind a 14 keverésből 3-3 próbatestet készítettem. A 3.4.2.3 fejezet alapján taglaltak alapján végeztem el a vizsgálatot, majd vettem minden keverék próbatest eredményének legjellegzetesebb diagramjait. Az 10. táblázatban mellékletben találhatóak a mérések eredményei.



\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

19. ábra: Összes keverék CMOD vizsgálatának eredményeinek legjellemzőbb görbéje

A 19. ábra az egyes keverékek legjellemzőbb görbáját mutatja, ilyen módon könnyebb az összehasonlítás.

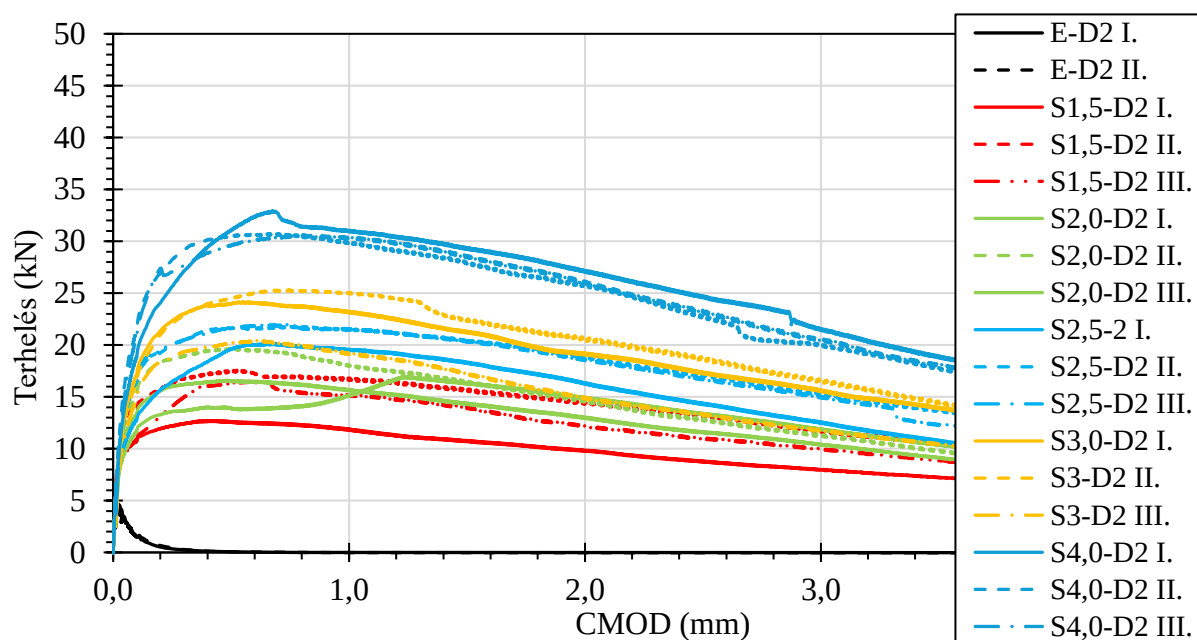
A vizsgálataim is jól tükrözik a normál beton és szálerősítésű betonok hajlító-húzószilárdsági görbéinek tulajdonságait.

A szál nélküli betonon a berepedés utáni terhelés hatására szinte azonnal végbe ment a próbatest tönkremenetele.

Mind az acélszálakat, mind pedig a műanyagszálakat tartalmazó próbatestek esetén ezzel szemben az első repedések megjelenése után fokozatosan aktiválódtak a szálak, így berepedés után is képes volt a beton további terhek felvételére a szálaknak köszönhetően. A felkeményedést (strain hardening) a diagramok jól látható módon mutatják.

A műanyagszál alkalmazása esetén a repesztő teher elérését követően alacsony maradó húzási ellenállás volt tapasztalható, jellegzetes lágyuló görbét írtak le.

Mind a SAM, mind a Wirex acél szál alkalmazása esetén a repesztő erő lényegesen nagyobb volt, mint a referencia vagy mint a műanyag szál esetén.



\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

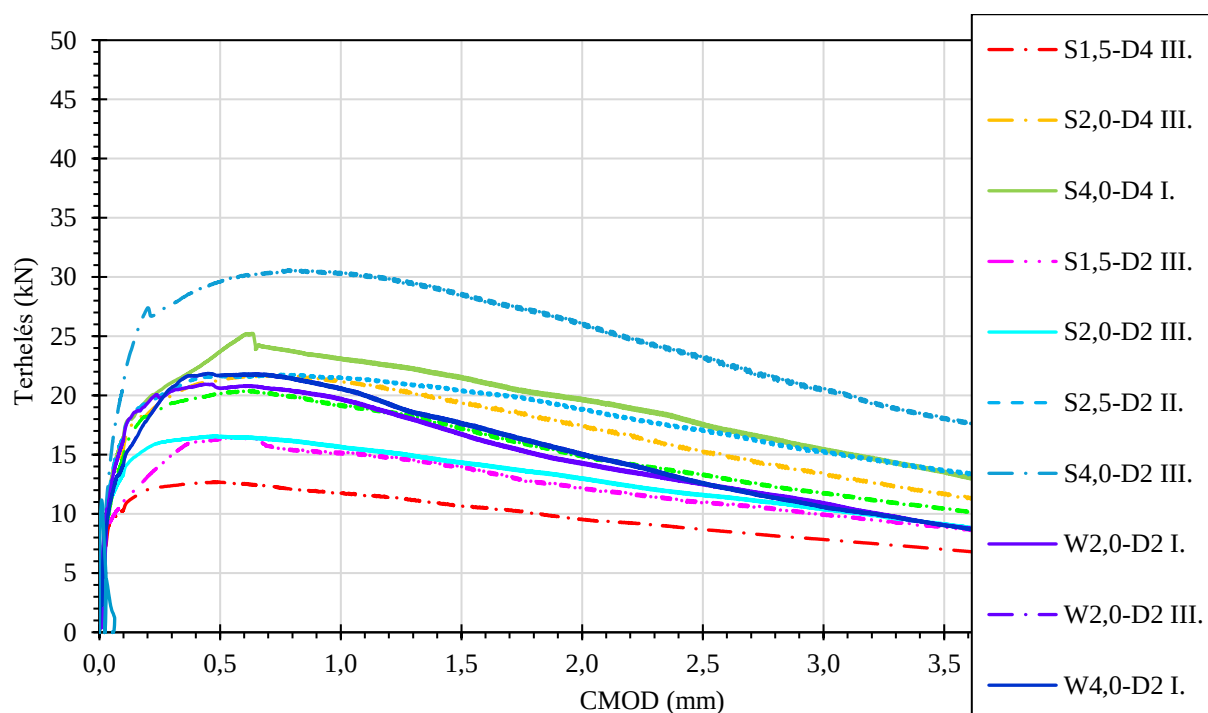
20. ábra: Etalon és SAM acélszál tartalmazó keverékek CMOD diagramja

Mind az E-D4, mind az E-D2 jelű betonok diagramjain az vehető észre, hogy a repesztő teher elérése után meredek esés történik a görbén, valamint kis repedés tágasságnál már teljes tönkremenetel megy végbe.

A SAM 0,22×6 szállal készült keverék 20-35 kN terhelést voltak képesek felvenni, míg ezzel szemben a szálnélküli keverékek maximális hajlítóereje 5 kN volt a legjobb esetben is. Az acél szálerősítésű keverékek diagramján a 0,5 mm és az 1 mm között jól látható a Strain hardening viselkedés. Ezt követően csökkenő tendenciát mutat az erő-repedéstágasság görbe.

A Wirex 20/13 szál esetén a 0,5 mm repedéstágasságnál, nagyjából a maximális erő elérése után, csökkenő tendenciát mutat a diagram.

Így kijelenthetjük, hogy a teherbírás szempontjából lényeges 0,5 mm repedéstágasságnál elentősen kedvező hatással volt az acél szálak alkalmazása.



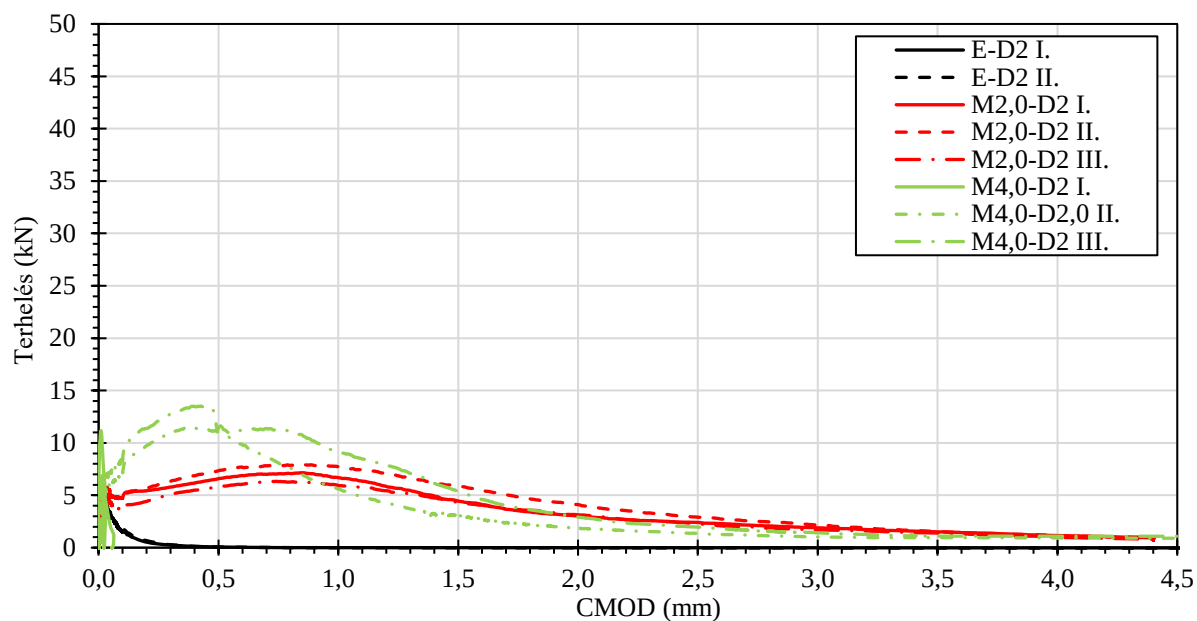
\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

21. ábra: Az acélszálakat tartalmazó keverékek CMOD diagramjai

A 22. ábrán a műanyagszállal készült betonkeverékeket ismertetem. A repesztő teher elérését követően a műanyagszállal készült betonkeverékek esetén is megfigyelhető a strain hardening viselkedés, majd egy bizonyos repedés tágasság után ebben az esetben is csökkenni kezd a teherbírás.



\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

22. ábra: Műanyag szálak keverékek CMOD diagramjai

Az acél- és műnyagszál erősítésű betonok eltérő maradó teherbírása és teher-CMOD görbéjének eltérő tendenciája a szálanyagok eltérő tulajdonságaival (eltérő húzószilárdság, rugalmassági modulus, tönkremeneteli mód) magyarázhatók. Az általam alkalmazott makró műnyagszál húzószilárdsága a gyártói adatok alapján  $800 \pm 15\%$  N/mm<sup>2</sup>, az acélszál húzószilárdsága pedig 2400-3000 N/mm<sup>2</sup>, ez a szilárdságbeli különbség a betonok esetén is megmutatkozik.



23. ábra: Szálak alakulása a próbatest tönkremenetelkor  
(Bal oldal: acél szálak keverék; jobb oldal: műanyag szálak keverék)

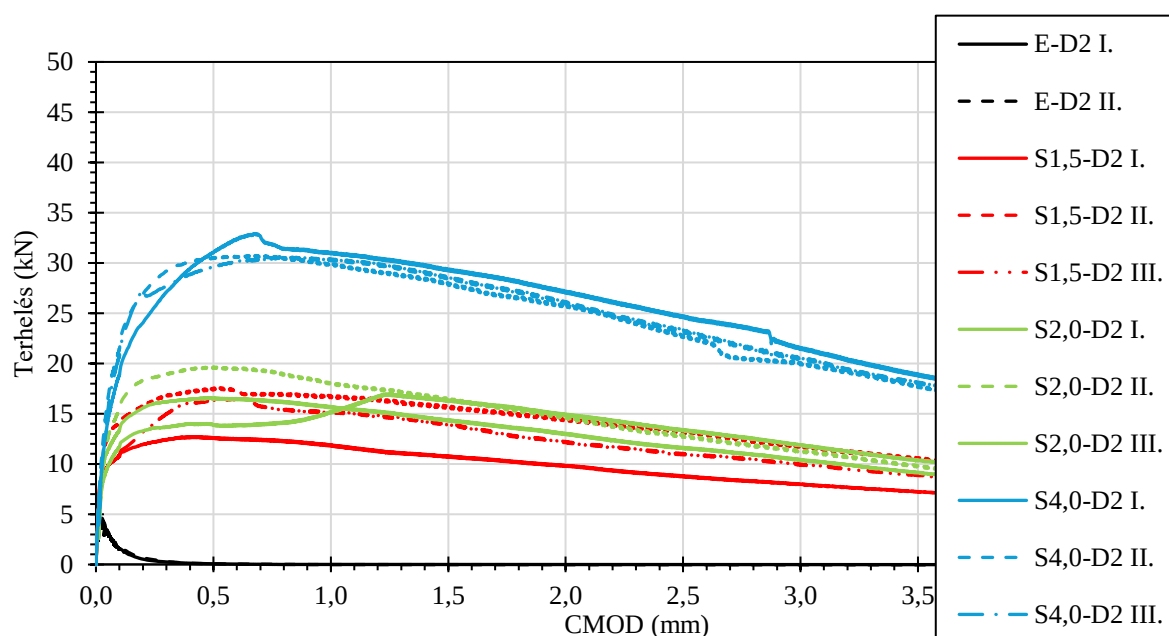
A tönkremeneteli módot tekintve az acélszálak kihúzódtak a törési keresztmetszetben, a műnyagszálak pedig elszakadtak. Acélszál alkalmazásakor a repesztő teher elérését követően a teherfelvétel csökken, majd közel konstans terheket vesz fel. A műnyagszál alkalmazásakor

a repesztő teher hatására intenzívebb tendenciával csökken, majd a minimumpont elérése után felkeményedő szakasz következik majd ezt követően ismét csökkenni kezd.

Az acél- és műanyagszálak mennyisége V% szerint megegyezett, ez azonban azt jelenti, hogy az acélszál m%-os aránya közel 8-szorosa volt a műanyagszál alkalmazott mennyiségéhez képest.

A 24-es és 25-ös ábra ugyanannak a receptnek az eltérő adalékanyagú (normál osztályozott homok - Simix osztályozott homok) CMOD vizsgálat eredményeit ábrázolja. Az ábrák között megfigyelhető, hogy ugyan azt a száltípust alkalmazva 5-10 kN-nal nagyobb terhelést képes felvenni a Simix adalékanyagú UHFRC, mint a sima osztályozott homokkal készült.

A két diagram között jól érzékelhető, hogy a szálak típusa mellett az adalékanyag is képes javítani a hajlító-húzó ellenállását a betonnak.



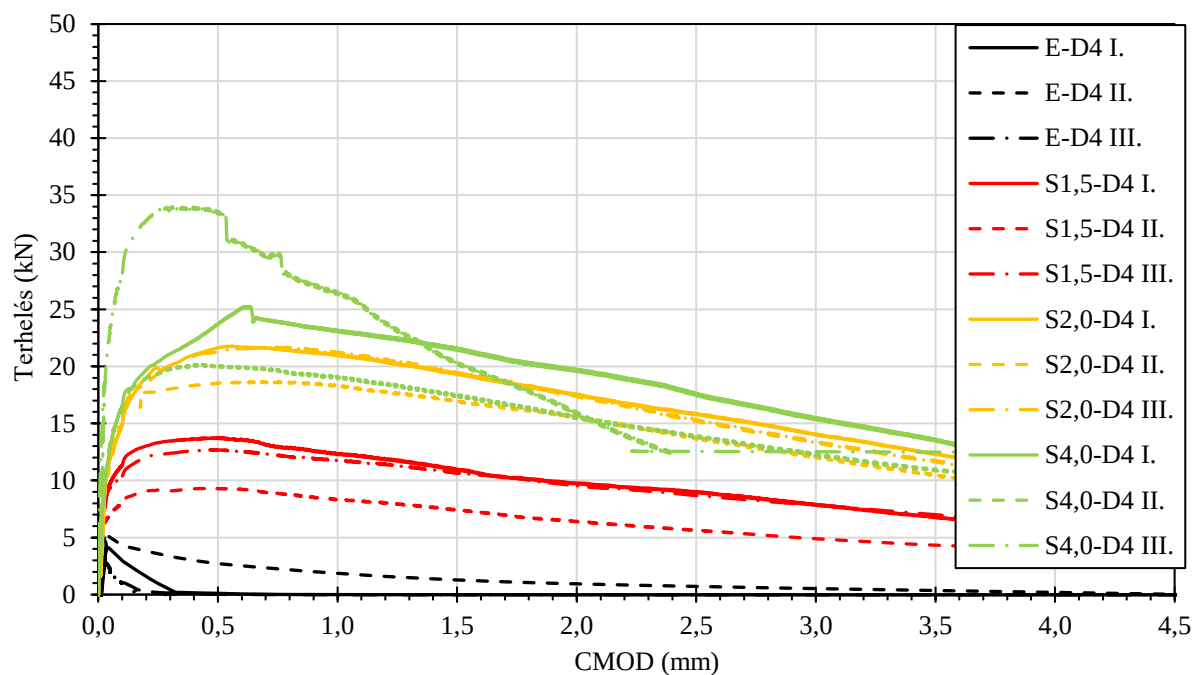
\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

24. ábra: Simix és SAM 0,22×6 szál CMOD diagramjai

A SAM 0,22×6 típusú szál fele olyan hosszú, de nagyobb húzószilárdsággal rendelkezik, mint a Masterfibre 401 típusú szál. Ezen tulajdonságok mellett ugyanakkora száladagolás alkalmazásával (kettő és négy térfogat százalék), a Masterfibre 401 szál jelentősen kisebb teher felvételére volt képes mint a SAM 0,22×6 típusból készült szálak.

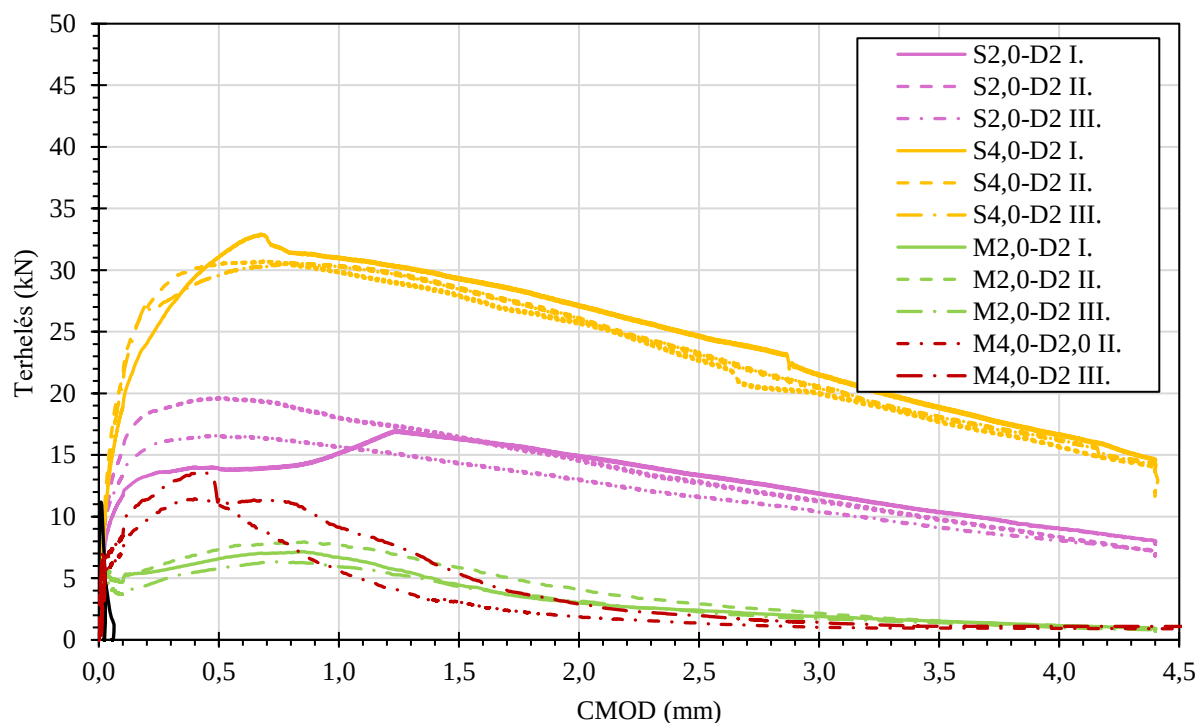


\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

25. ábra: Normál osztályozott homok és SAM 0,22×6 szál CMOD diagramjai



\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

26. ábra: BASF Masterfibre 401 műanyag SAM 0,22×6 acél szálakat tartalmazó keverékek CMOD diagramjai

## 5. Összefoglalás

Ebben a fejezetben foglalom össze a dolgozat során megállapított tapasztalatokat és a vizsgálatok kiértékelésének eredményeiből konklúziókat vonnak le.

A szálerősített betont napjainkban egyre többször használják különféle mérnöki létesítmények építésében. A szakirodalom szerint az egyes szálfajtáknak más-más kedvező hatásai vannak, például javul a tűzállóság, csökken a zsugorodás, nő a beton rugalmassága és maradó szakítószilárdsága.

Jelenleg kevés szakirodalom áll rendelkezésre a különböző típusú és hosszúságú szálak szálerősítésként (ultra nagy teljesítőképességű szálerősítésű beton - UHPFRC) való használatáról. Az egyik legfontosabb jellemző, melyet befolyásolnak a szálak a UHPFRC-ben, az a strain hardening tulajdonság (a beton berepedés után további, a repedéshez szükséges terhelésnél nagyobb képes felvenni), ellentétben a normál szálerősítésű betonokkal, amelyeknél a cél jellemzően csak a rideg tönkremenetelt elkerülése.

A szakirodalom alapján feltételezhető, hogy a szálak alkalmazása pozitív hatással lesz a repedés után megmaradó hajlítósilárdságra. Szálerősítésű beton készítésekor fontos, hogy a szálak egyenletesen oszoljanak el a betonban.

A testsűrűségüktől függően a szálak felúszhatnak (műanyag) vagy lesüllyedhetnek (acél), azaz szétosztályozódhat a beton.

Kutatási céljaim a következők voltak:

1. A szálak hatásának kísérleti kimutatása a beton hajlító-húzó- és nyomószilárdságára vonatkozóan, valamint a rugalmassági modulusra gyakorolt hatásainak vizsgálata.
2. A szakirodalomban felelhető betontervezési módszerek felkutatása és ez alapján ultra nagy teljesítőképességű szálerősítésű beton készítése.
3. UHPFRC jellemzőinek laboratóriumi vizsgálatok által vezérelt megismerése; e különleges tulajdonságokkal rendelkező beton megvalósíthatóságának kimutatása és a hazai szakma megismertetésének elősegítése.

A kísérleteim során tizennégy keveréket készítettem, melyek közül kettő szál nélküli referencia beton volt.

A kísérleteimnél állandó paraméterek voltak:

- cement típus és mennyiség,
- víz mennyiség,
- adalékanyag mennyiség,

- illetve az adalékszer típusa;

változó paraméterek voltak:

- száltípus,
- száltartalom,
- adalékszer mennyisége
- adalékanyag típusa

Az elvégzett vizsgálatokkal célom volt kimutatni, hogy UHPFRC alkalmazásakor kedvezőbb-e a beton maradó hajlító-húzószilárdsága, mint a szál nélküli referencia esetén.

Vizsgálati eredményeim alapján levonható megállapítások:

A repesztő teher értékére és a maradó ellenállásra is, kis repedéstágasságig (1,0 mm-ig) kedvező hatással volt mind a műanyag, mint pedig az acél szálak alkalmazása az általam vizsgált keverékek esetén.

Az acélszálas beton maradó teherbírása lényegesen nagyobb volt a műanyag szálerősítésű betonéhoz képest.

Az általam vizsgált próbatestek közül a 4V%-ú Wirex acélszállal készült beton próbatestnek volt a legnagyobb a repesztő ereje.

Dolgozatom alapján tehát az acélszálak alkalmazása jelentősen növeli a repesztő erőt, illetve nagyobb a maradó teherbírása a műanyagszálas betonéhoz képest.

Ahogyan a dolgozat 3.4 fejezetében megemlítettem, a próbatesteket 14 napos korukban vizsgáltam, ezáltal nem érték el a maximális szilárdságukat. A 4V%-ú Wirex szállal készült próbatestjeim elérték a szakirodalom által meghatározott 150 MPa feletti értéket (egyes szabványok ezt a határértéket adják a UHPFRC betonon alsó korlátjaként).

A Simix osztályozott homok alkalmazása esetén nem volt tapasztalható a szilárdsági értékek jelentős növekedése az osztályozott homokhoz képest.

Ahogyan a szakirodalom áttekintés fejezetben megemlítettem, a szálak nagyobb térfogat százalékban való alkalmazása nem vezet feltétlen a szilárdsági értékek javulásához, azt a vizsgálatok eredményei is alátámasztották.

A húzószilárdsági értékek acélszál esetén nagy mértékben javultak a szál nélküli referenciához képest. A műanyag szálak alkalmazása esetén, nem észlelhető a szilárdsági értékek jelentős javulása.

A rugalmassági modulus ( $E$ ) vizsgálatok alapján az a tapasztalat szűrhető le, hogy az acél szálak alkalmazása esetén ugyan növekedett az  $E$  értéke, de itt sincs következetes összefüggés a száltartalom és az  $E$  érték növekedése között.

Műanyag szálak esetén pedig minden egyes próbatestnél kisebb  $E$  értéket kaptam, mint a szál nélküli referenciánál.

Ezek a tapasztalatok szintén alátámasztják, hogy az UHPFRC jobban viseli a dinamikus terheket a hagyományos betonhoz képest. Valamint mivel jóval nagyobb szilárdsági értékeket vagyunk képesek elérni ugyanakkora méretű beton szerkezetek esetén az UHPFRC-val, mint a normál betonnal, ezért csökkenteni tudjuk a szerkezet súlyát, és részben vagy teljes mértékben helyettesíteni tudjuk a hagyományos vasalást.

## 6. Summary

In this chapter, I intend to summarize the findings and conclusions drawn from the evaluated results of the investigations presented in this thesis. Fiber-reinforced concrete is increasingly used today in the construction of various engineering structures. According to the literature, different types of fibers have specific beneficial effects, such as improved fire resistance, reduced shrinkage, and increased elasticity and residual tensile strength of the concrete.

Currently, there is limited literature on the use of various types and lengths of fibers as fiber reinforcement. One of the most important characteristics influenced by fibers in Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) is strain hardening, unlike in regular fiber-reinforced concrete, where fewer fibers are used — just enough to avoid brittle failure without inducing hardening. It can be assumed from the literature that the use of fibers has a positive impact on the post-cracking flexural strength. When producing fiber-reinforced concrete, it is crucial that the fibers are evenly distributed within the concrete.

Depending on the density of the test specimen, fibers may float (synthetic) or sink (steel). My research objectives were as follows:

1. To experimentally determine the effect of fibers on the residual flexural tensile strength, compressive strength, and tensile strength of concrete, and to investigate the effects on the modulus of elasticity.
2. To explore the concrete design methods available in the literature and, based on these, to produce ultra high performance fiber reinforced concrete.
3. To investigate the characteristics of UHPFRC through laboratory testing, demonstrate its feasibility, and promote its use within the local construction industry.

In my experiments, I prepared fourteen mixtures, two of which were reference concretes without fibers. Constant parameters in my experiments included:

- Cement type and quantity,
- Water content,
- Aggregate content,
- Admixture type.
- 

Variable parameters included:

- Fiber type,
- Fiber content,
- Admixture quantity,
- Aggregate type.

Through these tests, I aimed to determine whether the residual flexural tensile strength of concrete is more favorable when using UHPFRC compared to traditional FRC. Conclusions drawn from my test results include:

At small crack widths (up to 1.0 mm), both plastic and steel fibers had a positive effect on residual resistance. The UHPFRC containing the steel fibers I tested increased the splitting load value. The residual load-bearing capacity of steel fiber-reinforced concrete was significantly greater than that of plastic fiber-reinforced concrete. Among the test specimens I examined, those made with 4% volume of Wirex steel fibers exhibited the highest splitting strength.

Based on my findings, the use of steel fibers significantly increases the splitting strength, and for small deformations, the residual load-bearing capacity is higher compared to plastic fiber-reinforced concrete. As mentioned in Section 3.4 of this thesis, the specimens were tested at 14 days of age and therefore had not yet reached their maximum strength. My specimens containing 4% volume of Wirex fibers achieved values above the 150 MPa threshold defined in the literature.

The use of Simix sand did not result in an increase in strength values compared to classified sand. As discussed in the literature review, a higher fiber volume percentage does not necessarily lead to improved strength values, which was also supported by my test results. Tensile strength significantly improved with steel fibers compared to the fiber-free reference. In the case of plastic fibers, no improvement in strength values was observed.

The modulus of elasticity tests indicated that while the E (modulus of elasticity) value improved with steel fibers, no consistent correlation was found between fiber content and the increase in the E value. For synthetic fibers, each test specimen had a lower E value than the fiber-free reference.

## 7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet nyilvánítani mindazoknak, akik bármilyen formában támogatták a munkámat, valamint segítettek abban, hogy ez a dolgozat elkészülhessen.

Külön köszönettel tartozom

- Konzulenseimnek: Dr. Sólyom Sándornak és Szijártó Annának
- A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnök kar Építőanyagok és Magasépítés Tanszékének, hogy biztosította számomra a szükséges alapanyagokat és eszközöket, valamint a Laboratórium munkatársainak: Burai Balázsnak, Takács Krisztiánnak, Kováts Marcellnek és Timár Tamásnak

## 8. Hivatkozások

Li PP, Sluijsmans MJC, Brouwers HJH, Yu QL. Functionally graded ultra-high performance cementitious composite with enhanced impact properties. *Compos B Eng* 2020;183.

Zollo RF. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement Concr Compos* 1997;19(2):107–22.

Meng Q, Wu C, Li J, Liu Z, Wu P, Yang Y, et al. Steel/basalt rebar reinforced Ultra- High Performance Concrete components against methane-air explosion loads. *Compos B Eng* 2020;198.

ACI. ACI 239R-18: ultra-high performance concrete: an emerging Technology Report. American Concrete Institute - Farmington Hills. USA2018.

ASTM. Standard practice for fabricating and testing specimens of ultra-high performance Concrete. ASTM International; 2017. ASTM C1856.

Schmidt M, Fehling E. Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe, vol. 228. ACI Special publication; 2005. p. 51–78.

Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construct Build Mater* 2015;101:741–51.

Yu R, Spiesz P, Brouwers HJH. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement Concr Compos* 2015;55:383–94.

Yu R, Spiesz P, Brouwers HJH. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Cement Concr Res* 2014;56: 29–39.

Du J, Meng W, Khayat KH, Bao Y, Guo P, Lyu Z, et al. New development of ultra- high-performance concrete (UHPC). *Compos B Eng* 2021;224.

Meng W, Khayat KH. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC. *Cement Concr Res* 2018;105:64–71.

Meng W, Khayat KH. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. *J Mater Civ Eng* 2018;30(4).

Hannawi K, Bian H, Prince-Agbodjan W, Raghavan B. Effect of different types of f ibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Compos B Eng* 2016;86:214–20.

Ayub T, Shafiq N, Nuruddin MF. Effect of chopped basalt fibers on the mechanical properties and microstructure of high performance fiber reinforced concrete. Adv Mater Sci Eng 2014:1–14. 2014.

Balázs L. Gy., Lublóy É. (2006): „Műanyagszál adagolású betonok alkalmazási lehetőségei, különös tekintettel a tűzállóságra”, VASBETONÉPÍTÉS 2006/2, pp. 57-63

Balázs L. Gy. (2002): „Szálerősítésű betonok - Terminológia és anyagi jellemzők”, Terminológia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, Magyar nyelvű szakelőadások 2001-2002-es tanévben, Kolozsvári Műszaki Egyetem Építő- és építészmérnöki Kar, pp. 3-21

Balázs L. Gy., Polgár L. (1999): „A szálerősítésű betonok múltja, jelene és jövője”, VASBETONÉPÍTÉS, 99/1, pp. 3-10

Bergmeister, K., Fingerloos, F., Wörner, J.D. (2011), Betonkalender 2011, Kraftwerke, pp 116-134.

Kerényi R. (2014): „Makro szálak hatása a beton hőterhelését követő jellemzőire”, TDK dolgozat, BME (Konzulensek: Czoboly O., Lublóy É. Balázs L. Gy.)

Juhász K. P. (2013): „Szintetikus makro szálerősítésű betonok”, Diplomamunka, BME, p.49

N.M. Azmee, N. Shafiq Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications ,2018

Toutlemonde F., Carcasses M., Lion M. ‘Field experience of UHPFRC durability in an air cooling tower’, Designing and Building with UHPFRC – State of the Art and Development, ISTE Ltd 2011, chapter 46, pp. 697-710.

Behloul M., Arsenault J., “Ductal®: a durable material for durable structures”, 5th int. conf. on concrete under severe conditions, CONSEC’07, Tours (France), 2007, pp 951-958, Toutlemonde et al. (eds).

Rebentrost M., Wight G., "Investigation of UHPFRC slabs under blast loads", Designing and Building with UHPFRC – State of the Art and Development, ISTE Ltd 2011, chapter 24, pp. 363– 375.

Gazon G., Ricciotti R., Portelatine J., Nicolas F., Rivillon P., "The MuCEM", Designing and Building with UHPFRC – State of the Art and Development, ISTE Ltd 2011, chapter 32 – 34, pp.481 – 528

Tanaka Y. et al, "The innovation and application of UHPFRC bridges in Japan", Designing and Building with UHPFRC – State of the Art and Development, ISTE Ltd 2011, chapter 12, pp. 149 -187

Hajar Z., Winiecki P., Simon A., Thibaux T., « Realization of an Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete thin shell structure covering the toll-gate station of Millau Viaduct. » fib Symposium: Concrete Structures: the Challenge of Creativity, Avignon (2004)

Thibaux T., "Using UHPFRC for Structural Reinforcement of Buildings and Civil Works", Designing and Building with UHPFRC – State of the Art and Development, ISTE Ltd 2011, chapter 37, pp. 553 – 563

## 9. Ábrajegyzék

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. ábra: Terhelés-lehajlás diagram [CCANZ, 2009] .....                                                                             | 5  |
| 2. ábra: Sherbrooke-Footbridge ( <a href="https://structurae.net">https://structurae.net</a> ) .....                               | 7  |
| 3. ábra: Ilzbach híd javítása UHPFRC-vel .....                                                                                     | 8  |
| 4. ábra: Achères plant for water treatment [reserchgate.net] .....                                                                 | 8  |
| 5. ábra: Haneda repülőtér bővítése [reserchgate.net] .....                                                                         | 9  |
| 6. ábra: Jean Bouin stadion Francia ország ( <a href="aida-architecture.blogspot.com">aida-architecture.blogspot.com</a> ) .....   | 9  |
| 7. ábra: Bouin stadion Francia ország ( <a href="aida-architecture.blogspot.com">aida-architecture.blogspot.com</a> ) .....        | 10 |
| 8. ábra: Nyomószilárdsági vizsgálat 100×100×100 mm-es próbatesten.....                                                             | 15 |
| 9. ábra: 100×100×100 mm-es próbatest vizsgálat után.....                                                                           | 16 |
| 10. ábra: Hajlító-húzószilárdság vizsgálat 40×40×160 mm-es próbatesten.....                                                        | 16 |
| 11. ábra: Rugalmassági modulus vizsgálat .....                                                                                     | 18 |
| 12. ábra: CMOD vizsgálat.....                                                                                                      | 19 |
| 13. ábra: 40×40×160 mm-es hasábok hajlító-húzószilárdsága .....                                                                    | 20 |
| 14. ábra: 40×40×160 mm-es próbatestek nyomószilárdsága .....                                                                       | 21 |
| 15. ábra: 100×100×100 mm-es próbatestek nyomószilárdsági értékei .....                                                             | 22 |
| 16. ábra: Rugalmassági modulusok átlagos értéke.....                                                                               | 23 |
| 17. ábra: S4,0-D4 III. próbatest rugalmassági modulus diagramja .....                                                              | 24 |
| 18. ábra: E-D4 I. próbatestjének rugalmassági modulusa .....                                                                       | 24 |
| 19. ábra: Összes keverék CMOD vizsgálatának eredményeinek legjellemzőbb görbéje .....                                              | 25 |
| 20. ábra: Etalon és SAM acélszálat tartalmazó keverékek CMOD diagramja.....                                                        | 26 |
| 21. ábra: Az acélszálat tartalmazó keverékek CMOD diagramjai.....                                                                  | 27 |
| 22. ábra: Műanyag szálas keverékek CMOD diagramjai.....                                                                            | 28 |
| 23. ábra: Szálak alakulása a próbatest tönkremenetelekor (Bal oldal: acél szálas keverék; jobb oldal: műanyag szálas keverék)..... | 28 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 24. ábra: Simix és SAM 0,22×6 szál CMOD diagramjai.....                                                   | 29 |
| 25. ábra: Normál osztályozott homok és SAM 0,22×6 szál CMOD diagramjai.....                               | 30 |
| 26. ábra: BASF Masterfibre 401 műanyag SAM 0,22×6 acél szálakat tartalmazó keverékek CMOD diagramjai..... | 30 |
| 27. ábra: Az összes CMOD próbatest vizsgálati eredményének ábrázolása.....                                | 48 |

## 10. Táblázatjegyzék

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. táblázat: Alkalmazott szálak jellemzői.....                                           | 12 |
| 2. táblázat: Alkalmazott receptúrák.....                                                 | 13 |
| 3. táblázat: Alkalmazott receptúrák.....                                                 | 13 |
| 4. táblázat: Alkalmazott receptúrák.....                                                 | 14 |
| 5. táblázat: 40×40×160 mm-es próbatestek tényleges méretei és testsűrűség értékei .....  | 42 |
| 6. táblázat: 40×40×160 mm-es próbatestek hajlító-húzó- és nyomószilárdsági értékei ..... | 43 |
| 7. táblázat: 100×100×100 mm-es próbatestek nyomószilárdsági értékei .....                | 44 |
| 8. táblázat: Rugalmassági modulus vizsgálat eredményei .....                             | 45 |
| 9. táblázat CMOD vizsgálatához fel használt tényleges méretei a próbatesteknek .....     | 46 |
| 10. táblázat: CMOD vizsgálat eredményei .....                                            | 47 |

## 11. Mellékletek

5. táblázat: 40×40×160 mm-es próbatestek tényleges méretei és testsűrűség értékei

| Próbatest jele |     | szélesség [mm] | magasság [mm] | hosszúság [mm] | tömeg [g] | Testsűrűség [kg/m <sup>3</sup> ] |      |
|----------------|-----|----------------|---------------|----------------|-----------|----------------------------------|------|
| E-D4           | I   | 41,2           | 39,9          | 159,6          | 620       | 2363                             | 2340 |
|                | II  | 40,7           | 40,1          | 160,0          | 614       | 2351                             |      |
|                | III | 41,6           | 40,0          | 160,0          | 614       | 2306                             |      |
| S1,5-D4        | I   | 40,5           | 40,0          | 161,3          | 646       | 2472                             | 2475 |
|                | II  | 40,4           | 40,0          | 161,4          | 644       | 2469                             |      |
|                | III | 40,5           | 40,0          | 161,6          | 650       | 2483                             |      |
| S2,0-D4        | I   | 39,7           | 39,9          | 159,6          | 631       | 2496                             | 2496 |
|                | II  | 39,7           | 40,0          | 159,7          | 637       | 2512                             |      |
|                | III | 39,4           | 40,0          | 159,7          | 624       | 2479                             |      |
| S4,0-D4        | I   | 39,8           | 39,8          | 159,8          | 652       | 2576                             | 2570 |
|                | II  | 40,1           | 40,8          | 160,0          | 670       | 2559                             |      |
|                | III | 40,3           | 40,8          | 160,2          | 678       | 2574                             |      |
| E-D2           | I   | 40,0           | 39,6          | 160,5          | 585       | 2301                             | 2309 |
|                | II  | 40,1           | 40,7          | 160,0          | 607       | 2325                             |      |
|                | III | 40,1           | 39,7          | 160,7          | 589       | 2302                             |      |
| S1,5-D2        | I   | 40,0           | 40,6          | 160,2          | 626       | 2406                             | 2401 |
|                | II  | 40,2           | 40,2          | 160,3          | 618       | 2386                             |      |
|                | III | 40,0           | 40,0          | 160,2          | 618       | 2411                             |      |
| S2,0-D2        | I   | 40,0           | 40,8          | 160,1          | 637       | 2438                             | 2419 |
|                | II  | 40,0           | 40,8          | 159,6          | 616       | 2365                             |      |
|                | III | 40,0           | 40,3          | 159,8          | 632       | 2453                             |      |
| S2,5-D2        | I   | 40,0           | 40,8          | 160,1          | 639       | 2446                             | 2448 |
|                | II  | 40,1           | 40,5          | 160,4          | 644       | 2472                             |      |
|                | III | 40,1           | 39,7          | 160,3          | 619       | 2426                             |      |
| S3,0-D2        | I   | 40,2           | 39,8          | 159,5          | 634       | 2484                             | 2474 |
|                | II  | 40,3           | 39,7          | 160,0          | 628       | 2453                             |      |
|                | III | 40,1           | 40,3          | 159,6          | 641       | 2485                             |      |
| S4,0-D4        | I   | 40,1           | 40,0          | 160,3          | 691       | 2687                             | 2604 |
|                | II  | 40,2           | 40,2          | 160,8          | 669       | 2574                             |      |
|                | III | 40,3           | 39,4          | 160,8          | 651       | 2550                             |      |
| W2,0-D2        | I   | 40,0           | 40,2          | 159,7          | 620       | 2414                             | 2433 |
|                | II  | 40,0           | 40,5          | 160,0          | 645       | 2488                             |      |
|                | III | 40,0           | 41,8          | 160,3          | 642       | 2395                             |      |
| W4,0-D2        | I   | 40,0           | 40,7          | 159,5          | 665       | 2561                             | 2570 |
|                | II  | 40,0           | 40,5          | 160,0          | 671       | 2589                             |      |
|                | III | 40,0           | 40,0          | 160,2          | 656       | 2559                             |      |
| M2,0-D2        | I   | 40,5           | 41,2          | 161,3          | 614       | 2281                             | 2270 |
|                | II  | 40,1           | 41,7          | 161,6          | 608       | 2250                             |      |
|                | III | 40,4           | 41,0          | 161,7          | 610       | 2277                             |      |
| M4,0-D2        | I   | 40,4           | 40,7          | 162,0          | 590       | 2215                             | 2254 |
|                | II  | 40,3           | 41,5          | 163,2          | 621       | 2275                             |      |
|                | III | 40,1           | 40,4          | 162,1          | 597       | 2273                             |      |

6. táblázat: 40×40×160 mm-es próbatestek hajlító-húzó- és nyomószilárdsági értékei

| Próbatest jele |     | Nyomószilárdság |     |                                |        |                       |        | Hajlító-húzószilárdság |                        |       |
|----------------|-----|-----------------|-----|--------------------------------|--------|-----------------------|--------|------------------------|------------------------|-------|
|                |     | Törőerők        |     | Egyedi nyomószilárdság értékek |        | Átlag nyomószilárdság |        | Hajlító erő            | Hajlító-húzószilárdság | Átlag |
|                |     | (kN)            |     | (MPa)                          |        | (MPa)                 |        | (kN)                   | (MPa)                  | (MPa) |
| E-D4           | I   | 172             | 169 | 104,56                         | 102,55 | 103,56                | 107,03 | 3,481                  | 7,71                   | 6,64  |
|                | II  | 181             | -   | 111,34                         | -      | 111,34                |        | 2,734                  | 6,17                   |       |
|                | III | 186             | 170 | 111,97                         | 100,41 | 106,19                |        | 2,782                  | 6,03                   |       |
| S1,5-D4        | I   | -               | 183 | -                              | 108,62 | 108,62                | 118,65 | 8,684                  | 19,85                  | 19,30 |
|                | II  | 198             | 200 | 122,52                         | 122,23 | 122,38                |        | 8,106                  | 18,62                  |       |
|                | III | 193             | 214 | 119,14                         | 130,79 | 124,96                |        | 8,501                  | 19,44                  |       |
| S2,0-D4        | I   | 211             | 220 | 132,87                         | 136,83 | 134,85                | 140,76 | 10,347                 | 24,68                  | 23,37 |
|                | II  | 228             | 227 | 143,58                         | 144,03 | 143,80                |        | 9,287                  | 22,10                  |       |
|                | III | 218             | 233 | 138,32                         | 148,96 | 143,64                |        | 9,665                  | 23,35                  |       |
| S4,0-D4        | I   | 212             | 228 | 133,17                         | 145,40 | 139,28                | 135,42 | 10,766                 | 25,62                  | 26,34 |
|                | II  | 219             | 220 | 136,53                         | 137,85 | 137,19                |        | 13,720                 | 31,37                  |       |
|                | III | 191             | 228 | 118,49                         | 141,09 | 129,79                |        | 9,730                  | 22,03                  |       |
| E-D2           | I   | 144             | 153 | 90,00                          | 94,91  | 92,46                 | 84,71  | 4,307                  | 10,20                  | 9,14  |
|                | II  | 147             | 141 | 91,65                          | 87,91  | 89,78                 |        | 3,486                  | 7,99                   |       |
|                | III | 102             | 129 | 63,59                          | 80,22  | 71,91                 |        | 3,930                  | 9,23                   |       |
| S1,5-D2        | I   | 200             | 202 | 125,00                         | 125,94 | 125,47                | 107,02 | 7,638                  | 17,64                  | 17,10 |
|                | II  | 186             | 210 | 115,67                         | 130,60 | 123,13                |        | 7,056                  | 16,29                  |       |
|                | III | 210             | 22  | 131,25                         | 13,68  | 72,47                 |        | 7,418                  | 17,39                  |       |
| S2,0-D2        | I   | 200             | 210 | 125,00                         | 131,25 | 128,13                | 118,96 | 9,250                  | 21,25                  | 23,19 |
|                | II  | 109             | 202 | 68,13                          | 126,25 | 97,19                 |        | 10,556                 | 24,26                  |       |
|                | III | 211             | 210 | 131,88                         | 131,25 | 131,56                |        | 10,348                 | 24,07                  |       |
| S2,5-D2        | I   | 222             | 220 | 138,75                         | 137,50 | 138,13                | 131,82 | 7,865                  | 18,07                  | 21,10 |
|                | II  | 197             | 222 | 122,82                         | 138,40 | 130,61                |        | 9,294                  | 21,41                  |       |
|                | III | 213             | 194 | 132,79                         | 120,65 | 126,72                |        | 10,134                 | 23,81                  |       |
| S3,0-D2        | I   | 190             | 175 | 118,16                         | 108,56 | 113,36                | 118,07 | 9,040                  | 21,08                  | 18,64 |
|                | II  | 214             | 179 | 132,75                         | 110,49 | 121,62                |        | 7,142                  | 16,62                  |       |
|                | III | 181             | 203 | 112,84                         | 125,62 | 119,23                |        | 7,877                  | 18,23                  |       |
| S4,0-D2        | I   | 215             | 170 | 134,04                         | 105,72 | 119,88                | 128,52 | 9,208                  | 21,47                  | 22,48 |
|                | II  | 211             | 222 | 131,22                         | 137,72 | 134,47                |        | 10,433                 | 24,09                  |       |
|                | III | 234             | 190 | 145,16                         | 117,28 | 131,22                |        | 9,339                  | 21,89                  |       |
| W2,0-D2        | I   | 190             | 190 | 118,75                         | 117,87 | 118,31                | 126,31 | 10,697                 | 24,95                  | 24,54 |
|                | II  | 207             | 201 | 129,38                         | 125,63 | 127,50                |        | 10,561                 | 24,45                  |       |
|                | III | 220             | 206 | 137,50                         | 128,75 | 133,13                |        | 10,806                 | 24,24                  |       |
| W4,0-D2        | I   | 246             | 249 | 153,75                         | 155,63 | 154,69                | 153,44 | 14,905                 | 34,33                  | 33,47 |
|                | II  | 240             | 244 | 150,00                         | 152,50 | 151,25                |        | 14,904                 | 34,50                  |       |
|                | III | 249             | 245 | 155,63                         | 153,13 | 154,38                |        | 13,479                 | 31,59                  |       |
| M2,0-D2        | I   | 178             | 174 | 109,88                         | 107,41 | 108,64                | 104,58 | 3,497                  | 7,76                   | 8,59  |
|                | II  | 162             | 176 | 101,00                         | 108,37 | 104,68                |        | 4,036                  | 9,03                   |       |
|                | III | 154             | 171 | 95,30                          | 105,55 | 100,42                |        | 4,002                  | 8,97                   |       |
| M4,0-D2        | I   | 170             | 170 | 105,20                         | 104,16 | 104,68                | 106,91 | 4,187                  | 9,45                   | 10,96 |
|                | II  | 176             | 184 | 109,18                         | 113,01 | 111,10                |        | 6,017                  | 13,39                  |       |
|                | III | 160             | 178 | 99,75                          | 110,15 | 104,95                |        | 4,342                  | 10,03                  |       |

7. táblázat: 100×100×100 mm-es próbatestek nyomószilárdsági értékei

| Próbatest jele |         |     | Próbatest méretei |       |       | Tömeg | Sűrűség | Átlag<br>sűrűség | Törőerő | Egyedi<br>nyomó-<br>szilárdság<br>értékek | Átlag |
|----------------|---------|-----|-------------------|-------|-------|-------|---------|------------------|---------|-------------------------------------------|-------|
|                |         |     |                   |       |       |       |         |                  |         |                                           |       |
|                | E-D4    | I   | 99,8              | 100,7 | 99,9  | 1017  | 101,20  | 100,73           | 2338    | 2329                                      | 2321  |
|                |         | II  | 100,0             | 100,2 | 100,0 | 1034  | 103,19  |                  | 2322    | 2317                                      |       |
|                |         | III | 100,1             | 99,5  | 100,2 | 974   | 97,79   |                  | 2311    | 2316                                      |       |
|                | S1,5-D4 | I   | 99,7              | 99,4  | 99,8  | 1155  | 116,55  | 114,93           | 2423    | 2450                                      | 2424  |
|                |         | II  | 99,8              | 100,2 | 100,2 | 1144  | 114,40  |                  | 2422    | 2417                                      |       |
|                |         | III | 99,9              | 100,6 | 99,9  | 1144  | 113,83  |                  | 2414    | 2404                                      |       |
|                | S2,0-D4 | I   | 99,9              | 100,5 | 99,5  | 1177  | 117,23  | 116,26           | 2452    | 2455                                      | 2449  |
|                |         | II  | 99,7              | 99,9  | 100,0 | 1127  | 113,15  |                  | 2446    | 2456                                      |       |
|                |         | III | 99,6              | 100,4 | 99,8  | 1184  | 118,40  |                  | 2431    | 2436                                      |       |
|                | S4,0-D4 | I   | 100,0             | 100,9 | 99,6  | 1227  | 121,61  | 121,51           | 2551    | 2538                                      | 2548  |
|                |         | II  | 100,0             | 100,9 | 99,8  | 1255  | 124,38  |                  | 2556    | 2538                                      |       |
|                |         | III | 99,6              | 100,7 | 99,7  | 1189  | 118,55  |                  | 2568    | 2568                                      |       |
|                | E-D2    | I   | 99,8              | 100,4 | 100,0 | 1124  | 112,18  | 98,61            | 2287    | 2282                                      | 2303  |
|                |         | II  | 99,9              | 99,7  | 100,2 | 1091  | 109,54  |                  | 2287    | 2292                                      |       |
|                |         | III | 100,0             | 97,7  | 99,9  | 724   | 74,10   |                  | 2278    | 2334                                      |       |
|                | S1,5-D2 | I   | 100,1             | 100,8 | 99,7  | 1186  | 117,54  | 113,23           | 2402    | 2388                                      | 2382  |
|                |         | II  | 100,0             | 100,8 | 99,7  | 1148  | 113,89  |                  | 2390    | 2378                                      |       |
|                |         | III | 100,0             | 100,5 | 100,0 | 1088  | 108,26  |                  | 2391    | 2379                                      |       |
|                | S2,0-D2 | I   | 99,6              | 100,4 | 99,7  | 1069  | 106,90  | 113,34           | 2414    | 2421                                      | 2424  |
|                |         | II  | 99,6              | 99,7  | 99,8  | 1178  | 118,63  |                  | 2425    | 2447                                      |       |
|                |         | III | 99,9              | 100,2 | 99,8  | 1146  | 114,49  |                  | 2401    | 2403                                      |       |
|                | S2,5-D2 | I   | 99,7              | 100,3 | 99,6  | 1133  | 113,30  | 112,99           | 2414    | 2424                                      | 2434  |
|                |         | II  | 99,8              | 99,8  | 100,1 | 1131  | 113,55  |                  | 2433    | 2440                                      |       |
|                |         | III | 99,7              | 100,1 | 99,6  | 1119  | 112,12  |                  | 2423    | 2438                                      |       |
|                | S3,0-D2 | I   | 99,7              | 100,6 | 99,8  | 1186  | 118,25  | 119,02           | 2471    | 2469                                      | 2471  |
|                |         | II  | 99,6              | 100,6 | 100,0 | 1225  | 122,26  |                  | 2489    | 2484                                      |       |
|                |         | III | 99,7              | 100,5 | 100,0 | 1168  | 116,57  |                  | 2464    | 2459                                      |       |
|                | S4,0-D2 | I   | 100,0             | 100,3 | 100,0 | 1262  | 125,82  | 122,88           | 2522    | 2514                                      | 2538  |
|                |         | II  | 100,0             | 99,9  | 100,0 | 1233  | 123,42  |                  | 2561    | 2564                                      |       |
|                |         | III | 100,0             | 100,1 | 100,1 | 1195  | 119,38  |                  | 2540    | 2535                                      |       |
|                | W2,0-D2 | I   | 99,6              | 100,1 | 99,6  | 1183  | 118,66  | 118,00           | 2435    | 2452                                      | 2439  |
|                |         | II  | 100,0             | 99,8  | 99,9  | 1163  | 116,53  |                  | 2423    | 2430                                      |       |
|                |         | III | 100,0             | 99,9  | 99,5  | 1187  | 118,82  |                  | 2421    | 2436                                      |       |
|                | W4,0-D2 | I   | 99,8              | 99,4  | 99,8  | 1267  | 127,72  | 124,14           | 2543    | 2569                                      | 2550  |
|                |         | II  | 100,1             | 99,7  | 99,8  | 1188  | 119,04  |                  | 2527    | 2537                                      |       |
|                |         | III | 99,7              | 100,1 | 100,0 | 1254  | 125,65  |                  | 2540    | 2545                                      |       |
|                | M2,0-D2 | I   | 99,8              | 99,2  | 100,1 | 1006  | 101,61  | 102,32           | 2553    | 2576                                      | 2379  |
|                |         | II  | 99,8              | 99,3  | 100,0 | 1043  | 105,25  |                  | 2274    | 2295                                      |       |
|                |         | III | 99,7              | 102,5 | 99,8  | 1023  | 100,11  |                  | 2310    | 2265                                      |       |
|                | M4,0-D2 | I   | 99,9              | 100,6 | 99,7  | 962   | 95,72   | 96,65            | 2270    | 2266                                      | 2274  |
|                |         | II  | 99,4              | 101,0 | 99,7  | 937   | 93,33   |                  | 2273    | 2271                                      |       |
|                |         | III | 99,9              | 100,5 | 99,9  | 1013  | 100,90  |                  | 2293    | 2286                                      |       |

8. táblázat: Rugalmassági modulus vizsgálat eredményei

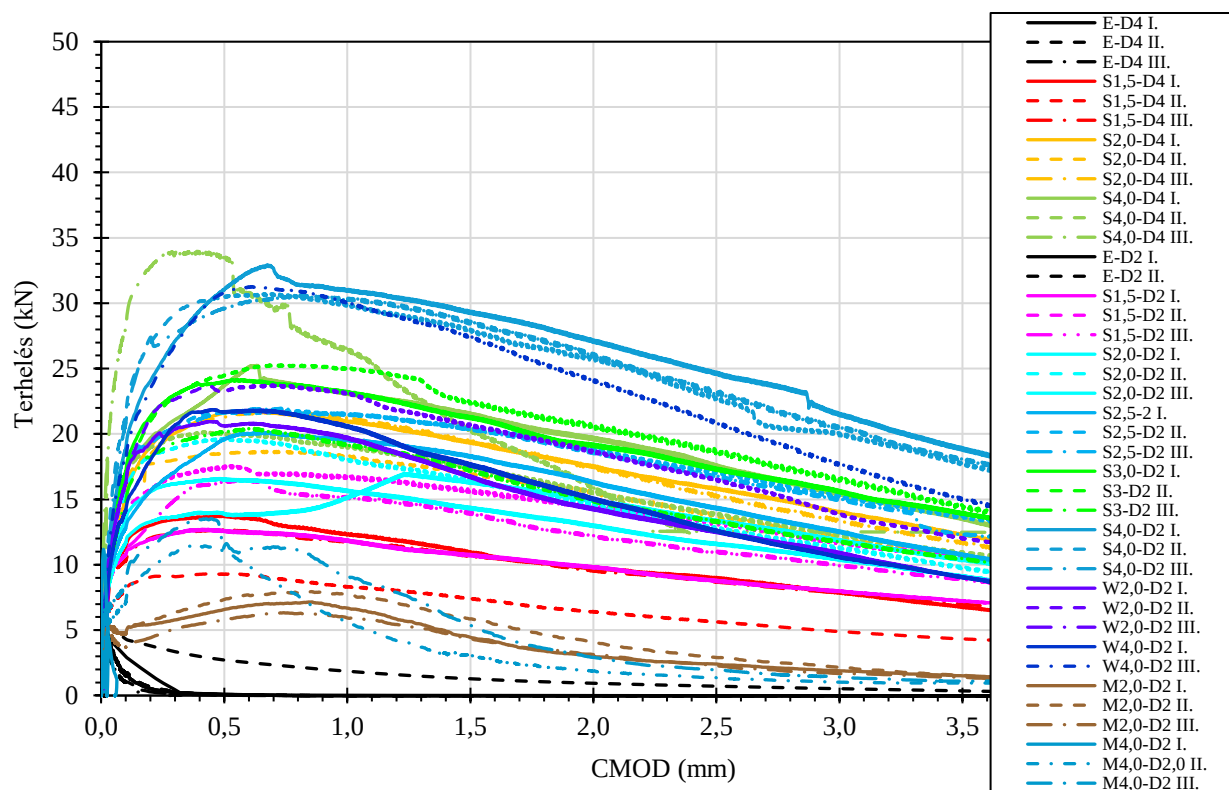
| Keverék jele | Próbatest jele | Rugalmassági modulus [GPa] | Átlag |
|--------------|----------------|----------------------------|-------|
| E-D4         | I.             | 43,62                      | 42,46 |
|              | II.            | 41,68                      |       |
|              | III.           | 42,07                      |       |
| S1,5-D4      | I.             | 46,47                      | 44,98 |
|              | II.            | 45,72                      |       |
|              | III.           | 42,73                      |       |
| S2,0-D4      | I.             | 44,01                      | 47,26 |
|              | II.            | 49,97                      |       |
|              | III.           | 47,80                      |       |
| S4,0-D4      | I.             | 50,21                      | 47,91 |
|              | II.            | 44,11                      |       |
|              | III.           | 45,84                      |       |
| E-D2         | I.             | 45,21                      | 46,71 |
|              | II.            | 47,90                      |       |
|              | III.           | 47,03                      |       |
| S1,5-D2      | I.             | 49,70                      | 46,20 |
|              | II.            | 41,80                      |       |
|              | III.           | 47,10                      |       |
| S2,0-D2      | I.             | 49,10                      | 46,64 |
|              | II.            | 50,72                      |       |
|              | III.           | 40,10                      |       |
| S2,5-D2      | I.             | 52,07                      | 46,79 |
|              | II.            | 47,45                      |       |
|              | III.           | 40,85                      |       |
| S3,0-D2      | I.             | 49,51                      | 49,63 |
|              | II.            | 47,78                      |       |
|              | III.           | 51,60                      |       |
| S4,0-D2      | I.             | 43,70                      | 48,13 |
|              | II.            | 47,40                      |       |
|              | III.           | 53,30                      |       |
| W2,0-D2      | I.             | 41,33                      | 41,46 |
|              | II.            | 45,44                      |       |
|              | III.           | 37,61                      |       |
| W4,0-D2      | I.             | 37,61                      | 41,00 |
|              | II.            | 37,03                      |       |
|              | III.           | 48,37                      |       |
| M2,0-D2      | I.             | 40,79                      | 38,46 |
|              | II.            | 38,22                      |       |
|              | III.           | 36,36                      |       |
| M4,0-D2      | I.             | 40,88                      | 40,07 |
|              | II.            | 38,87                      |       |
|              | III.           | 40,45                      |       |

9. táblázat CMOD vizsgálathoz fel használt tényleges méretei a próbatesteknek

| Próbatest jele |     | Szélesség [mm] | Magasság [mm] | Hosszúság [mm] | Bevágás felletti magasság [mm] | Fesztáv |
|----------------|-----|----------------|---------------|----------------|--------------------------------|---------|
| E-D4           | I   | 70,8           | 69,7          | 249,4          | 57,6                           | 200,0   |
|                | II  | 69,5           | 69,6          | 250,8          | 57,8                           | 200,0   |
|                | III | 70,2           | 69,7          | 249,4          | 58,4                           | 200,0   |
| S1,5-D4        | I   | 69,1           | 70,1          | 249,3          | 58,9                           | 200,0   |
|                | II  | 68,9           | 69,1          | 249,4          | 58,3                           | 200,0   |
|                | III | 69,5           | 69,7          | 249,6          | 58,6                           | 200,0   |
| S2,0-D4        | I   | 69,7           | 69,1          | 249,4          | 59                             | 200,0   |
|                | II  | 68,9           | 69,9          | 249,5          | 58,3                           | 200,0   |
|                | III | 68,6           | 69,5          | 249,8          | 58,8                           | 200,0   |
| E-D2           | I   | 70,0           | 69,8          | 249,5          | 58,0                           | 200,0   |
|                | II  | 69,7           | 71,5          | 250,0          | 57,4                           | 200,0   |
|                | III | 69,8           | 70,6          | 250,0          | 56,4                           | 200,0   |
| S1,5-D2        | I   | 70,1           | 70,2          | 249,6          | 57,5                           | 200,0   |
|                | II  | 69,7           | 70,5          | 250,0          | 57,5                           | 200,0   |
|                | III | 69,7           | 70,7          | 249,4          | 57,2                           | 200,0   |
| S2,0-D2        | I   | 70,3           | 68,7          | 250,8          | 57,2                           | 200,0   |
|                | II  | 69,9           | 69,8          | 250,8          | 56,8                           | 200,0   |
|                | III | 69,6           | 69,6          | 250,9          | 56,4                           | 200,0   |
| S2,5-D2        | I   | 69,7           | 70,9          | 250,0          | 57,4                           | 200,0   |
|                | II  | 70,0           | 70,3          | 249,9          | 56,1                           | 200,0   |
|                | III | 69,7           | 69,7          | 250,2          | 57,5                           | 200,0   |
| S3,0-D2        | I   | 70,2           | 69,4          | 250,2          | 58,1                           | 200,0   |
|                | II  | 70,0           | 69,7          | 250,1          | 57,4                           | 200,0   |
|                | III | 69,9           | 69,5          | 250,0          | 57,9                           | 200,0   |
| S4,0-D2        | I   | 69,7           | 70,1          | 249,8          | 57,8                           | 200,0   |
|                | II  | 70,0           | 69,6          | 249,8          | 57,5                           | 200,0   |
|                | III | 69,8           | 70,7          | 249,7          | 57,3                           | 200,0   |
| S4,0-D4        | I   | 69,9           | 71,0          | 249,5          | 58,0                           | 200,0   |
|                | II  | 69,7           | 70,9          | 249,7          | 58,5                           | 200,0   |
|                | III | 70,0           | 71,5          | 249,6          | 59,2                           | 200,0   |
| W2,0-D2        | I   | 69,8           | 69,8          | 249,4          | 59,2                           | 200,0   |
|                | II  | 70,0           | 71,8          | 250,0          | 58,9                           | 200,0   |
|                | III | 70,1           | 70,4          | 249,3          | 58,1                           | 200,0   |
| W4,0-D2        | I   | 70,4           | 70,9          | 250,0          | 58,2                           | 200,0   |
|                | II  | 69,3           | 70,0          | 249,3          | 57,1                           | 200,0   |
|                | III | 70,5           | 69,6          | 249,5          | 59,1                           | 200,0   |
| M2,0-D2        | I   | 69,7           | 69,4          | 249,5          | 59,3                           | 200,0   |
|                | II  | 70,0           | 71,1          | 250,0          | 57,9                           | 200,0   |
|                | III | 69,7           | 70,5          | 250,0          | 58,8                           | 200,0   |
| M4,0-D2        | I   | 69,8           | 70,7          | 249,2          | 57,5                           | 200,0   |
|                | II  | 69,6           | 70,1          | 249,5          | 58,3                           | 200,0   |
|                | III | 69,7           | 71,1          | 249,7          | 59,2                           | 200,0   |

10. táblázat: CMOD vizsgálat eredményei

| Próbatest jele |     | Maximális hajlítófeszültség [N/mm <sup>2</sup> ] | Repedés tágasságonkénti hajlítófeszültség [N/mm <sup>2</sup> ] |        |        |        |
|----------------|-----|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
|                |     |                                                  | 0,5 mm                                                         | 1,5 mm | 2,5 mm | 3,5 mm |
| E-D4           | I   | 6,15                                             | 0,106                                                          | -      | -      | -      |
|                | II  | 6,99                                             | -                                                              | -      | -      | -      |
|                | III | 3,45                                             | 1,991                                                          | -      | -      | -      |
| S1,5-D4        | I   | 17,21                                            | 9,783                                                          | 10,892 | 9,042  | 6,703  |
|                | II  | 11,92                                            | 7,065                                                          | 7,367  | 5,59   | 4,324  |
|                | III | 15,99                                            | 9,414                                                          | 10,62  | 8,666  | 7,003  |
| S2,0-D4        | I   | 26,92                                            | 21,639                                                         | 19,349 | 15,885 | 12,305 |
|                | II  | 23,93                                            | 18,543                                                         | 16,867 | 13,591 | 10,52  |
|                | III | 27,48                                            | 21,26                                                          | 19,423 | 15,13  | 11,584 |
| E-D2           | I   | 5,88                                             | 0,065                                                          | -      | -      | -      |
|                | II  | 5,82                                             | 0,066                                                          | -      | -      | -      |
|                | III | 7,72                                             | -                                                              | -      | -      | -      |
| S1,5-D2        | I   | 16,46                                            | 12,618                                                         | 10,688 | 8,713  | 7,196  |
|                | II  | 22,89                                            | 17,397                                                         | 15,585 | 13,082 | 10,563 |
|                | III | 21,72                                            | 16,294                                                         | 13,876 | 10,928 | 8,838  |
| S2,0-D2        | I   | 22,13                                            | 13,857                                                         | 16,333 | 13,423 | 10,384 |
|                | II  | 26,16                                            | 19,536                                                         | 16,417 | 12,724 | 9,727  |
|                | III | 22,49                                            | 16,465                                                         | 14,313 | 11,653 | 9,159  |
| S2,5-D2        | I   | 26,30                                            | 19,624                                                         | 18,218 | 14,413 | 10,746 |
|                | II  | 26,69                                            | 21,594                                                         | 20,381 | 17,044 | 13,744 |
|                | III | 28,612                                           | 21,674                                                         | 20,401 | 16,646 | 12,253 |
| S3,0-D2        | I   | 30,57                                            | 23,492                                                         | 21,161 | 17,221 | 13,977 |
|                | II  | 32,92                                            | 24,452                                                         | 22,423 | 18,596 | 14,417 |
|                | III | 26,16                                            | 20,122                                                         | 17,122 | 13,307 | 10,381 |
| S4,0-D2        | I   | 42,42                                            | 31,011                                                         | 29,324 | 24,591 | 18,751 |
|                | II  | 39,84                                            | 30,469                                                         | 27,81  | 22,608 | 17,654 |
|                | III | 40,09                                            | 29,569                                                         | 28,412 | 23,269 | 18,055 |
| S4,0-D4        | I   | 32,22                                            | 23,695                                                         | 21,402 | 17,439 | 13,464 |
|                | II  | 25,37                                            | 19,964                                                         | 17,315 | 13,761 | 10,855 |
|                | III | 41,56                                            | 35,46                                                          | 20,232 | -      | -      |
| W2,0-D2        | I   | 25,70                                            | 20,617                                                         | 16,72  | 12,445 | 9,044  |
|                | II  | 29,36                                            | 23,34                                                          | 20,622 | 16,465 | 11,971 |
|                | III | 27,72                                            | 21,679                                                         | 167,67 | 12,524 | 9,039  |
| W4,0-D2        | I   | 44,55                                            | 33,236                                                         | 32,08  | 23,871 | 17,809 |
|                | II  | 48,88                                            | -                                                              | -      | -      | -      |
|                | III | 38,09                                            | 30,8                                                           | 27,354 | 20,741 | 14,935 |
| M2,0-D2        | I   | 8,76                                             | 6,576                                                          | 4,453  | 2,411  | 1,508  |
|                | II  | 10,16                                            | 7,341                                                          | 5,853  | 2,903  | 1,539  |
|                | III | 7,88                                             | 5,789                                                          | 4,323  | 2,268  | 1,394  |
| M4,0-D2        | I   | 14,53                                            | -                                                              | -      | -      | -      |
|                | II  | 14,52                                            | 10,999                                                         | 3,112  | 1,359  | -      |
|                | III | 16,61                                            | 11,6                                                           | 5,307  | 1,948  | -      |



\*E: etalon, S: SAM 0,22×6, W: wirex 20/13, M: Masterfibre 401

1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0: száladagolás [V%]

D4: 0/4 OH, D2: SIMIX homok

27. ábra: Az összes CMOD próbatest vizsgálati eredményének ábrázolása