

# Hőkárosodott beton újrahasznosított adalékanyagként való felhasználása új betonokban

## Reuse of Thermally Damaged Concrete as Recycled Aggregate in New Concrete

Dr. HLAVIČKA Viktor, ZSIKLA Tamás, Dr. MAJOROSNÉ Dr. LUBLÓY Éva Eszter

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar  
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest Műegyetem rakpart 3.  
hlavicka.viktor@emk.bme.hu

### Abstract

*This study investigates the applicability of recycled aggregates derived from thermally damaged concrete at replacement ratios of 10–50%. The results indicate that at 10–25% replacement, compressive strength approaches the reference concrete, while a reduction is observed at 50%. Thermal treatment consistently improved mechanical performance, with several mixtures exceeding the reference strength. The original strength of the parent concrete did not show a clear correlation with the final performance. The findings confirm that, with appropriate pre-treatment, thermally damaged concrete can be effectively reused in the production of high-strength concrete.*

**Keywords:** recycled aggregate concrete (RAC), recycled concrete aggregate (RCA), heat-damaged aggregate, modulus of fineness, compressive strength

### Kivonat

*A kutatás hőkárosodott betonból származó újrahasznosított adalékanyagok alkalmazhatóságát vizsgálta 10–50% helyettesítési arány mellett. Az eredmények szerint 10–25% esetén a nyomószilárdság megközelíti a referencia értéket, míg 50%-nál csökkenés tapasztalható. A hőkezelés minden esetben javította a mechanikai tulajdonságokat, több keveréknél a referencia szilárdságát is meghaladva. Az adalékanyag eredeti betonminősége nem mutatott egyértelmű kapcsolatot a végső teljesítménnyel. Az eredmények igazolják, hogy megfelelő előkezeléssel a hőkárosodott beton hatékonyan hasznosítható nagy szilárdságú betonok előállítására.*

**Kulcsszavak:** újrahasznosított beton, zúzott beton adalékanyag, hőkárosodott adalékanyag, finomsági modulus, nyomószilárdság

## 1. BEVEZETÉS

Az építési és bontási hulladékok mennyisége világszerte folyamatosan növekszik. A beton a legnagyobb mennyiségben előforduló építőanyag [1], így újrahasznosítása kiemelt jelentőségű mind környezeti, mind gazdasági szempontból. Magyarországon az újrahasznosítás aránya még viszonylag alacsony, miközben több fejlett országban már jelentős mértékben alkalmaznak újrahasznosított betonadalékanyagot [2].

A hőhatásnak kitett betonok – például tüzesetek után – jelentős mennyiségű hulladékot képeznek. Ezek újrahasznosításának lehetősége mérnöki szempontból különösen fontos, mivel a hőkárosodás a beton mikroszerkezetében (pórusosság, mikrorepedések, hidratációs termékek átalakulása) maradandó változásokat okoz. A jelen kutatás ezt a problémakört vizsgálja kísérleti úton.

## 2. IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

Hőmérséklet emelkedésének hatására a beton szilárdsági jellemzői romlanak, korábbi jellemzőit a lehülés után sem nyeri vissza, mivel a szerkezetben visszafordíthatatlan folyamatok mennek végbe, megváltozik a szerkezet és az ásványtani összetétel. A beton tönkremenetele két okból következik be, az

alkotóelemek kémiai átalakulása és a betonfelület leválása miatt, de a tönkremenetel folyamatát több tényező és tulajdonság befolyásolja, amik függenek a beton összetételétől, a nedvességtartalomtól, a hőterhelés módjától és a visszahűlés folyamatától [3].

A betonban a hőmérséklet emelkedésével 100 °C körül elkezdődik a kémiailag kötött víz távozása a makro-pórusokból, ami tömegvesztést okoz. Közben már 50 °C és 110 °C között bekövetkezik az ettringit bomlása. 200 °C környékén további dehidratációs folyamatok mennek végbe, ami szintén kismértékű tömegvesztést okoz. A kémiailag kötött víz és a pórusvíz távozásáig a próbatestek tömegvesztése különböző lehet az eltérő kiindulási nedvességtartalmak miatt. 450 °C és 550 °C között bekövetkezik a nem karbonátosodott portlandit (kalcium hidroxid) bomlása, a víz eltávozásával járó változás hőelnyelő reakcióval jár, ez endoterm reakciót és egyidejűleg tömegvesztést okoz. 573 °C-on közösleges betonoknál a kvarc  $\alpha$  módosulatból  $\beta$  módosulatba való kristály átalakulása kis intenzitású endoterm (hőelnyelő) csúcsot eredményez. A kvarc átalakulása 5,7%-os térfogatnövekedést eredményez, ami lényeges károsodást eredményez, ennek következményeképpen a beton teherhordó képessége megszűnik. 700 °C-on a CSH (kalcium-szilikát-hidrát) vegyületek vízleadással bomlanak, ez a folyamat szintén térfogatnövekedést eredményez és jelentős szilárdságcsökkenést okoz [4], [5], [6].

### 3. KÍSÉRLETEK BEMUTATÁSA

#### 3.1 Vizsgált újrahasznosított beton adalékanyagok

A vizsgálatokhoz összesen 7 féle zúzottbeton-adalékanyag állt rendelkezésre, amiket egy korábbi kutatásból [7] visszamaradt próbatestek aprításából állítottunk elő:

- N1: Betonzúzalék szokványos betonból készült, aminek átlagos nyomószilárdsága 35 N/mm<sup>2</sup> volt. Az alapbeton nem volt kitéve hőterhelésnek.
- N1-HK: Betonzúzalék szokványos betonból készült, aminek átlagos nyomószilárdsága 35 N/mm<sup>2</sup> volt. Az alapbeton ki volt téve hőterhelésnek.
- N2: Betonzúzalék szokványos betonból készült, aminek átlagos nyomószilárdsága 73 N/mm<sup>2</sup> volt. Az alapbeton nem volt kitéve hőterhelésnek.
- N2-HK: Betonzúzalék szokványos betonból készült, aminek átlagos nyomószilárdsága 73 N/mm<sup>2</sup> volt. Az alapbeton ki volt téve hőterhelésnek.
- R1-HK: A betonzúzalék olyan újrahasznosított betonból készült, ami 25%-ban tartalmazott betonzúzalékot. Az újrahasznosított beton nyomószilárdsága 56 N/mm<sup>2</sup> volt. Az újrahasznosított alapbeton ki volt téve hőterhelésnek.
- R2-HK: A betonzúzalék olyan újrahasznosított betonból készült, ami 50%-ban tartalmazott betonzúzalékot. Az újrahasznosított beton nyomószilárdsága 57 N/mm<sup>2</sup> volt. Az újrahasznosított alapbeton ki volt téve hőterhelésnek.
- R3-HK: A betonzúzalék olyan újrahasznosított betonból készült, ami 75%-ban tartalmazott betonzúzalékot. Az újrahasznosított beton nyomószilárdsága 55 N/mm<sup>2</sup> volt. Az újrahasznosított alapbeton ki volt téve hőterhelésnek.

A hőterhelésnek kitett betonok a korábbi kutatás során különböző hőlépcsőkben voltak vizsgálva: 20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800 °C. Azonban a betonzúzalék elkészítése esetén a különböző hőlépcsőkben terhelt, és ebből adódóan különböző mértékben hőkárosodott betonelemeket összekevertük, hogy a zúzalék egyenlő arányban tartalmazzon minden hőlépcsőt. Ezzel közelítve azt a valós helyzetet, ami tűzkárosodott épületek bontásából származó betonzúzalékok esetén is fennállna.

#### 3.2 Újrahasznosított beton adalékanyag vizsgálatok

A beton elemeket pofás törő segítségével aprítottuk zúzalékká. Ezt követően a betonzúzalékoknak szitasor alkalmazásával megmértük a szemmegoszlását. Az újrahasznosított beton adalékanyagok 4 mm-nél nagyobb frakcióján vízfelszívás és testsűrűség vizsgálatokat végeztünk az újrahasznosított betonok receptúráinak összeállításához.

#### 3.3 Újrahasznosított adalékanyagú betonkeverékek

Az újrahasznosított betonok elkészítéséhez CEM I 52,5 N típusú portlandcementet használtunk, 390 kg/m<sup>3</sup> adagolásban. Minden keverék esetén a víz-cement tényező 0,45 volt.

Az újrahasznosított beton adalékanyagok hatását minden típus esetén több adagolásban is megvizsgáltuk. Az újrahasznosított betonok 10, 25 vagy 50%-ban tartalmaztak betonzúzalékot.

A kutatás során a 7 eltérő típusú zúzottbeton-adalékanyag, 3 eltérő adagolásának felhasználásával, és egy etalon keverék előállításával (0% újrahasznosított adalékanyag tartalom) összesen 22 db keveréket készítettünk.

A keverékekből 100x100x100 mm élhosszúságú kockákat készítettünk. A próbatesteket a magyarországi szabályozásnak [8] megfelelően 7 napos korukig víz alatt, majd azt követően laboratóriumi körülmények között tároltuk.

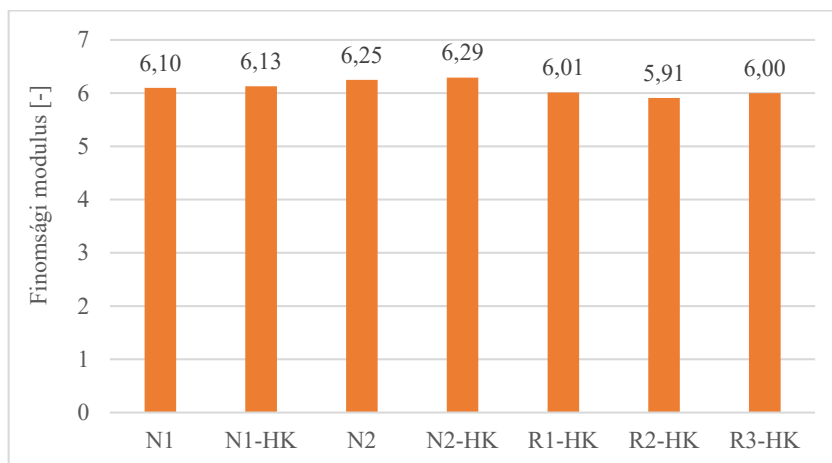
### 3.4 Újrahasznosított adalékanyagú beton vizsgálatok

Az újrahasznosított beton keverékekből készült próbatesteken nyomószilárdság vizsgálatot végeztünk a hatályos szabványnak [9] megfelelően 14, 28 és 56 napos korban, 3-3-3 db próbatest felhasználásával.

## 4. EREDMÉNYEK

### 4.1 Újrahasznosított beton adalékanyagok finomsági modulusa

Az 1. ábra alapján megállapítható, hogy a vizsgált adalékanyagok finomsági modulusa viszonylag szűk tartományban, 5,91 és 6,29 között változik, ami kiegyenlített szemeloszlásra utal a különböző típusok esetén. A legnagyobb finomsági modulus az N2-HK (6,29) esetében adódik, míg a legalacsonyabb értéket a R2-HK (5,91) mutatja.



1. ábra: Újrahasznosított adalékanyagok finomsági modulusa

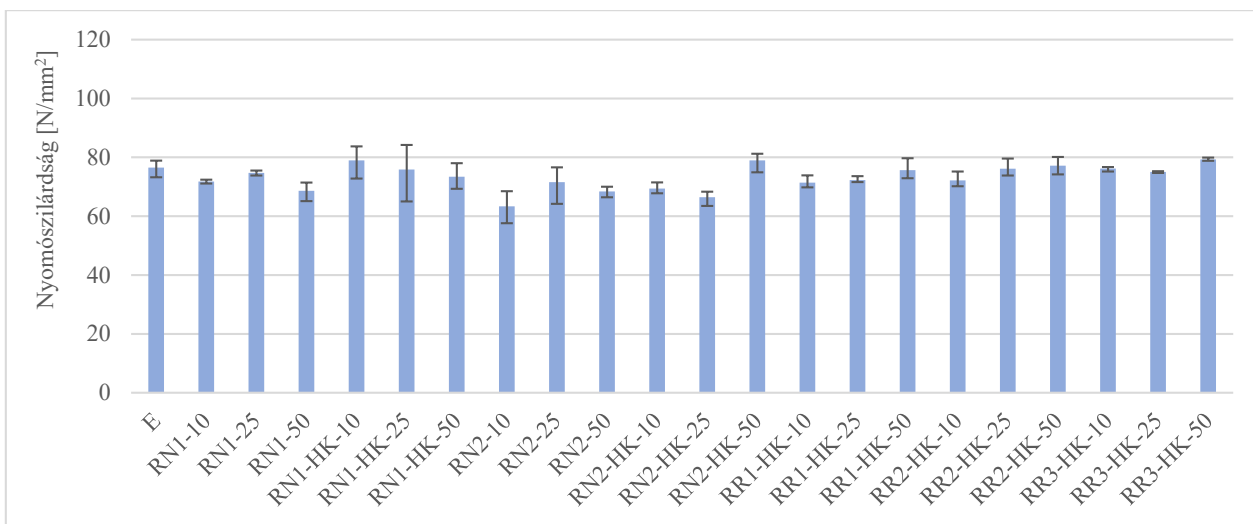
A természetes betonból származó adalékanyagok (N1 és N2) esetében a hőkezelés hatása mérsékelt, de kimutatható: mindkét esetben enyhe finomsági modulus növekedés figyelhető meg. Ez arra utal, hogy a hőkezelés hatására a szemcsék aprózódása, illetve a régi habarcs részleges leválása módosítja a szemeloszlást.

Az R típusú, már eleve újrahasznosított betont tartalmazó adalékanyagok esetében a finomsági modulus értékei kissé alacsonyabbak (5,91–6,01), ami finomabb szemeloszlásra és nagyobb porfrakcióra utal. Ez összhangban áll a többszörös újrahasznosítás során fellépő szemcseaprósodással és a gyengébb, porózusabb régi habarcs jelenlétével.

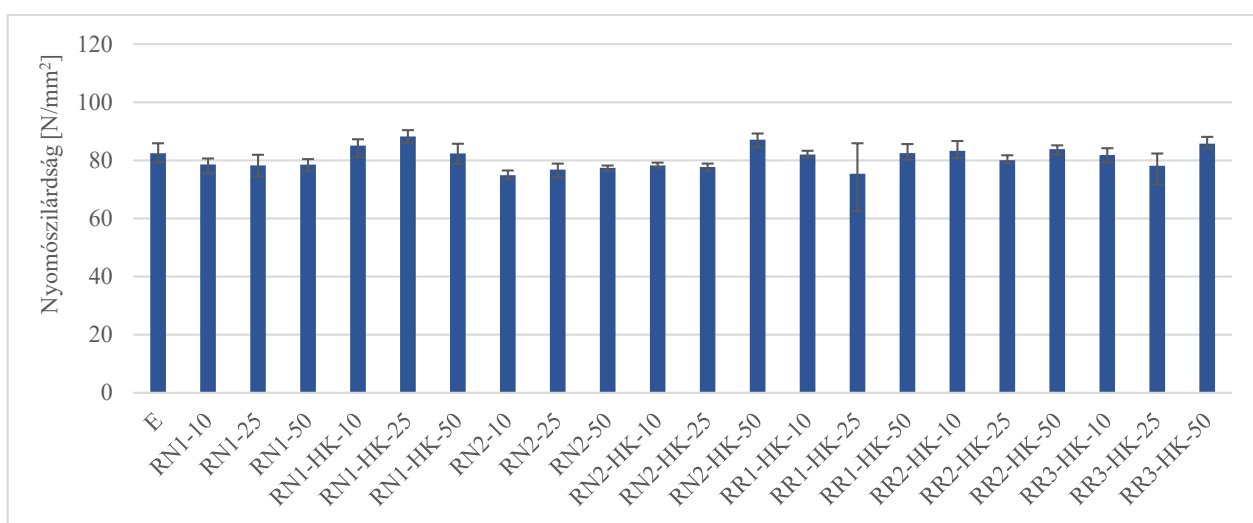
Összességében megállapítható, hogy a hőkezelés hatása a szemeloszlásra nem jelentős mértékű, azonban következetesen a finomsági modulus enyhe növekedését eredményezi a természetes betonból származó adalékanyagoknál. Ezzel szemben a többszörösen újrahasznosított adalékanyagok esetében a finomsági modulus alacsonyabb értékei arra utalnak, hogy a magasabb újrahasznosított tartalom finomabb szemeloszlást eredményez, ami befolyásolhatja a beton bedolgozhatóságát és az ITZ kialakulását.

### 4.2 Újrahasznosított adalékanyagú betonok nyomószilárdsága

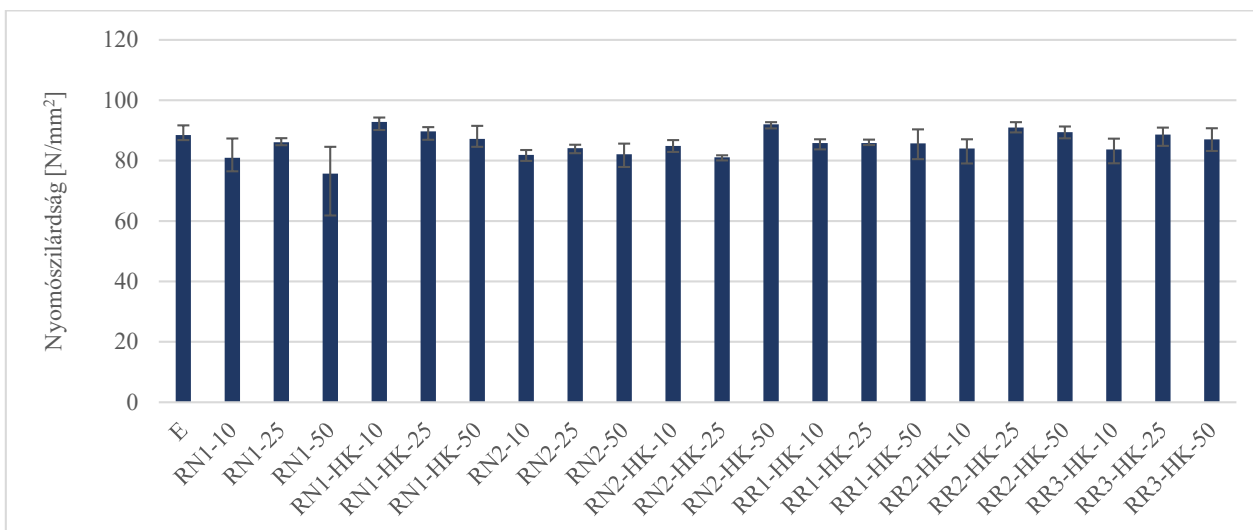
A vizsgált betonok nyomószilárdsági eredményei alapján (2. ábra, 3. ábra, 4. ábra) megállapítható, hogy az újrahasznosított adalékanyag aránya, típusa, hőkezelése, valamint annak eredeti betonminősége együttesen befolyásolja a mechanikai teljesítményt. Általános tendencia, hogy 10–25% helyettesítési arány mellett a nyomószilárdság közelíti a referencia beton értékeit, míg 50%-os aránynál jellemzően csökkenés figyelhető meg.



2. ábra: Újrahasznosított betonok nyomószilárdsága 14 napos korban



3. ábra: Újrahasznosított betonok nyomószilárdsága 28 napos korban



4. ábra: Újrahasznosított betonok nyomószilárdsága 56 napos korban

Az adalékanyag eredeti szilárdsága önmagában nem mutat egyértelmű összefüggést a vizsgált betonok teljesítményével. Bár az N2 adalékanyag magas (73 N/mm<sup>2</sup>) kiindulási szilárdsággal rendelkezik, az ebből készült keverékek nem eredményeztek kiemelkedő nyomószilárdságot, és több esetben elmaradtak az alacsonyabb szilárdságú (N1: 35 N/mm<sup>2</sup>) alapbetonból származó adalékanyaggal készült, különösen hőkezelt

keverékektől. Ez arra utal, hogy a teljesítményt elsődlegesen nem a kiindulási beton szilárdsága, hanem a régi habarcs mikroszerkezeti állapota és az átmeneti zóna minősége határozza meg.

A hőterhelésnek kitett adalékanyagok (HK) alkalmazása minden vizsgált esetben kedvező hatást gyakorolt a nyomószilárdságra. Már korai korban is több keverék elérte vagy meghaladta a referencia értéket, míg 56 napos korban több HK keverék 90 N/mm<sup>2</sup> feletti szilárdságot mutatott, meghaladva a referencia beton 88,5 N/mm<sup>2</sup> értékét. A javulás a régi habarcs szerkezetének módosulásával, a szemcsefelület érdességének növekedésével is magyarázható.

Az újrahasznosított betonból származó (R1–R3) adalékanyagok esetében is kedvező eredmények figyelhetők meg, különösen hőkezelést követően. Ezek a keverékek több esetben elérik vagy meghaladják a referencia beton szilárdságát, ami azt jelzi, hogy megfelelő előkezeléssel a többszörös újrahasznosítás sem jár szükségszerű teljesítménycsökkenéssel.

Összességében megállapítható, hogy az újrahasznosított adalékanyag alkalmazásából eredő esetleges kedvezőtlen hatások hatékonyan mérsékelhetők a megfelelő adalékanyag-választással és hőkezeléssel, így még magas (50%) helyettesítési arány mellett is biztosítható a nagy szilárdságú betonok előállítás.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során hőkárosodott betonból származó újrahasznosított adalékanyagok alkalmazhatóságát vizsgáltuk új betonokban. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az adalékanyag aránya, típusa és hőkezelése együttesen befolyásolja a nyomószilárdságot. Alacsony és közepes (10–25%) helyettesítési arány mellett a mechanikai teljesítmény megközelíti a referencia betonét, míg 50% esetén jellemzően csökkenés figyelhető meg. A hőkezelés minden esetben kedvező hatásúnak bizonyult, és több keverék 56 napos korban meghaladta a referencia beton szilárdságát. Az adalékanyag eredeti szilárdsága önmagában nem mutatott egyértelmű összefüggést a végső teljesítménnyel, míg a többszörösen újrahasznosított betonból származó adalékanyagok is megfelelő mechanikai tulajdonságokat biztosítottak.

Összességében megállapítható, hogy megfelelő előkezelés mellett a hőkárosodott betonból előállított adalékanyag megfelelő szilárdságú betonok gyártására is alkalmas, akár magas helyettesítési arány mellett is.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A PD 146109 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az OTKA PD\_23 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

## HIVATKOZÁSOK

- [1] Global Cement and Concrete Association, „CEMENT AND CONCRETE AROUND THE WORLD”. Elérés: 2023. április 10. [Online]. Elérhető: <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world/>
- [2] European Aggregates Association, „Annual Review 2020-2021”, 2023. Elérés: 2023. április 10. [Online]. Elérhető: [https://uepg.eu/mediatheque/media/Final\\_-\\_UEPG-AR2020\\_2021-V05\\_spreads72dpiLowQReduced.pdf](https://uepg.eu/mediatheque/media/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf)
- [3] K. Ch. Thielen, „Strength and Deformation of Concrete Subjected to high Temperature and Biaxial Stress-Test and Modeling”, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, köt. 437, 1994.
- [4] M. C. Alonso és U. Schneider, „Degradation Reactions in Concretes Exposed to High Temperatures”, 2019, o. 5–40. doi: 10.1007/978-3-319-95432-5\_2.
- [5] M. Malik, S. K. Bhattacharyya, és S. V. Barai, „Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: A review”, *Constr. Build. Mater.*, köt. 270, o. 121398, febr. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121398.
- [6] Q. Ma, R. Guo, Z. Zhao, Z. Lin, és K. He, „Mechanical properties of concrete at high temperature-A review”, 2015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131.
- [7] V. Hlavička, „Parent Concrete Resistance Effects on the High-Temperature Resistance of Recycled Aggregate Concrete”, in *5th International Fire Safety Symposium (IFireSS 2025)*, Belfast, UK, 2025, o. 422–431.
- [8] MSZ 4798, „Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon”, 2016.
- [9] EN 12390-3, „Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens”, 2019.