

Bontási hulladék hasznosítása betonadalékanyagként

Recycling of the Demolition Waste as Concrete Aggregate

NEMES Rita, PhD, egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3. +36 1 4633454, nemes.rita@emk.bme.hu, https://em.bme.hu/

Abstract

The recycling of construction and demolition waste – crushed concrete and ceramic brick – has become a major sustainability challenge in the construction industry, particularly due to the high environmental impact of concrete and the high ratio of natural aggregates. The aim of this research is to investigate the suitability of these materials as concrete aggregate, with particular attention to the effect of different replacement ratios (25–50–75%) on strength. Based on the results, favourable strength properties can be achieved even with a higher proportion of crushed concrete, and crushed bricks can be used to make lightweight concrete.

Keywords: recycling; concrete; crashed clay brick; building demolition waste; compressive strength

Kivonat

Az építési-bontási hulladékok – beton- és téglazúzalék – újrahasznosítása az építőipar egyik kiemelt fenntarthatósági kihívása, különösen a beton magas környezeti terhelése és a természetes adalékanyagok nagyarányú felhasználása miatt. Jelen kutatás célja a betonadalékanyagként való alkalmazhatóság vizsgálata, különös tekintettel a különböző helyettesítési arányok (25–50–75%) szilárdságra gyakorolt hatására. Az eredmények alapján a betonazúzalék nagyobb arányú alkalmazása esetén is kedvező szilárdsági tulajdonságok érhetők el, téglazúzalékkal pedig könnyűbetonok készíthetők.

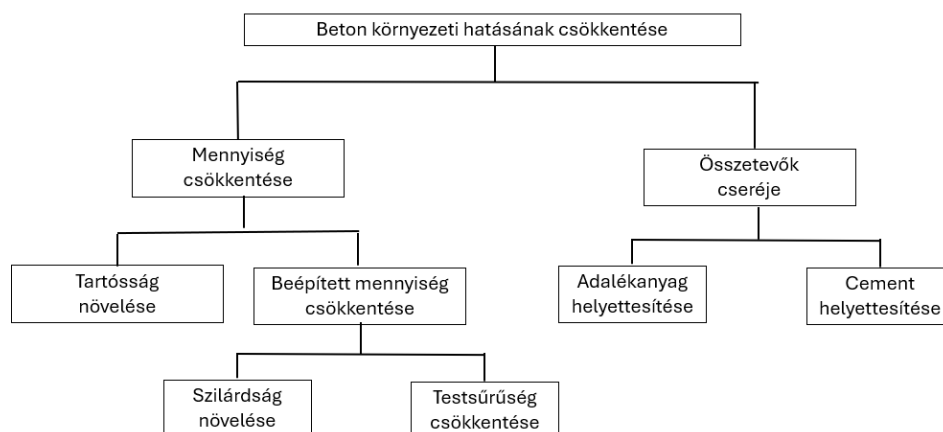
Kulcsszavak: újrahasznosítás; beton; téglazúzalék; építési-bontási hulladék; nyomószilárdság

1. BEVEZETÉS

A beton az építőipar jelenleg legnagyobb mennyiségben felhasznált anyaga [1]. A magasépítésben alapvető, de jelentős mennyiségben alkalmazzák számos infrastruktúra szerkezetben (utak, hidak, tartályok), és extra funkciói is népszerűek, pl. szobrok, utcabútorok, burkolatok is nagy számban készülnek a felhasználásával. Egy mesterséges kő, amit alapesetben egy közúzalék adalékanyagváz és az azt összekötő cementkő alkot. Változatosan formázható, kiegészíthető és tág szilárdsági tartományban jól tervezhető. Nagy hátránya viszont a magas környezeti lábnyoma. Mindegy milyen elemzést veszünk alapul, az energiára, a szén-dioxid kibocsájtásra számszerűsítjük az építőanyagokat, magas értékeket kapunk és ennek csökkentése már az 1990-es évek vége óta folyamatos cél, de napjainkban felgyorsult az üteme [2]. Bár a számítási módszer, ami a közeljövőben biztosan bevezetésre kerül, még nem ismert pontosan, de nem is a számítás módja a fontos, hanem a beton alapanyagainak megválasztása, azok módosítása [3,4]. Az erőforrásokkal való gazdálkodás során találkozunk az 5R elvével (Refuse, Reduce, Reuse, Rot, Recycle). Ebből a beton-technológiában a Reduce (csökkentés) és Recycle (újrahasznosítás) értelmezhető a legjobban. Felmerül a kérdés, hogy hogyan csökkentjük a beton környezeti lábnyomát.

Erre alapvetően két irány van. Az egyik a kisebb mennyiség felhasználása (természetesen a funkció a és a műszaki tartalom megőrzése mellett). Lehet kisebb geometriát (keresztmetszetet) használni, azaz térben csökkenteni a betont pl. nagyszilárdságú beton (HSC) vagy könnyűbeton (LWC, LWAC) alkalmazásával vagy időben csökkenteni a felhasznált anyag mennyiségét, vagyis növelni a beton tartósságát (HPC, UHPC, fagyállóság, savállóság célzott növelése a funkcióhoz igazítva), ill. a tervezési élettartamát, ami különösen az infrastruktúra vagy mérnöki szerkezetek (hidak, víztározók) esetén jelentős. A mai modern világunk velejárója a túlfogyasztás, amit gazdasági érdekek vezérelnek. Ennek érdekében az eszközeinket rövid élettartamra

tervezik, hogy kénytelenek legyünk újat vásárolni. Az építőipar szerencsére kivétel ez alól, az épületeink és mérnöki szerkezeteink esetén egyre jelentősebb a tartósságra tervezés igénye (1. ábra).



1. ábra. A beton környezeti hatásának csökkentési módjai

A másik út az összetevők lecserélése. A beton legnagyobb mennyiségű összetevője az adalékanyag, ami kb. 70 V%. A természetes kőzúzalék helyettesítése – hulladék alapú, ipari melléktermékből származó, vagy újrahasznosított anyaggal – a nagy mennyiség miatt már akár 10-15%-os helyettesítés esetén is jelentős. A másik lehetőség a tiszta portland cement (klinkerásványok) cseréje, mert ez a beton legkörnyezetterhelőbb és egyben legdrágább összetevője. Helyettesítése lehet természetes puccolánokkal vagy még inkább ipari melléktermékekkel (pl. kohósalak), vagy kifejezetten hulladékokkal (pl. pernyével, üveggörrel), amik a cementtel együtt hidratációba lépnek.

Ezek egyike sem újdonság, az eredeti római cement természetes puccolán volt, és már az ókorban is használtak újrahasznosított adalékanyagot, pl. téglazúzalékot a római Pantheon építéséhez. A cementek a CEM I kivételével tartalmaznak kiegészítő anyagokat. Az utóbbi évtizedben viszont ezek a helyettesítések felértékelődtek. Az adalékanyag helyettesítése sokkal ritkább, főleg Magyarországon, ahol az adalékanyagként felhasználható természetes kőzetek (kvarckavics és homok, mészkő, andezit) jó minőségben és olcsón elérhetők. Így a speciális adalékanyag csak a speciális betonokhoz társul az általános mérnöki szemléletben, miközben pont az általános felhasználású betonok azok, amik nem igényelnek különleges követelményeket, ezért jól felhasználható bennük az építési bontási hulladék, elsősorban a bontott beton és a bontott égetett agyag falazóelemek. Ezek egyszerű felhasználásának segítése a célunk, olyan iránymutató értékek és egyszerűsített betonösszetételek megadásával, amik a széles körű elterjedést lehetővé teszik.

2. ÉPÍTÉSI-BONTÁSI HULLADÉK FELHASZNÁLÁSA ADALÉKANYAGKÉNT

2.1. Általános elvek

A természetes adalékanyag helyettesítésének a betonban több célja lehet. A legalapvetőbb a természetes erőforrások felhasználásának csökkentése. Az olyan helyeken, ahol forráshiány van, ott ez nyilvánvaló, például Hollandiában annyira kevés kőzet áll rendelkezésre, hogy 40-50 éve alapvető az ilyen típusú újrahasznosítás. Szabad terület is alig áll rendelkezésre, ahol a hulladékot el lehetne helyezni, és így párhuzamosan van jelen a másik tipikus cél a hulladékok és melléktermékek hasznosítása, de legalább eltüntetése, amire adódik a betonban való felhasználás. Nagyon nyilvánvalónak tűnik, mégis két problémával találkozunk. Az egyik, hogy hulladékként nem elég problémás az építési törmelék, mivel inert anyag, így nem veszélyes, nem kap kiemelt figyelmet. Viszont nagy mennyiség, nem fog lebomlani és nem égethető. Hatalmas depóniák létrehozhatók, amik akár a föld alatt eltüntethetők, de ezen utána nem lehet se építkezni, se mezőgazdaságot folytatni és a területek már ennél értékesebbek a fejlett világban mindenhol. A másik probléma, hogy a hulladékot a tényleg optimális felhasználáshoz kellően szelektálni kell. Ez pedig a központi begyűjtést és tárolást nehezíti. Nem tudok csak beton- vagy csak téglahulladékot vásárolni, mert a bontás során, ha nincs előre figyelembe véve az újrahasznosítás, akkor a hulladékok keverten jelennek meg, akár szerves, vagy veszélyes anyagokat is tartalmazva. Még sokszor a beton sem egyértelmű. A hulladék-

kezelés jogi környezete is nehezíti az újrahasznosítását a szektorban. Ezért jelenleg a legkézenfekvőbb, hogy egy barna mezős beruházásnál a szeparált bontás tervezetten való végzése és a bontási törmelék deponálása, majd helyben felhasználása, ezeknek a lépéseknek az ütemezése. Ezekben az esetekben különösen hasznos, ha a teljes zúzási mennyiség felhasználható, nem csak az ideális részek, mint pl. a durva frakció (> 4 mm-es szemcseméret). Legújabb kísérleteinket már ilyen irányban végeztük. Figyelembe vettük, hogy milyen zúzóberendezéssel, melyik anyagból, milyen szemmegoszlás keletkezik és ezeket, hogy lehet egyszerűen felhasználni bonyolult előzetes vizsgálatok és komplikált betontechnológiai tervezés nélkül.

Jelenleg megindult egy lendület az újrahasznosításban. Ha az építési termékeket vagy épületeket/építményeket környezeti szempontból minősíteni kell (életciklus elemzéssel, karbonlábnyommal vagy bármi, akár a jövőben kitalált hasonló számmal), akkor fontos lesz a beépített anyag és az újrahasznosítás aránya. Egyelőre ez a motiváció a legerősebb, mert gazdasági oldalon még nehéz konkrét azonnali haszonnal számolni, bár a jövőben a dráguló hulladéklerakással ez is bekövetkezhet.

Az általános elvek szerint az adalékanyag 10%-os helyettesítése nehézségek nélkül megoldható, minimális hatással lesz a beton minőségére. Viszont ebben az esetben is ez a hulladék egy külön adalékanyag fajta, amit vizsgálni kell az adalékanyag szabvány szerint, testsűrűség függvényében az EN 12620 vagy az EN 13055 szerint, ami többlet idő és munka. Ha nem helyben lévő bontási termék, akkor még a szennyezettsége is vizsgálendő, ami megint növeli a költségeket. 10% felhasználás nem fogja eltüntetni a régi épületek törmelékét bármilyen nagy is az új beruházás a régihez képest, tehát összességében biztos, hogy nem éri meg. A következő lépcső a 25-30% környékén van, amit az irányelvek még javasolnak, de legtöbb esetben itt is csak a durva frakció helyettesítése valósul meg. Ez viszont már mérhető mennyiség, ezért már érdemes elvégezni a vizsgálatokat, itt már akár „reklám” értéke is van az újrahasznosításnak, de ebben az esetben már szilárdságcsökkenésre kell számítani. Az MSZ 4798 meg is adja, hogy téglazúzalék felhasználása esetén csak legfeljebb LC25/28-as szilárdságra számíthatunk. Kérdés, hogy ez probléma-e? Az elmúlt 20 évben (az EN 206 / MSZ 4798 és a kitéti/környezeti osztályok bevezetése óta) lassan, de biztosan hozzászókkott az ipar a nagyobb szilárdságokhoz. De mi is a nagyobb szilárdság oka? Nem a statikus várta, várja el ezt a szilárdságot. Az eredeti cél (nagyon helyesen) a tartósság növelése. A szabványban megadott betonszilárdságok azért elvárt értékek, mert annak könnyen (nyomószilárdság vizsgálattal) ellenőrizhető következménye, hogy a többi követelményt betartották. Mert ha betartjuk a minimálisan előírt cementtartalmat és a maximálisan előírt víz-cement tényezőt (v/c), akkor annak eredménye lesz a környezeti osztályokhoz előírt nyomószilárdság. Persze csak akkor, ha a hagyományos adalékanyagot használtuk, amire a szabványos értékeket kidolgozták. Ha könnyűbetont kapunk eredményül, pl. téglazúzalék felhasználásánál, akkor nem is elvárás a testsűrűség és nem reális cél a hagyományos betonokra vonatkozó nyomószilárdság elérése.

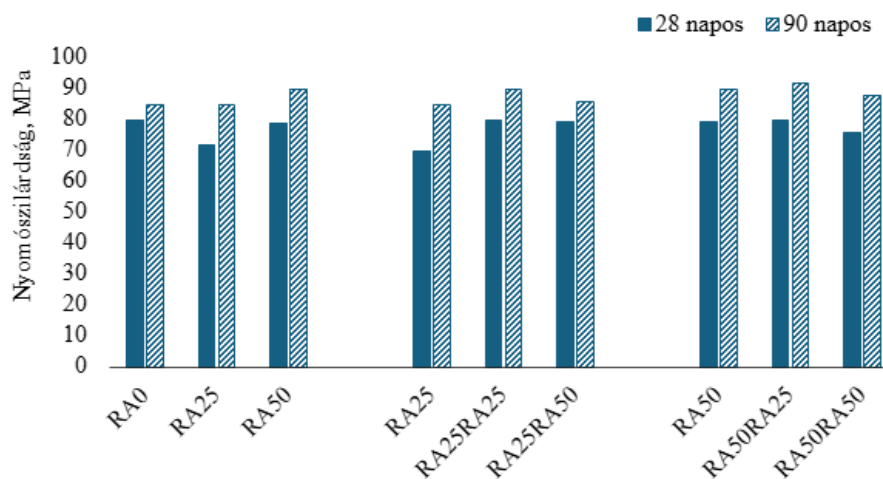
A szilárdságok szempontjából pedig pont nem ideális a 25%-os helyettesítés. Ebben az esetben már nem pár zavaró adalékanyag szemcse van, hanem ez a teljes mennyiség szempontjából mérhető. Az adalékanyag függvényében átalakul a belső teherbírási rendszer, a porózus adalékanyagoknál pedig a felületi zóna (ITZ) is változik. Ahhoz, hogy ez ideálisan tudjon alakulni a több adalékanyaggal járó egyenletesebb eloszlás ideális. A nagyobb helyettesítési arány nem feltétlen ad rosszabb szilárdsági eredményt. Nagyon hasonló eredményt kapunk 50% felhasználásánál és akkor is, ha nem csak a durva frakciót helyettesítjük. Ezzel 2-2,5 szeresére tudjuk növelni a hulladékhasznosítást. A szilárdság nem az egyetlen betonjellemző, amire szükség van, de a többi általános követelményt (környezeti osztályoknak megfelelést) leginkább a cement- és víztartalom befolyásolja.

2.2. Elérhető szilárdságok

Az elmúlt évtizedben számos kísérletet végeztünk tudományos kutatási vagy konkrét felhasználási céllal a beton- és téglazúzalék felhasználására. Ezek legrelevánsabb, általánosan is használható eredményeit foglalom össze.

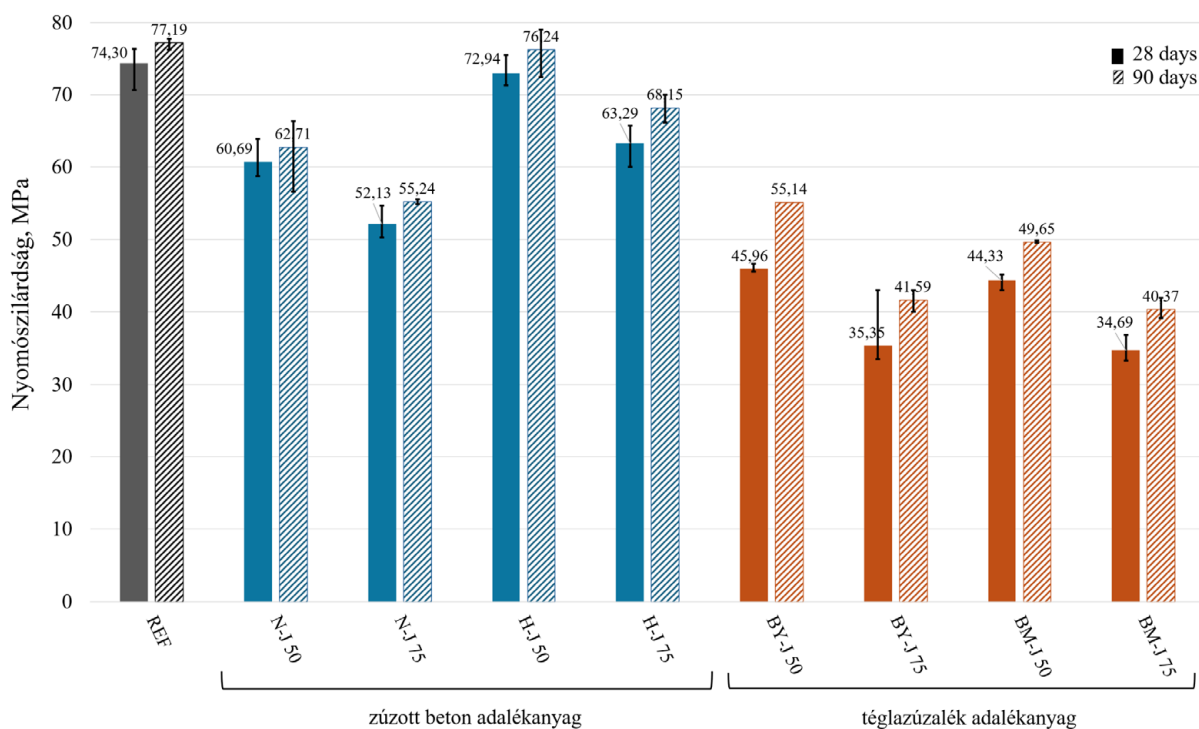
A legegyszerűbb esettel kezdve, ahol a kavics frakciót helyettesítettük zúzott betonnal 25 és 50%-ban. Cél volt a nagy szilárdságú, fagyálló, vízzáró, „mindenttudó” beton elérése, vagyis annak bizonyítása, hogy ha a betonban hulladék betont használunk fel, akkor is tudjuk ezeket a követelményeket teljesíteni. Több normál szilárdsági osztályú különböző beton zúzalékot használtunk fel adalékanyagként 25 és 50%-os durva frakció helyettesítéssel. A cementtartalom magas volt (500 kg/m³) a víz-cement tényező pedig alacsony (0,35), annak érdekében, hogy tényleg jól mérhető legyen az adalékanyag hatása, biztos ne a cementkő legyen a kritikus, szilárdság szempontjából. Tiszta portland cementet alkalmaztunk, mert egy későbbi fázisban a cement helyettesítés hatását is vizsgáltuk [5]. A 28 napos szabványos korban vizsgált szilárdságoknál 25%-os helyettesítésnél kb. 10% szilárdságcsökkenést tapasztaltunk, és ez a csökkenés nem nőtt, sőt csökkent, amikor a helyettesítést 50%-ra növeltük. Ha viszont a szilárdságot nem 28 napos korban,

hanem később, 90 napos korban vizsgáltuk, akkor már azt tapasztaltuk, hogy 25%-os helyettesítésnél nincs érdemi különbség a szilárdságban, 50%-os helyettesítésnél pedig kis mértékben, de nagyobb lett a mért szilárdság. Tehát az adalékanyag ilyen ideális (nagy szilárdságú, kis porozitású) cementkő mellett nem okoz szilárdságcsökkenést. A 90 napos korban való vizsgálat, bár nem a szabványos kor, de nem elrugaszkodott a valóságtól, mert a betonszerkezeteinket többnyire nem vesszük igénybe 3 hónapos kor előtt. Abból a szempontból sem kirívó, hogy ha a cementben a klinkereket helyettesítjük más hidraulikus anyaggal, akkor ott is lassabb lesz a szilárdulás üteme és javasolt a 90 napos vizsgálat eredményt mérvadónak tekinteni. Ez bevett, pl. metakaolin alkalmazásánál [6], mert vizsgálatokkal igazolták, hogy a várt szilárdságnövelő hatás 28 napos korban még nem érzékelhető, csak később alakul ki, de a beton teljes élettartama alatt ez lesz érvényes. Az eredményeket a 2. ábra első blokkja mutatja. Az RA jelöli az újrahasznosított adalékanyagok (recycled aggregate) a szám pedig a durva frakció százalékos helyettesítését. Ezek az eredmények nagyon biztatók voltak, de ezt követően felmerült a kérdés, hogy ha ez ilyen jól használható és nagyobb mennyiségben elterjed, akkor mi lesz ezeknek a betonoknak az élettartamuk végén, amikor már ezek kerülnek bontásra. Szükséges-e jelölni, nyilvántartani azokat a szerkezeteket, amik már hulladékhasznosított betonnal készültek. Ennek vizsgálatának érdekében készítettünk olyan keverékeket, ahol a kísérlet során vizsgált próbatesteket újra lezúztuk, majd kb. fél év tárolást követően újra felhasználtuk 25, illetve 50%-os helyettesítésére. Ezek az eredmények láthatók a 2. ábra második és harmadik blokkjában. RA25RA50 jelenti azt a betont, amiben első körben a kavics frakció 25%-át második körben (a 25%-os beton visszazúzása után ezzel a zúzalékkal) 50%-át helyettesítettük. Van némi szórás az eredményekben, de összefoglalva elmondható, hogy a referencia beton nyomószilárdságát minden vizsgált változat elérte 90 napos korban. A későbbiekben kiegészítettük ezeket a nyomószilárdság vizsgálatokat fagyhámlás és vízzáróság tesztekkel és ezekben az esetekben is a referencia betonnal megegyező vagy kedvezőbb értékeket kaptunk [7,8].



2. ábra. Durva frakciójú betonzúzalék felhasználásának hatása a nyomószilárdságra [5]

Felmerül az a kérdés, hogy jó, hogy a bontási hulladékot tudjuk hasznosítani, de ha ez nagyon nagy cementtartalmat igényel, akkor kérdés, hogy ez megéri-e. Gazdasági oldalról biztos, hogy nem, de környezeti oldalról, pl. a karbon lábnyom szempontjából is kérdéses. Ezért a következő fázisban már normál cement- és víztartalommal dolgoztunk [9]. A cementtartalmat 360 kg/m³-re választottuk, mivel az MSZ 4798-ban megadott környezeti osztályoknál ez a legnagyobb előírt érték a minimális cementtartalomra (leszámítva a kopásállósági osztályokat, de ott mindenképpen kopásálló adalékanyag is kellene) és a v/c-t 0,45-re, mert az a legkisebb előírt érték a maximális víztartalomra. A vizsgálatok során a normál C20/25-C50/60 beton szilárdsági osztály (N) mellett nagy szilárdságú >C50/60 beton zúzalékát (H) is használtuk, továbbá azonos cementkővázban kerámia falazóelem zúzalékot is bontott, kb. 150 éves téglából (BY) és kontrollként modern (2018-ban gyártott, soha fel nem használt, kisméretű tömör) téglából (BM) zúzalékából (illetve annak, habarcszott felületű nyomószilárdság-vizsgálatának törmelékéből). Az is különbség ebben a kísérletsorozatban, hogy már nem csak a durva frakciót használtuk fel, hanem a teljes lezúzott mennyiséget, a saját szemmegoszlás függvényében arányosan, vagyis a lehető legnagyobb mértékben a hulladék szempontjából. A helyettesítési arányokat is növeltük, 50 és 75%-t alkalmazva. Itt is vizsgáltuk a szabványos 28 napos mellett a 90 napos szilárdságot is. Az eredményeket a 3. ábra mutatja.



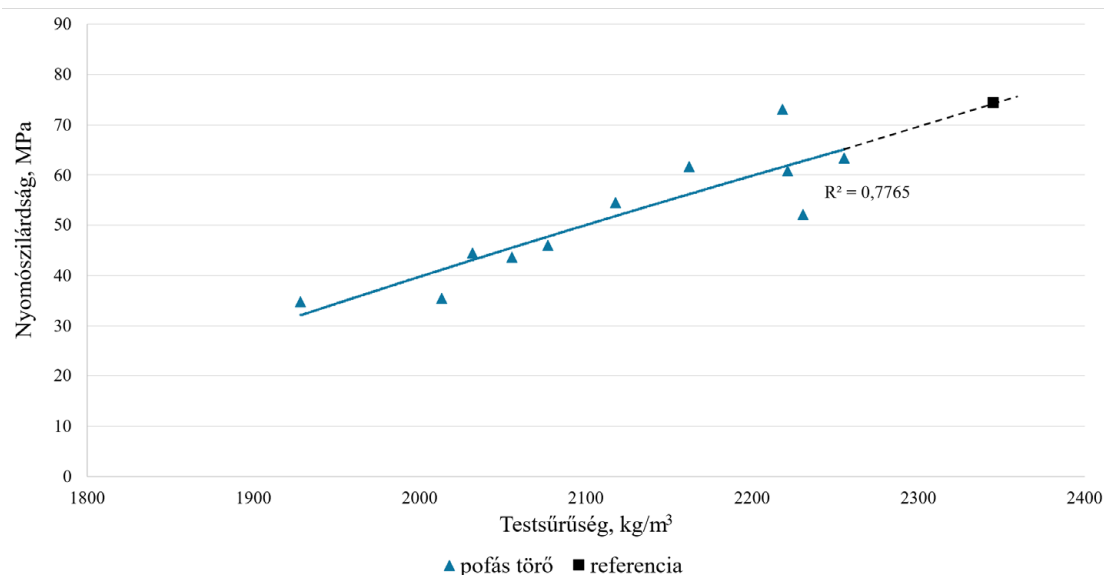
3. ábra. Teljes spektrumú beton- és téglaazúalék felhasználásának hatása a nyomószilárdságra

A referencia beton eredményein látjuk, hogy ha betartottuk a legszigorúbb cementtartalom és v/c arányt (nem párhuzamosan, hanem külön-külön értelmezve), akkor egy C50/60-as szilárdsági osztályú betont kaptunk, ami egy általános magasépítési alkalmazásban statikailag valószínűleg nem használható ki.

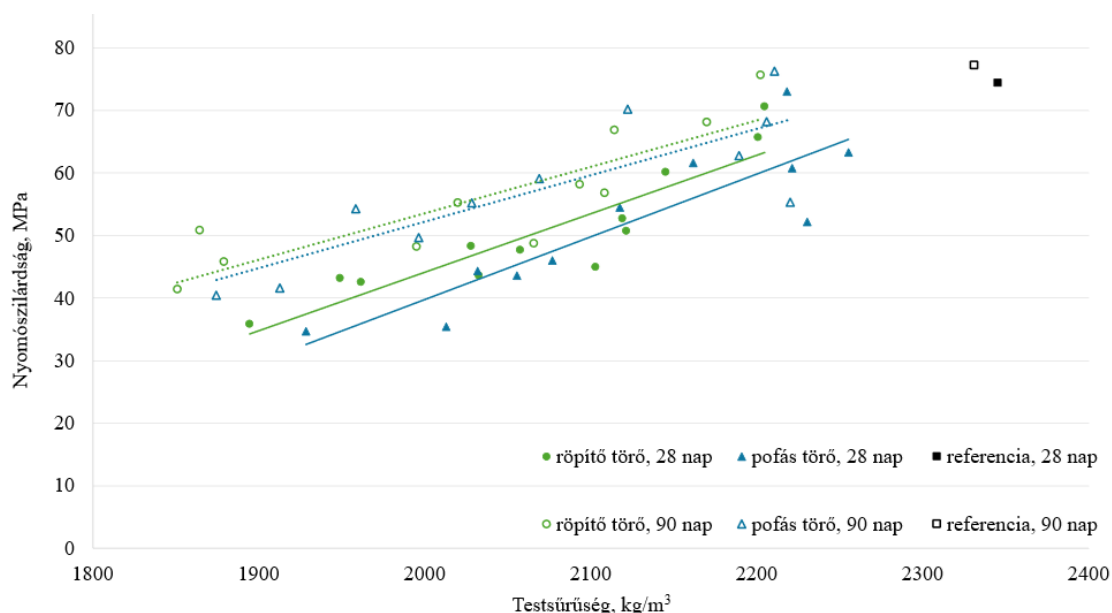
75%-os normál szilárdságú beton zúalékával való helyettesítésnél a szilárdság 30%-kal csökkent, ami kedvezőnek tekinthető, még így is kb. C30/37-es osztályú. A nagyszilárdságú beton 50%-os zúalékát használva lényegesen nagyobb szilárdságokat kapunk. Itt csak 1-2% a szilárdságcsökkenés, a szilárdsági osztály változatlan. Ez igaz a 28 és a 90 napos szilárdságokra is. Ebből levonható az a következtetés, hogy ha nem használunk extrém jó cementkővázat, akkor érdemes lehet a bontás során szétválogatni a nagyobb szilárdságú betonokat, pl. előregyártott elemeket, hogy azokat külön használjuk fel ott, ahol adott esetben a szilárdsági követelmény is nagyobb az új betonra.

A téglaazúalékos helyettesítés esetén már kisebbek az elérhető szilárdságok. 50%-os helyettesítés kb. 40%, 75%-os helyettesítés pedig kb. 50% szilárdságcsökkenést okoz. A különbség a két helyettesítés aránya között itt is kicsi, de ennél kisebb szilárdság (C20/25) alkalmazása már általánosságban nem javasolt. Érdemes lehet megfontolni még későbbi korban való vizsgálatot is, mert jelentős utószilárdulás figyelhető meg. A téglaazúalék vízfelvétele nagy, ezért valószínű, hogy a 90 napos vegyesen tárolt próbatestben is jelentős mennyiségű víz van, ami kihat a szilárdságvizsgálat eredményére, de a tényleges végszilárdságra már kevésbé. És ez az adalékanyag pórusaiban lévő víz egy folyamatos belső utókezelő hatást is nyújt, ami indoka a későbbi nagyobb utószilárdságnak, amely hatás még valószínűleg tart 90 napos korban is. A téglaazúalékos betonra kapott szilárdságok nagyjából a téglák eredeti szilárdságának felelnek meg. A BY jelű téglák régi épületekből bontott kb. 125-140 éves falazóelemek, aminek a szilárdsága 28-52 MPa között volt a vizsgált elemeken elég nagy szórással ($R^2=0,5$), de jellemzően 33-45 MPa és az új modern tégláké 35-40 MPa [10]. Érdekes, hogy a modern, nem használt téglák sem adtak jobb eredményt, mint a régi, használt, bontott elemek.

Téglaazúalék esetén 1900-2100 kg/m³ közötti betontestsűrűséget, betonazúalékok esetén 2100-2300 kg/m³ közöttit értünk el. Ezek egy része definíció szerint könnyűbeton. EN szabvány szerint 2000 kg/m³ alatt, de az amerikai besorolás és a ModelCode szerint 2200 kg/m³ alatt nevezzük a betont könnyűbetonnak. Könnyűbeton esetén pedig számolni kell a testsűrűséggel, tehát adódik, hogy a szilárdságot is a testsűrűség értéke alapján vegyük figyelembe. Ha a szilárdsági eredményeket nem önmagukban nézzük, hanem a beton testsűrűségének függvényében (4. ábra), akkor azt tapasztaljuk, hogy relatív kis szórással egy lineáris összefüggést kapunk. Márpedig a testsűrűség a betontervezés során könnyen számolható, egyszerűen tervezhető. Azt is megfigyelhetjük, hogy ha a mérési eredményekre illesztett egyenest meghosszabbítjuk, akkor arra jól illeszkedik a referencia beton.



4. ábra. Beton- és téglazúzalék adalékanyagú beton nyomószilárdsága a testsűrűség függvényében



5. ábra. Beton- és téglazúzalék adalékanyagú beton nyomószilárdsága a testsűrűség, a zúzógép típusa és a kor függvényében [9]

Végeztünk zúzásokat pofás és röpítő törővel is több különböző beton- és téglazúzalékon, elsősorban úgy, hogy az szemrevételezéssel vagy minimális roncsolásmentes vizsgálattal elkülöníthető legyen [9]. Sokszor bírálják a pofás törőt, hogy nem ideális a szemalak, vagy többszöri zúzást igényel annak optimalizálása, és a második lépésben röpítő törő használata javasolt [11,12]. Előnye viszont, hogy kevesebb por keletkezik [13], ami egyben hátrányként is felfogható, mert azt jelenti, hogy több cementkő marad az eredeti adalékanyag szemcsén [14], ez viszont csak beton zúzása esetén releváns, téglá esetén nem értelmezhető. Vizsgálataink során nem csak pofás törővel, hanem röpítő törővel zúzott betonokat is vizsgáltunk párhuzamosan, de mindegyiket csak egyszer törtük. Azt tapasztaltuk, hogy ha a teljes lezúzott beton mennyiséget felhasználjuk (nem szítaljuk ki a számunkra ideálisnak tartott, jellemzően durva frakciókat), akkor az adalékanyag mennyiség 50-75% közötti teljes spektrumú helyettesítésnél, 50-25% kvarchomok használatával, kis mértékben, de a pofás törővel zúzott adalékanyagú beton ad nagyobb nyomószilárdságot azonos százalékos alkalmazásnál. Ha téglazúzalékot használunk fel, akkor a helyzet megfordul, röpítő törővel való zúzás esetén kapjuk a nagyobb szilárdsági értékeket. Tehát az állítás nem általánosítható a felhasznált gyártási vagy bontási hulladékokra, az alapanyagot figyelembe kell venni.

Ha viszont a nyomószilárdságot a testsűrűség függvényében ábrázoljuk egyedi értékekkel, és erre lineáris függvényt illesztünk, akkor látszik, hogy a röpítő törővel készült zúzalékos beton relatív nyomó-

szilárdsága nagyobb adott testsűrűség esetén. Ez igaz mind a betonzúzalék, mind pedig a téglazúzalék esetén. Az eredmények alapján (5. ábra) megállapítható a korábban a testsűrűség összefüggésre tett megállapítások viszont kiterjeszhető. Az is leolvasható az ábráról, hogy 90 napos korra a két aprítási mód közötti különbség hatása minimálisra csökken, így kevésbé fontos, hogy ezt tervezési szempontból figyelembe vegyünk, inkább a könnyebben vagy olcsóbban elérhető technológiát érdemes választani.

Bár azonos függvény illeszthető a téglá és betonzúzaléokra, de a testsűrűségi tartományuk nem fedik egymást, ezért jelen kísérletek alapján nem lehet arra vonatkozóan következtetéseket levonni, hogy hogyan viselkednek, ha keverten vannak jelen. Ezért nem érdemes a különböző anyagú hulladékokat keverni. Már csak azért is óvatosan kell kezelni a különböző falazati anyagokat, mert sem a beton, sem a téglá közé nem keveredhet pórusbeton, mert a zúzott pórusbeton nem alkalmas telített betonok adalékanyagának, mert alkalikus környezetben duzzad [15], ezt mindenképpen külön kell választani.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Az építési-bontási hulladékok között nagy mennyiségben fordul elő beton és égetett agyag (kerámia) téglá, amik az építőipar számára nyersanyagot jelenthetnek, elsősorban új betonok adalékanyagaként, csökkentve ezzel a természeti erőforrások használatát és az építési hulladékok mennyiségének növekedését. Már most is sokan és sokat foglalkoznak a beton környezeti hatásaival, a karbon-lábnyomával és az életciklus-elemzésével. Valamilyen számszerűsítés bevezetésre fog kerülni. Bár a cement a legkörnyezet-terhelőbb összetevője a betonnak, a számítások egyértelműen ezekkel foglalkoznak, de hatalmas potenciál van az adalékanyag-felhasználásban is, vagy még inkább a hulladékok felhasználásában.

Jelen cikk több különböző kutatásunkat foglalja össze, amelyekben bontott beton- és téglazúzalék betonadalékanyagként való alkalmazhatóságát vizsgáltuk, különös tekintettel a különböző helyettesítési arányok mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásaira. A kísérletek során eltérő szilárdságú beton- és kerámiategla-zúzalékokat alkalmaztunk a szokásosnál nagyobb 25, 50 és 75%-os helyettesítési arányban, mind részleges (csak durva frakció), mind teljes, a zúzott állapotnak megfelelő szemeloszlású, tehát a hulladék szempontok szerint optimalizált, adalékanyag-helyettesítés mellett.

A vizsgálatok során elemeztük a betonok testsűrűségét, nyomószilárdságát. Pofás törővel zúzott, normál szilárdságú betonnak csak a durva frakcióját (>4 mm) felhasználva, kellően magas cementtartalom és alacsony víz-cement tényező mellett igazolható volt, hogy a referenciával azonos nyomószilárdság érhető el. Ez akkor is igaz, ha a már zúzott adalékanyagot újra zúzzuk és újból felhasználjuk.

Következő kutatási lépésben már kisebb cementtartalommal és nagyobb víz-cement tényezővel dolgoztunk, valamint a két leggyakoribb zúzási technológia (pofás törő és röpítő törő) hatását is vizsgáltuk. Már nem csak normál szilárdságú, hanem nagyszilárdságú betont, továbbá régi bontott és új kerámia téglákat is vizsgáltunk. Különbség volt, hogy a zúzások során keletkezett teljes adalékanyag mennyiséget használtuk a zúzási arányoknak megfelelően, vagyis nem a beton tulajdonságai felől optimalizáltunk, hanem a hulladékfelhasználás szempontjából. Az eredmények alapján a betonzúzalék kedvezőbb nyomószilárdsági eredményeket adott, de ha a téglazúzalékos betonnak figyelembe vesszük a testsűrűségét is, akkor már egy közös lineáris függvénnyel tudjuk jellemezni a szilárdságot. Ez lehetővé teszi a könnyen számolható testsűrűség alapján való tervezést.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezt a kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alap támogatta, a támogatási szám: OTKA K 146724.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Prasittisopin, L.; Tuvayanond, W.; Kang, T.H.-K.; Kaewunruen, S. *Concrete Mix Design of Recycled Concrete Aggregate (RCA): Analysis of Review Papers, Characteristics, Research Trends, and Underexplored Topics* Resources 2025, 14, 21
- [2] Nielsen, C.V. *Carbon Footprint of Concrete Building seen in the Life Cycle Perspective* Proceedings NRMCA 2008 Concrete Technology Forum June 2008, Denver
- [3] Dacić, A., Mester-Szabó, E., Fenyvesi, O., Szalay, Zs. *Life cycle assessment of concrete incorporating all concrete recycling products* Case Studies in Construction Materials 2214-5095 2214-5095 21 Paper: e03910, 2024

- [4] Shmls, M., Abed, M., Fort, J., Horvath, T., Bozsaky D. *Towards closed-loop concrete recycling: Life cycle assessment and multi-criteria analysis*, Journal of Cleaner Production 410 (2023)
- [5] Abed, M., Nemes, R., Tayeh B.A. *Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate* Journal of King Saud University– Engineering Sciences 32 (2020) 108–114
- [6] Borosnyói, A., Szijártó, A. *Metakaolin vizsgálata cement kiegészítő anyagként a k-érték elve szerint*, Építőanyag 68 (2016) 40–44.
- [7] Nemes, R., Szoby, T. Polláck, A., Nasios, T., Nehme, S. Abed, M. *Hulladékfelhasználású, öntömörödő, nagyszilárdságú betonok fagyállósága*, Vasbetonépítés: a fib Magyar Tagozat lapja: Műszaki folyóirat 1419-6441 1586-0361 23 (4) pp. 82-87 (2021)
- [8] Abed, M., Nemes, R., Lublós, É. *Performance of Self-Compacting High-Performance Concrete Produced with Waste Materials after Exposure to Elevated Temperature*, Journal of Materials in Civil Engineering 0899-1561 1943-5533 32 (1) Paper: 05019004 (2020)
- [9] Nemes, R. *Utilization of Demolition Waste for Concrete Aggregate*, Buildings 2075-5309 16 (3) Paper: 526, 20 p. (2026)
- [10] Mengitsu, G.M., Tóth M.M., Nemes, R. *Nondestructive assessment of compressive strength in historical solid clay bricks using the rebound hammer test: influence of density*, Heliyon 12 (4) e44723 (2026)
- [11] Ulsen, C., Tseng E., Angulo, S.C., Landman, M., Contessotto, R., Balbo, J.T., Kahn, H. *Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing* Journal of Materials Research and Technology Vol. 8 Issue 1 (2019)
- [12] BV-MI 01:2005 (H) *Betonkészítés bontási, építési és építőanyag-gyártási hulladék újrahasznosításával fib Magyar Tagozatának Műszaki Irányelv Bizottsága (2005)*
- [13] Hubert, J., Zhao, Z., Michel, F., Courard, L. *Effect of Crushing Method on the Properties of Produced Recycled Concrete Aggregates* Buildings, 13 (9), p. 2217 (2023)
- [14] Gress, D.L., Snyder, M.B., Sturtevant, J.R. *Performance of Rigid Pavements Containing Recycled Concrete Aggregate* Journal of the Transportation Research Board, Volume 2113, Issue 1 (2026)
- [15] Gyurkó, Z., Jankus, B., Fenyvesi, O., Nemes, R. *Sustainable applications for utilization the construction waste of aerated concrete* Journal of Cleaner Production 0959-6526 1879-1786 230 pp. 430-444 (2019)