

## A beton ellenálló képességének fokozása cementkiegészítő anyagokkal

### Increasing the resistance of concrete with supplementary materials

Dr. KOPECSKÓ Katalin, egyetemi docens<sup>1</sup>,  
KHAIQANI, Zaid, PhD hallgató<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

<sup>2</sup> BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

E-mail: kopecsko.katalin@emk.bme.hu Tel: (36-1) 463-2238, Fax: (36-1) 463-2017

<http://gmt.bme.hu/>

#### Abstract

*By increasing the durability of reinforced concrete structures, we can ensure a safe and long service life. In our article, we present the results of experiments on binder compositions that provide greater resistance compared to ordinary cement in aggressive chemical media, and simultaneously reducing the penetration of chloride ions to protect the steel reinforcement. Meeting all these expectations, primarily material science approaches are required. The method of our research is (i) to understand the degradation processes occurring due to the relevant physico-chemical effects, (ii) to reduce the rate of degradation processes.*

**Keywords:** cement, concrete, cement additive, chemical resistance, chloride ion migration

#### Kivonat

*A vasbetonszerkezetek tartósságának fokozásával biztonságos és hosszú használati élettartamot biztosíthatunk. Cikkünkben olyan kötőanyag összetételeken végzett kísérletek eredményeit mutatjuk be, amelyek nagyobb ellenálló képességet biztosítanak a szokványos cementekhez képest, agresszív kémiai közegekkel szemben, egyidejűleg az acélbetét védelme érdekében a kloridionok behatolását csökkentik. Mindezen elvárások teljesítése elsősorban anyagtani, ill. anyagtudományi megközelítéseket igényeltek. Kutatásunk módszere: (i) a vonatkozó fizikai-kémiai hatásokra bekövetkező leromlási folyamatok megismerése, (ii) a leromlási folyamatok sebességének csökkentése.*

**Kulcsszavak:** cement, beton, cement kiegészítőanyag, kémiai ellenálló képesség, kloridion migráció

## 1. BEVEZETÉS

A beton többkomponensű anyagi rendszer, amelynek viselkedését, szilárdságát, tartósságát és egyéb tulajdonságait elsősorban összetevői határozzák meg. Kutatásunk elsődleges célja a beton tulajdonságainak javítása, és ezáltal várható vagy tervezett élettartamának növelése volt. Ennek érdekében elsősorban a különböző összetételű kötőanyagok hatását vizsgáltuk cementpép és habarcs mintákon. A kötőanyagok kémiai ellenállóképessége vizsgálható cementpép kockákon statikus (kézi) módszerrel, különböző savas közegekben, abrázációs hatással vagy anélkül, továbbá a kémiai ellenálló képesség vizsgáljuk a habarcs vagy beton próbatestek ellenállóképességét, valamint a tönkremeneteli folyamatokat.

Az ellenálló képességi vizsgálatok eredményeinek alátámasztására, és az ok-okozati összefüggések feltárására a vizsgálati körbe bevont anyagok, valamint vizsgált próbatestek számos egyéb tulajdonságát tanulmányoztuk. Vizsgáltuk a cementek és cement kiegészítőanyagok felületi töltöttségét Zéta-potenciál mérővel, vizes diszperziós közegben, hidratációs hőfejlődésüket izoterm kalorimetriával, valamint a szemcsék morfológiáját pásztázó elektron mikroszkóppal. Magyarországon elsőként alkalmaztuk a Zéta-potenciál mérésének lehetőségét építőmérnöki területen, kötőanyag szemcséken. Betontechnológia szempontból nagy jelentőséggel bír a diszpergált részecskék, cementek és a cement kiegészítő anyagok felületi töltöttségét megismerni. Ezen kívül a felületi töltöttség megváltoztatásának lehetősége, a különböző típusú adalékszerek hatása is tanulmányozható a módszerrel.

## 2. KÍSÉRLETI TERV – ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kutatás során a kötőanyag keverékekhez CEM I 42,5 N-SR0 szulfátálló portlandcementet, valamint többféle adagolásban különféle cementkiegészítő anyagokat használtunk fel (1. táblázat). A referencia mintában (R0) a kötőanyag kizárólag CEM I 42,5 N-SR0 cement volt.

1. táblázat *Cement és cementkiegészítő anyagok megoszlása az egyes receptúrákban*

keverék	CEM I, m%	MK1, m%	MK2, m%	SF, m%	MS, m%
R0	100%	0	0	0	0
111	90%	10%	0	0	0
112	83%	17%	0	0	0
113	95%	0	0	5%	0
114	90%	7%	0	3%	0
121	90%	0	10%	0	0
122	83%	0	17%	0	0
123	90%	0	7%	3%	0
131	95%	0	0	0	5%
132	90%	0	0	0	10%
133	83%	0	0	0	17%
134	90%	0	0	3%	7%

A habarcs receptúrákban az 1. táblázatban található cement és kiegészítőanyag adagolásokat alkalmaztuk, az adalékanyagváz, valamint a víz-kötőanyag tényező (w/b) azonos volt. A 2. táblázatban a 111-es kötőanyag keverékű habarcs receptúráját mutatjuk be. Az azonos konzisztencia beállítását folyósítószer adagolásával értük el.

Vizsgáltuk a keverékek hajlító-húzó- és nyomószilárdságát, ezáltal meg tudtuk határozni az egyes minták szilárdsági értékeinek változását a vizsgálati időtartamban. A megszilárdult minták esetében a legfontosabb vizsgálatok közé tartozik a kloridionokkal szembeni ellenálló képesség vizsgálata, amely szorosan összefügg a porozitás eloszlás változásával. A kloridionokkal szembeni ellenálló képesség vizsgálatát gyors elektromos migrációs módszerrel végeztük [1], a porozitás változásának követése a kutatás során higanyintrúziós porozimetriával történt. A kémiai ellenálló képességet, azaz savkorróziót az NVKP\_16 kutatás során fejlesztett prototípus berendezésekkel vizsgáltuk [2], [3]. A savkorróziós vizsgálatokat ecetsavas, valamint kénsavas közegben végeztük el, majd a vizsgálatokat követően a behatolási frontokat mikroszkópos módszerrel tanulmányoztuk (optikai vagy pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálattal).

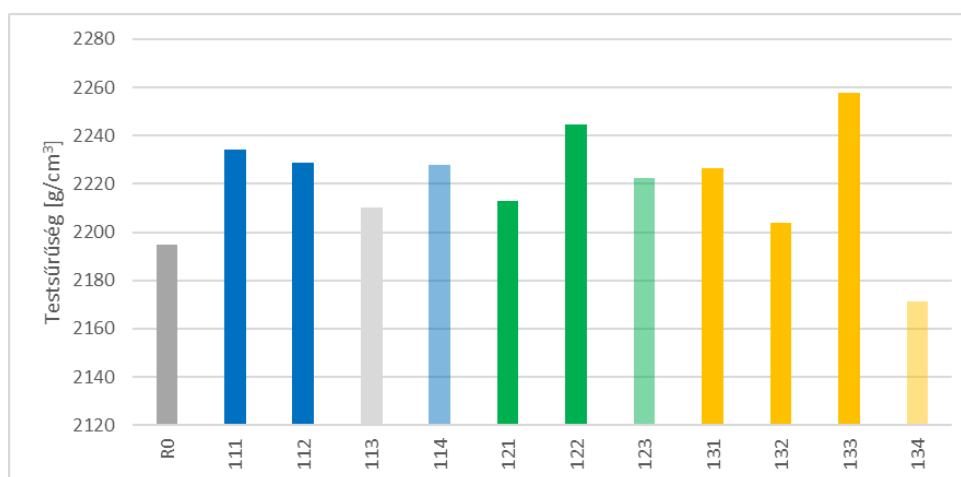
2. táblázat A 111-es kötőanyag keverékű habarcs receptúrája

Anyag	Típus	Tömeg [kg/m <sup>3</sup> ]	Tömeg/keverék [kg/16 l]
Cement	CEM I 42,5 N-SR0	468	7,65
Kieg. anyag	Centrilit NC (10 %)	52	0,85
Homok	1/2	653	10,67
	0,2/1	686	11,21
	0,08/0,25 (F36)	294	4,80
Víz	w/b=0,4	208	3,40

## 3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

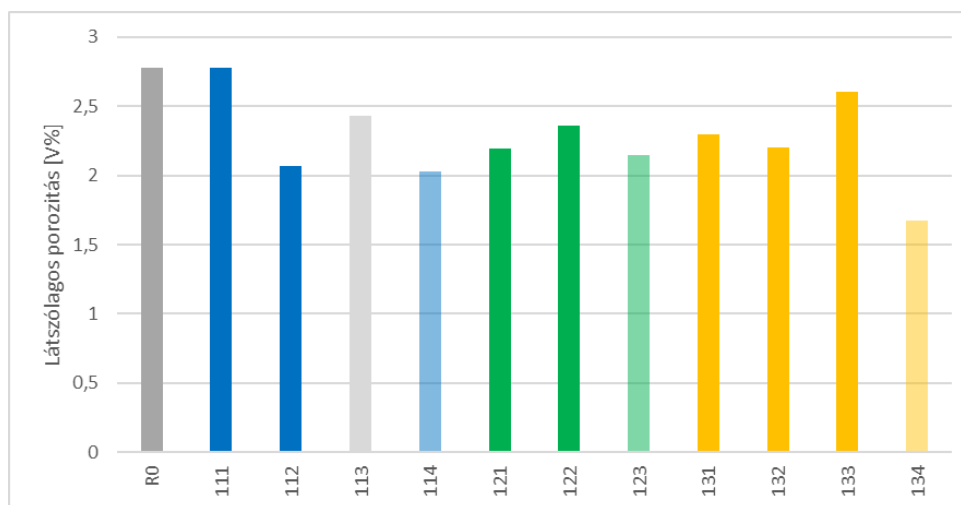
Az 1-2. ábrán a habarcs próbatestek egy éves kori testsűrűség, valamint látszólagos porozitás értékei láthatók (ez utóbbit a teljes elmerítéses vízfelvételi vizsgálat eredményeiből számoltuk ki).

A kiegészítőanyag adagolás és a testsűrűség, illetve látszólagos porozitás értékek között nem állapítható meg szoros összefüggés, azonban a szilikapor hatásáról elmondható, hogy minden olyan habarcsban csökkentette a habarcs látszólagos porozitását (114, 123, 134 keverékek), amelyben szilikaport a cementtel és az alkalmazott kiegészítő anyaggal kombinálva, hármas kötőanyag keverékben alkalmaztuk.



1. ábra. A habarcs próbatetek testsűrűsége egy éves korban

Vizsgáltuk a kapilláris vízfelvétel mértékét is. Egy éves korra minden keverék kapilláris vízfelvétele kisebb lett, mint az R0 referencia próbateté. A kapilláris vízfelvétel esetében a látszólagos porozitásnál leírtak igazolódtak: minden egyes kiegészítő anyag esetében akkor értük el a legkedvezőbb esetet, ha a kiegészítőanyagot szilikapor szuszpenzióval együttesen alkalmaztuk, tehát úgynevezett hármas kötőanyag (ternary blended) keverékkel készült a minta (114, 123, 134 keverékek). Elmondhatjuk, hogy a kapilláris vízfelvétel esetében, míg az MK1 esetén a nagyobb mennyiségű kiegészítő anyag alkalmazása (112) adta a jobb eredményt (tehát csökkent a kapilláris vízfelvételt), addig az MK2-nél és MS-nél a 10 m%-os adagolás a kedvezőbb (121, 132).

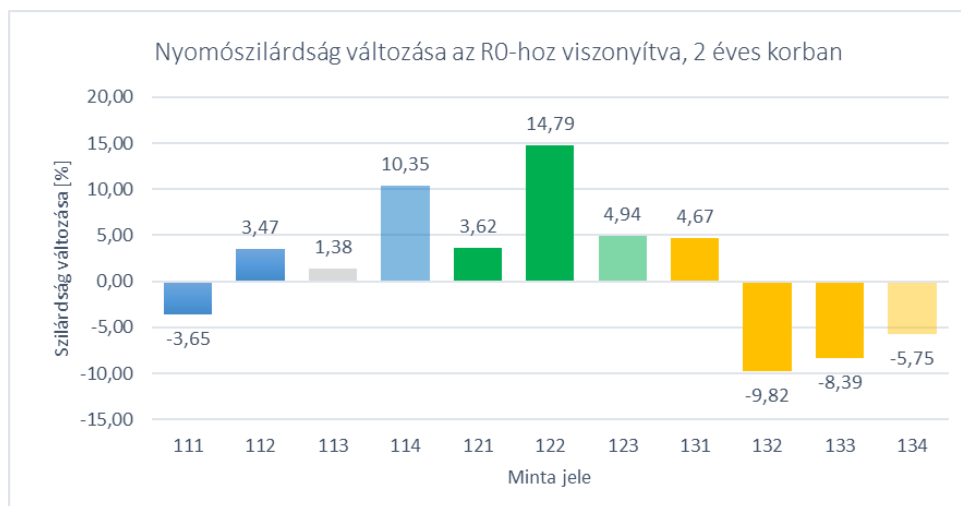


2. ábra. A habarcs próbatetek látszólagos porozitása egy éves korban

A nyomószilárdság vizsgálatának eredményeiből megállapítható, hogy két éves korra a legtöbb minta nyomószilárdsága nagyobb, mint az R0 referencia habarcs nyomószilárdsága. Kivételt képeznek a 111-es, valamint egyes MS (szűrt köszénpernye) kiegészítőanyag tartalmú próbatetek. Ezek esetében 4-10%-kal kisebb értékeket kaptunk (3. ábra).

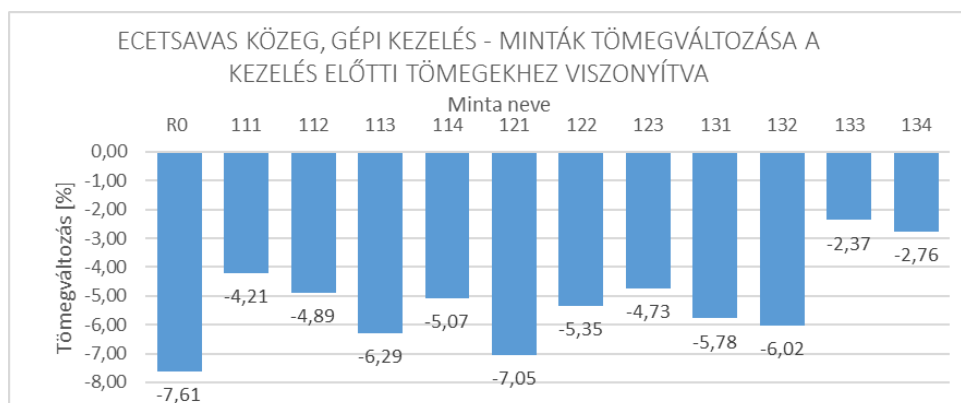
A habarcs hasábokon egy éves korukban végeztünk gépi (dinamikus) savkorróziós vizsgálatokat, amely 8 héten át tartott. A 28 napos kortól eltérő (pl. 56 napos vagy egy éves) korban elvégzett kísérletekkel ki lehet küszöbölni azt a hatást, hogy a 28 napos korban megkezdett kísérletek esetében a puccolános reakció még nem fejti ki pozitív hatását, amely többek között az ellenálló képesség javulásában is megnyilvánulhat.

A 4. ábrán látható az ecetsavas közeggel (pH=3,5) végzett 8 hetes gépi kezelés végéig bekövetkező tömegváltozás. Emellett a hetente végzett tömegmérésekkel a leromlási folyamatok eltérő dinamikáját is meg lehet figyelni, pl. a 111 és 112 minták a kezelés első két hetében mutattak intenzívebb leromlást, míg a 113, 123, 131, 132 és R0 minták leromlása a 4. hét után gyorsul fel. A 121 minta savkorróziója a 6. héten gyorsult fel. A 133 és 134 minták leromlási folyamata egyenletes sebességgel és a többi mintáétól jelentősen lassabban ment végbe.



3. ábra. A habarcs keverékek nyomószilárdságának alakulása az R0 habarcséhoz viszonyítva, 2 éves kori eredmények

Az ecetsavas kezelést követően a próbatestek tömege 2-10% tömegvesztést mutatott. Az ecetsav úgynevezett oldódós korróziót okoz, mivel a keletkező reakciótermék, a kalcium-acetát ( $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ) a vizes közegben jó oldhatósággal rendelkezik [4]. A legnagyobb veszteséget a referencia (R0) minta mutatta, így ehhez a mintához képest minden további keverék jobban teljesített. Az ecetsavas közegben bekövetkezett legnagyobb tömegváltozást a 121, a legkisebbet a 133 keverék szenvedte el (4. ábra).



4. ábra. A kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása az egyes keverékek ecetsavas kezelést megelőző tömegeihez viszonyítva

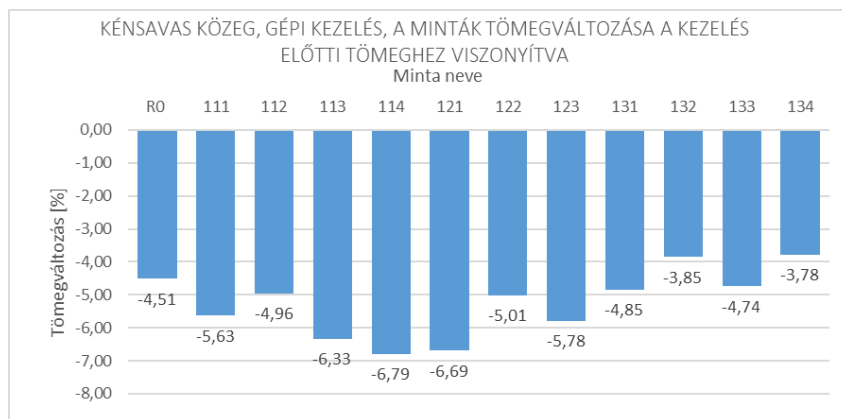
A kénsavas ( $\text{pH}=3,5$ ) kezelés hatására az első két hétben többnyire tömegnövekedés volt tapasztalható, ami a rosszul oldódó gipsz ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) keletkezésével hozható összefüggésbe. A legnagyobb tömegnövekedést az R0 referencia mintán mértük a 2. hétig, majd ezt követően az R0 leromlási folyamata közel lineáris módon zajlik. Az MK1 tartalmú minták mindegyike (111, 112, 114) jelentősebb tömegvesztést szenvedett, mint az R0 minta. Az MK2 kisebb, 10 m%-os adagolása (121) esetén a kénsavas kezelés a 8. hét végére lényegesen nagyobb tömegvesztést okozott, mint az R0 esetében. Az MK2 további (122: 17% MK2 és 123: 7% MK2/3% SF) keverékei a 6. hét után mutattak romlást az R0 mintával összehasonlítva. Az MS keverékek közül a 132 (10% MS) és a 134 (7% MS/3% SF) ellenálló képessége jobb, mint az összes többi vizsgált habarcsé (5. ábrák).

A vasbeton szerkezetekben a kémiai ellenállóképesség vizsgálatán túl szükséges a kloridionok behatolásával szembeni ellenállóképesség megismerésére is, amely a környezeti körülmények függvényében befolyásolhatja a betonfedés vastagságát. Ezért a vizsgált habarcsok további fontos jellemzőjét is vizsgáltuk, a kloridion migrációs koefficienseket (non-steady-state migration coefficient,  $D_{\text{nssm}}$ ).

Az egy éves korú habarcs keverékeken meghatározott migrációs koefficiensek és a higanyos porozimetriával meghatározott fajlagos felülete közötti összefüggések a 6. ábrán láthatók.

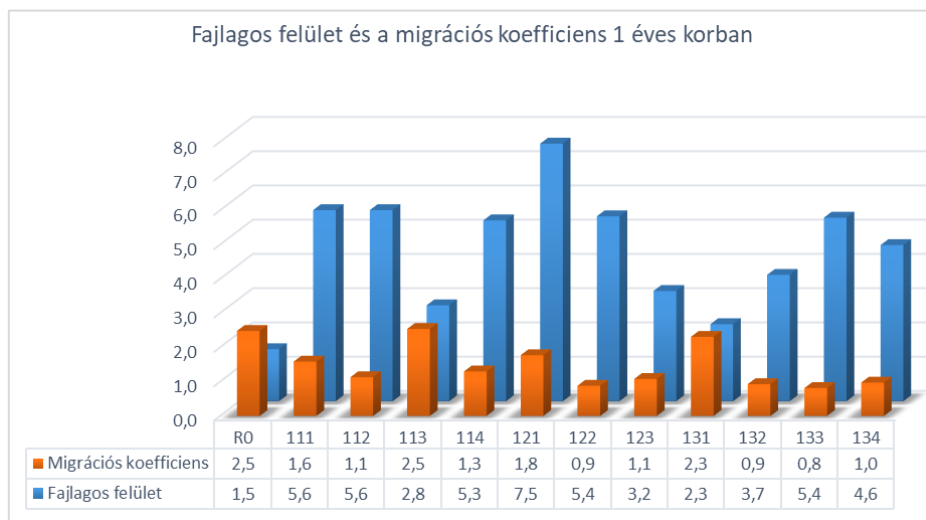
Log-log ábrázolásban a kor – migrációs koefficiens vizsgálati eredményekre illesztett egyenesek egyenletében a negatív kitevő, az ún. kor- vagy öregedési tényező,  $\alpha$  (ageing factor). A kortényező alapján

sorba rendezhettük a vizsgált kötőanyag keverékekből készült habarcsok kloridionok behatolásával szembeni ellenállóképességét. Minél nagyobb a környező értéke, annál nagyobb mértékű javulását (csökkenését) várhatjuk a migrációs (vagy diffúziós vizsgálat esetén a diffúziós) koefficiensnek. A környező alapján a kloridion migrációs tényező javításában legjobbnak mutatózó keverékek sorrendje (a legkedvezőbbtől a kevésbé jó környezővel rendelkező kötőanyagok irányában): 17% MS (133) > 17% MK2 (122) > 10% MS (132) > 10% MK2 (121) > 7% MS/3% SF (123). Vizsgálati eredményeink feldolgozása összhangban van a JWG tartóssági szakvéleményében (2014) [5] megfogalmazott módszerrel.



5. ábra. A kiegészítő anyag tartalmú habarcsok tömegváltozása az egyes keverékek kénsavas kezelést megelőző tömegeihez viszonyítva

Vizsgálati eredményeink is alátámasztják azt a megállapítást, hogy a kloridion migrációs vagy diffúziós koefficiens idővel javuló tendenciát mutatnak, azaz csökkennek. A csökkenés mértéke alapján lehet az egyes kötőanyag keverékeket a várható környezeti körülményeknek megfelelően kiválasztani a vasbeton szerkezetek tervezett élettartamához.



6. ábra. A habarcs keverékeken meghatározott kloridion migrációs koefficiens és a higanyos porozimetriával meghatározott fajlagos felületük közötti összefüggések, 1 éves korban mérve

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatási feladatunk során különböző cementkiegészítő anyagok hosszútávú hatását vizsgáltuk a cementkötésű anyagok teljesítőképességére nézve. 12-féle kötőanyag keveréken vizsgáltuk a cementkiegészítőanyagok hatását agresszív kémiai közegben, ecet- és kénsavas (pH=3,5) közegben. A gépi savkorróziós vizsgálathoz habarcs próbatesteket gyártottunk. A kloridion migrációs vizsgálatot szintén habarcs

próbatesten végeztük el több korban, két éves korig; ezáltal lehetőségünk nyílt az egyes kiegészítőanyagok környezőre kifejtett hatását is tanulmányozni.

Az egy éves kori porozimetriai jellemzők alapján megállapítottuk, hogy a cement kiegészítő anyagok adagolása a habarcsok esetében is többnyire finomítja a leggyakoribb pórusátmérő tartományt (111, 112, 113, 114, 121 és 132), a tartománynak mind a felső, mind az alsó értékét a kisebb pórusátmérők irányába tolja. Ugyanakkor az összporozitás nem minden kiegészítőanyag fajta és adagolás mellett csökken, pl. a 111, 122, 133 és 134 esetében az összporozitás értéke nagyobb, mint az R0 referencia esetében mért érték.

Két éves korra a legtöbb minta nyomószilárdsága nagyobb, mint az R0 referencia habarcs nyomószilárdsága. Kivételt képeznek a 111-es és egyes MS (szűrt köszénpernye) kiegészítőanyag tartalmú próbatestek; ezek esetében 4-10%-kal kisebb eredményeket kaptunk.

A különböző korú és kiegészítőanyag tartalmú habarcsok pH értékei a hidratáció előrehaladtával nem változtak jelentősen: a pH értéket sem a puccolános reakció, sem az esetlegesen bekövetkezett karbonátosodás nem csökkentette figyelemre méltóan. Minden egyes minta pH értéke 12,3 és 12,7 közé esett, ami megfelel a betontól a tartós vasbeton szerkezetekben elvárható lúgosságnak.

Az ecetsavas közeggel végzett gépi vizsgálat során bekövetkező változások alapján a leromlási folyamatok eltérő dinamikáját figyeltük meg, pl. a 111 és 112 minták a kezelés első két hetében mutattak intenzívebb leromlást, míg a 113, 123, 131, 132 és R0 minták leromlása a 4. hét után gyorsul fel. A 121 minta savkorróziója a 6. héten gyorsult fel, míg a 133 és 134 minták leromlási folyamata egyenletes sebességgel és a többi mintáétól jelentősen lassabban ment végbe. Az ecetsavas kezelést követően a próbatestek tömege 2-10% tömegvesztéséget mutatott. A nyolc hetes savkorróziós vizsgálat végére a legnagyobb tömegvesztéséget a referencia (R0) minta mutatta, így ehhez a mintához képest minden további keverék jobban teljesített. Az R0 minta mellett a legnagyobb tömegváltozást a 121 minta szenvedte el, míg a legkisebb tömegváltozást a 133 keverék esetében figyeltük meg.

A kénsavas közegben az első két hétben többnyire tömegnövekedés volt tapasztalható. A legnagyobb tömegnövekedést az R0 referencia mintán mértük a 2. hétig, majd ezt követően az R0 leromlási folyamata közel lineáris módon zajlik. Minden MK1 tartalmú minta kénsavas kezelése jelentősebb tömegvesztéséget okozott, mint az R0 minta esetében. Az MK2 kisebb, 10%-os adagolása (121) esetén a kénsavas kezelés a 8. hét végére lényegesen nagyobb tömegvesztéséget okozott, mint az R0 esetében mért. Az MK2 további (122: 17% MK2 és 123: 7% MK2/3% SF) keverékei a 6. hét után mutattak romlást az R0 habarccsal összehasonlítva. Az MS keverékek közül a 132 (10% MS) és a 134 (7% MS/3% SF) ellenállóképessége jobb, mint az összes többi vizsgált habarcsé.

A két éves korig elvégzett kloridion migrációs vizsgálatok eredményei alapján megállapítottuk a vizsgált kiegészítőanyag típusok és adagolások hatását a környezőre. A környező nagysága alapján, a kloridion migrációs tényező javításában (csökkentésében) legjobbnak mutatkozó keverékek sorrendje: 17% MS (133) > 17% MK2 (122) > 10% MS (132) > 10% MK2 (121) > 7% MS/3% SF (123).

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak az NVKP\_16-1-2016-0019 “Fokozott ellenállóképességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] MSZ EN 12390-18:2021. *A megszilárdult beton vizsgálata. 18. rész: Kloridmigrációs együthartható meghatározása*
- [2] Kopecskó, K., Balázs, L. Gy., Péczeli, I. *Protocol for testing the acid corrosion of concrete or reinforced concrete elements with nozzle acid-corrosion equipment*, önkéntes műnyilvántartásba véve 009226 számon, Benyújtás országa: Magyarország (2020)
- [3] Kopecskó, K., Balázs, L. Gy., Péczeli, I. *Vizsgálati protokoll beton ill. vasbeton elemek kémiai ellenállóképességének vizsgálatára forgógépes módszerrel*, önkéntes műnyilvántartásba véve 009227 számon, Benyújtás országa: Magyarország (2020)
- [4] Balázs L. Gy., Kausay T., Kopecskó K., Nemes R., Nehme S. G., Lublós É., Józsa Zs., Arany P., „Betonok oldódásos korróziója – szakirodalmi áttekintés”, DOI: 10.32969/VB.2019.3.1 (2019)
- [5] JWG Durability Report 2014: *Durability. Exposure Resistance Classes, a new system to specify durability in EN 206 and EN 1992*. JWG 250/104 - N25 (2014). p. 27.