

## 3D nyomtatható beton fejlesztése helyi alapanyagokkal: reológiai tulajdonságok szerepe

### Development of 3D printable concrete with local materials: the role of rheological properties

*SZIJÁRTÓ Anna<sup>1</sup> tudományos segédmunkatárs, Dr. NEHME Salem<sup>1</sup> egyetemi docens, tanszékvezető,  
Dr. BALÁZS L. György<sup>1</sup> egyetemi tanár, Dr. SÓLYOM Sándor<sup>1</sup> egyetemi docens*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3, titkars@eik.bme.hu

#### Abstract

*3D concrete printing (3DCP) offers significant potential to reduce material consumption, formwork demand, and labor intensity in construction. Its practical implementation, however, requires cementitious mixtures with carefully tailored rheological properties ensuring adequate extrudability, buildability, and early-age stability. In this study, nine cement-based mixtures composed exclusively of locally available raw materials were developed and experimentally evaluated. Reference printable mixtures were used to define target criteria, and the developed mixtures were assessed in fresh and hardened states. Based on the results, a mixture containing approximately 600 kg/m<sup>3</sup> cement and an optimized particle size distribution ( $D_{max} = 1,2$  mm) demonstrated stable extrusion, sufficient buildability without formwork, and mechanical performance comparable to the reference material under laboratory-scale 3D printing conditions. The results confirm that locally sourced materials can provide a viable alternative to commercial pre-mixed 3D printable concretes.*

**Keywords:** 3DCP, printable concrete, mix design, rheology, buildability

#### Kivonat

*A 3D betonnyomtatás (3DCP) az építőipar egyik innovatív technológiája, amely lehetőséget teremt az anyagfelhasználás, a zsaluzási igény és az élőmunka csökkentésére. A technológia gyakorlati alkalmazhatóságának egyik kulcskérdése a megfelelő reológiai tulajdonságokkal rendelkező betonkeverékek fejlesztése, amelyek biztosítják az extrudálhatóságot, az építhetőséget és a korai szerkezeti stabilitást. Jelen kutatás célja kizárólag hazai, helyben beszerezhető alapanyagok felhasználásával olyan 3D nyomtatásra alkalmas betonkeverék kidolgozása volt, amely teljesítményében összevethető a kereskedelmi forgalomban elérhető referenciaanyagokkal. A vizsgálatok során referencia keverékek alapján határoztuk meg a nyomtathatóság szempontjából releváns kritériumértékeket, majd kilenc saját fejlesztésű keveréket vizsgáltunk friss és megszilárdult állapotban. Az eredmények alapján egy 600 kg/m<sup>3</sup> cementtartalmú, optimalizált szemeloszlású keverék megfelelő extrudálhatóságot, zsaluzat nélküli építhetőséget és megfelelő korai szilárdságot mutatott laboratóriumi 3D nyomtatási körülmények között. A kutatás igazolja, hogy helyi alapanyagokra épülő betonkeverékekkel a 3D betonnyomtatás hazai alkalmazása műszakilag megvalósítható.*

**Kulcsszavak:** 3D betonnyomtatás, mix design, reológia, extrudálhatóság, helyi alapanyagok

## 1. BEVEZETÉS

A beton a modern építőipar egyik legnagyobb mennyiségben alkalmazott anyaga, ugyanakkor előállítása és beépítése jelentős környezeti és gazdasági terhekkel jár. A 21. századra egyre nyilvánvalóbbá vált, hogy a környezetvédelmi szempontoknak be kell kerülniük a mindennapi döntéshozatalba, különösen az építőiparban, ahol a cementgyártás a globális CO<sub>2</sub>-kibocsátás jelentős részéért, megközelítőleg 6-8%-áért felelős (Scrivener et al., 2018; Miller et al., 2018).

A klinkergyártás magas hőmérsékletigénye (~1450 °C), valamint az adalékanyagok kitermelése további jelentős környezeti terhelést okoz (Andrew, 2018; Scrivener et al., 2018). A hagyományos monolit szerkezeteknél a zsaluzat előállítása, szállítása, szerelése és bontása jelentős anyag- és munkaerőigényű, emellett a kivitelezési folyamat során frissbetonvesztés, hibás bedolgozásból eredő többletanyag felhasználás és utólagos javítási igény is jelentkezhet. A 3D betonnyomtatás az építőipari digitalizáció egyik korszerű iránya, amely lehetőséget kínál az anyagfelhasználás, a zsaluzási igény és az élőmunka csökkentésére, valamint optimalizált szerkezeti formák kialakítására (Buswell et al., 2018; Ma et al., 2018).

A 3D nyomtathatóság szempontjából a legnagyobb kihívást az egymással részben ellentétes frissbeton-követelmények összehangolása adja. A keveréknek a szállító- és nyomtatórendszerben kellően mozgékonyak kell lennie, ugyanakkor a fűvókából kilépve azonnal alak- és rétegtartónak kell maradnia. Ezért a hagyományos betonvizsgálatok önmagukban nem elegendők; a technológia gyakorlati alkalmazhatóságának egyik legfontosabb feltétele olyan keverék fejlesztése, amely egyszerre szivattyúzható, extrudálható, rétegenként építhető, valamint elegendő korai szilárdsággal rendelkezik (Buswell et al., 2018; Nerella et al., 2019; Zhang et al., 2021).

A szakirodalom szerint e tulajdonságok egyensúlyát elsősorban a cementtartalom, a maximális szemmagyság, a finomrész-tartalom és az alkalmazott kiegészítő anyagok határozzák meg, ezért a keveréktervezés során ezek összehangolt optimalizálása kulcsfontosságú (Nerella et al., 2019; Zhang et al., 2021). Jelen kutatás célja hazai, helyben beszerezhető alapanyagokból olyan 3D nyomtatható betonkeverék előállítását volt, amely alternatívát jelenthet a jelenleg használt, külföldről beszerezett, előkevert zsákos anyagokkal – például a Sikacrete-751 3D-vel – szemben, korábbi laboratóriumi fejlesztések tapasztalataira építve (Drávecz, 2023).

## 2. KÍSÉRLETI ANYAGOK ÉS MÓDSZERTAN

A kutatás során két különböző betonösszetétel (S145 és S150) került alkalmazásra referenciaként a nyomtathatóság szempontjából releváns tulajdonságok kritériumértékeinek meghatározásához, hiszen ezen keverékek előző kutatások alapján nyomtathatónak bizonyultak. Az S145-ös keverék a kereskedelmi forgalomban elérhető Sikacrete-751 3D előkevert anyagot jelöli, amelynek víz-száranyag aránya 0,145, míg az S150 esetében ez az érték 0,150. A vizsgálat során kilenc, helyben beszerezhető alapanyagokból összeállított betonkeverék került kifejlesztésre iteratív módon, a cél a meghatározott kritériumértékek megközelítése volt. Az alkalmazott keverékterveket az 1. táblázat foglalja össze.

A kutatás során alkalmazott kötőanyag minden esetben CEM I 52,5 N portlandcement volt. A 2 mm maximális szemmagyságú ( $D_{max}$ ) adalékanyag alkalmazását a rendelkezésre álló extruder geometriai korlátai indokolták. A keverékekben három kiegészítőanyag alkalmazása történt: szilikapor, metakaolin és mészkőliszt. Ezek egyrészt javítják a szemcseszerkezeti illeszkedést és növelik a péptartalmat, másrészt a szilikapor és a metakaolin puccolános aktivitása révén hozzájárulhatnak a szilárdságfejlődéshez. A mészkőliszt inert finom szemcsés anyagként elsősorban a frissbeton konzisztenciáját és alakmegtartását befolyásolja. A keverékek fejlesztése során a cementtartalom, a maximális szemmagyság ( $D_{max}$ ), valamint az adalékanyag frakciók %-os eloszlása került változtatásra. Szilikaporból minden esetben a cement mennyiségére vonatkoztatott 5%, a metakaolinból pedig a 10% került alkalmazásra. A frissbeton tulajdonságainak szabályozása céljából a folyósítószer és a kötőgyorsító adagolása szintén változó volt. Az alkalmazott keverékek összetételét az 1. táblázat foglalja össze.

A keverékek kialakítása során MasterBuilders Glenium 300 típusú folyósítószer került alkalmazásra a megfelelő bedolgozhatóság és extrudálhatóság biztosítása érdekében, Sika Control 60 zsugorodáscsökkentő adalékszer a repedésképződés mérséklésére, valamint Sika Sigunit L-5602 AF lúgmentes kötőgyorsító a korai szilárdságfejlődés és az építhetőség javítása céljából. A frissbeton vizsgálatok kiterjedtek a kötési idő, a terülés, a zöldszilárdság és az extrudálhatóság meghatározására.

A megszilárdult állapot jellemzésére hajlító-húzószilárdsági, valamint nyomószilárdsági vizsgálatokat végeztünk. A legkedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező keverék gyakorlati validálása 3D nyomtatással történt, laboratóriumi körülmények között.

Beton összetételek (kg 1 m<sup>3</sup>-re viszonyítva)

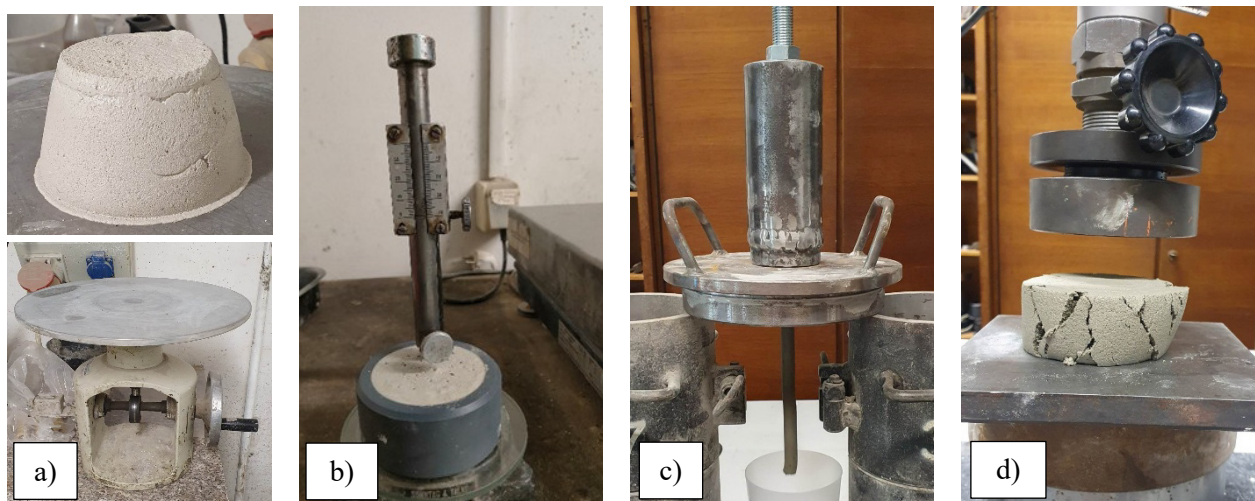
1. táblázat

Jelölés	C	Víz	0,2-0,6 mm	0,8-1,2 mm	1,0-2,0 mm	SZ	MK	ML	Glenium 300	Control 60	Sigunit L - 5602 AF
550-D1,2-ML200	550	275	517	517	-	27,5	55	200	1,7	8,3	27,5
500-D1,2-ML175	500	250	590	590	-	25,0	50	175	3,3	7,5	25,0
550-D2-ML200	550	275	344	344	344	27,5	55	200	1,7	8,3	27,5
500-D2-ML200	500	250	386	386	386	25,0	50	200	2,0	7,5	25,0
550-D2-ML200-2	550	275	205	410	410	27,5	55	200	5,0	8,3	27,5
600-D2-ML200	600	300	301	301	301	30,0	60	200	3,3	9,0	30,0
600-D1,2-ML200	600	300	449	449	-	30,0	60	200	5,1	9,0	30,0
650-D2-ML200	650	325	259	259	259	32,5	65	200	2,9	9,8	32,5
650-D1,2-ML200	650	325	391	391	-	32,5	65	200	2,0	9,8	32,5

\*C: cement, SZ: szilikapor, MK: metakaolin, ML: mészkőliszt

## 2.1. Terülés mérés

A frissbeton konzisztenciájának és folyóképességének jellemzése terülés méréssel történt, az 1.a ábra mutatja a vizsgálati elrendezést (MSZ EN 1015-3:2000). A vizsgálat egyben információt nyújt a keverék bedolgozhatóságáról és extrudálhatóságáról is. A mérés során a friss betonkeverék egy csonkakúp alakú sablonba (magasság: 60 mm, felső átmérő: 70 mm, alsó átmérő: 100 mm) került betöltésre egy terülőasztalon, majd a minta két rétegben, rétegenként 10 csömöszöléssel került tömörítésre. A sablon eltávolítását követően a minta 15 alkalommal, másodpercenként egy ütessel került terítésre. A konzisztencia vizsgálat során a beton terülése két egymásra merőleges irányban került meghatározásra, majd az értékek átlaga lett figyelembe véve. A 3D betonnyomatás szempontjából a terülési érték optimalizálása kulcsfontosságú: a túl nagy terülés az alakmegtartó képesség csökkenéséhez vezet, míg a túl alacsony érték a szivattyúzhatóságot és az extrudálhatóságot befolyásolja kedvezőtlenül.



1. ábra

*a: terülés; b: kötési idő; c: extrudálhatóság; d: zöldszilárdság mérés*

## 2.2. Kötési idő vizsgálat

A kötési idő meghatározása a frissbeton bedolgozhatósági időablakának jellemzésére szolgált. A vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy a keverék mennyi ideig marad megfelelően szivattyúzható és extrudálható állapotban, illetve mikor kezdődik meg a kötési folyamat. A 3D nyomtatás során kulcsfontosságú az optimális kötési idő, amely biztosítja a rétegek közötti megfelelő egyttedolgozást és az építhetőséget. A vizsgálat során egy szabványos Vicat-készüléket használtunk (1.b ábra), 10 percenként történő méréssel.

## 2.3. Extrudálhatóság vizsgálat

Az extrudálhatóság vizsgálatához egy speciálisan kialakított, 54,5 mm belső átmérőjű és 130 mm magas acélhenger lett alkalmazva, amelynek alsó részén a 3D nyomtatófej geometriájával megegyező, 23 mm hosszúságú, 12 mm kilépő átmérőjű csonkakúp alakú szűkítőelem került kialakításra (1.c ábra). A henger felső részéhez csatlakoztatott menetes szár végén elhelyezett, a henger belső átmérőjével azonos acél lap függőleges mozgatása biztosította az extrudáláshoz szükséges nyomóerőt, miközben a frissbeton az alsó nyíláson keresztül távozott. A berendezés a terhelés során folyamatosan rögzítette a nyomóerőt és az elmozdulást, amelyeket diagram formájában kiértékelésre kerültek. A vizsgálat során 50 N terhelési szintig 100 mm/perc keresztfej-elmozdulási sebességgel történő előterhelést alkalmaztunk, amelyet ezt követően 80 mm/perc állandó keresztfej-sebességgel végzett terhelési szakasz követett 110 mm elmozdulás eléréséig. A mérések a keverék készítésétől (víz hozzáadását követő) 10 és 30 perces korban kerültek elvégzésre, lehetővé téve a keverékek időfüggő viselkedésének vizsgálatát.

## 2.4. Zöldszilárdság vizsgálat

A zöldszilárdság vizsgálata a frissbeton építhetőségének jellemzésére szolgált, amely a 3D betonnyomatás egyik kulcsfontosságú paramétere. A mérés egyirányú nyomóvizsgálat formájában került elvégzésre. A vizsgálat során a keverék 60 mm átmérőjű és 60 mm magas hengeres sablonba került beöntésre, majd a forma eltávolítását követően a próbatest állandó alakváltozás mellett, növekvő terhelés hatására került összenyomásra, modellezve a nyomtatás során egymásra helyezett rétegek terhelési viszonyait (1.d ábra). A

vizsgálat során 4 N-ig 5 mm/perces előterhelés, majd 15 mm/perc terhelési sebesség került alkalmazásra 25 mm összenyomódás eléréséig. A vizsgálatok a víz hozzáadását követő 10 és 30 perces korban kerültek elvégzésre, időpontként két próbatest felhasználásával, lehetővé téve a keverékek időfüggő viselkedésének értékelését.

### 2.5. Hajlító-húzószilárdság vizsgálat

A megszilárdult beton mechanikai jellemzésére hajlító-húzószilárdsági vizsgálatot alkalmaztunk 40×40×160 mm méretű hasáb próbatesteken. A mérések különböző időpontokban, 2, 7 és 28 napos korban kerültek elvégzésre, lehetővé téve a szilárdságfejlődés időbeli alakulásának nyomon követését és az egyes keverékek összehasonlító értékelését. A terhelés középpontosan történt, a fesztáv 100 mm, a terhelési sebesség 0,05 kN/s volt.

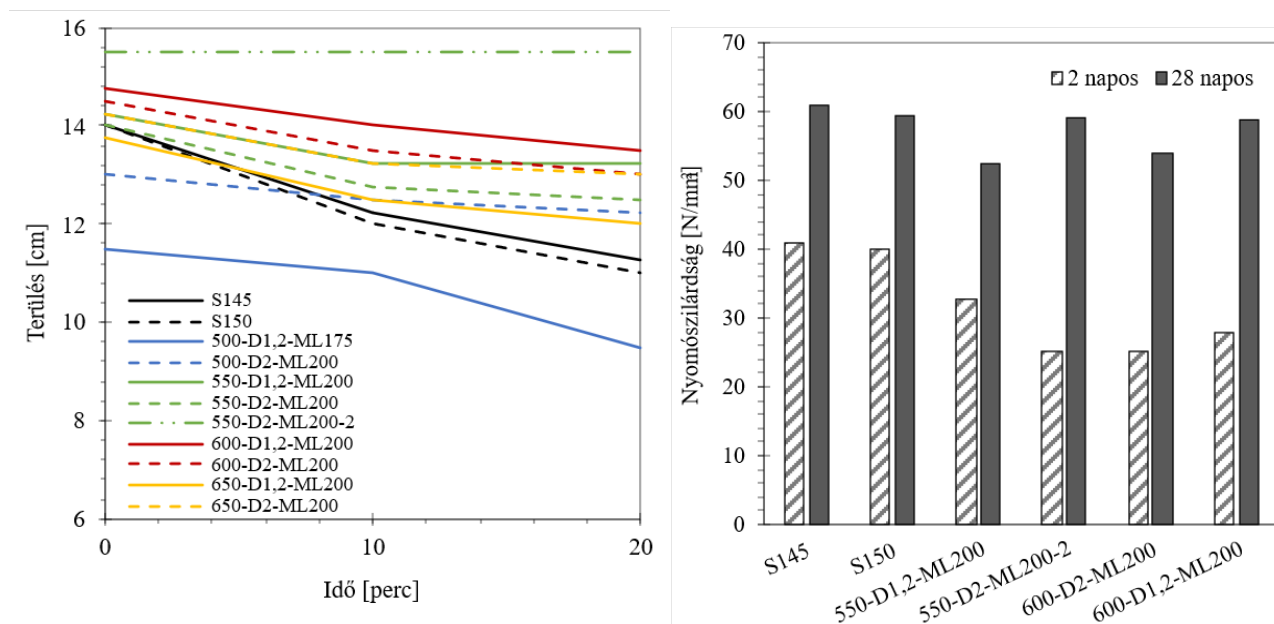
### 2.6. Nyomószilárdság vizsgálat

A nyomószilárdság vizsgálat a hajlító-húzószilárdsági mérés során keletkezett félpróbatesteken történt, az ép szétlől 10 mm-re elhelyezett 40 × 40 mm méretű acél terhelőlapokkal. A terhelési sebesség 2,4 kN/s volt.

## 3. EREDMÉNYEK

A területmérés eredményeit a 2. ábra bal képe mutatja. A különböző korokban kapott eredmény a keverék eltarthatóságát jellemzi. A referencia keverékek (S145, S150) mozgékonyasága idővel csökken, mely nem előnyös 3D nyomtatás szempontjából. A módosított receptúrák esetén törekedtünk az eltarthatóság növelésére. A cementtartalom növelése az 1-5. keverékek alapján szükségesnek bizonyult, ám a 650 kg/m<sup>3</sup> cementtartalmú keverékek kötés idejének vége kitolódott 3,5 órától 4,5 órára. Ez alapján az 500 és az 550 kg/m<sup>3</sup> kevésnek, a 650 kg/m<sup>3</sup> pedig túl soknak bizonyult, így a 600 kg/m<sup>3</sup> cementtartalmú változat tűnt megfelelőnek a sikeres nyomtatáshoz.

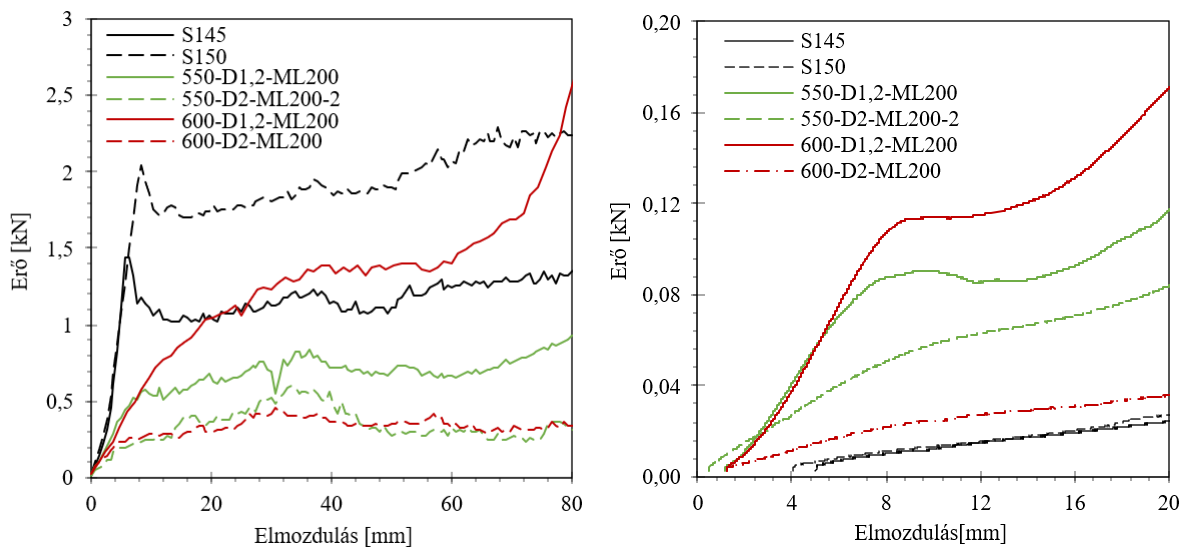
A területmérés és a kötési idő eredményei alapján a legígéretesebb 4 db receptúrával folytattuk a további vizsgálatokat, ezek az 550-D1,2-ML200, az 550-D2-ML200-2, a 600-D2-ML200 és a 600-D1,2-ML200 keverékek voltak. A nyomószilárdság vizsgálat eredményeit 2 és 28 napos korban a 2. ábra bal képe mutatja.



2.ábra

Bal: Területmérés, jobb: Nyomószilárdsági vizsgálat eredményei

A 3. ábra bal képe mutatja az extrudálhatóság vizsgálat eredményeit 30 perces korban. A referencia keverékek értékeinek reprodukálása volt a cél, így ez alapján a mérés alapján a 600-D1,2-ML200 jelű keverék tekinthető leginkább nyomtathatónak. Ezt megerősíti a 30 perces korban mért zöldszilárdság vizsgálat eredménye is (3. ábra jobb kép).

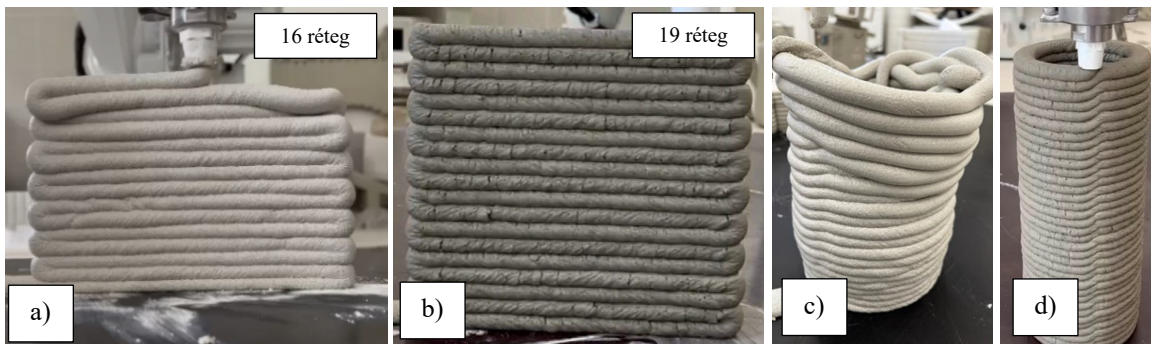


3. ábra

bal: Extrudálás vizsgálat, jobb: zöldszilárdság vizsgálat - 30 perces korokban

#### 4. 3D NYOMTATÁS

A frissbeton vizsgálatok alapján a 600-D1,2-ML200 jelű keverék került kiválasztásra 3D nyomtatáshoz, melyre a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumában került sor. A keverék nyomtathatónak bizonyult. Az állékonyság vizsgálatához az S145 jelű referencia és a kiválasztott, saját keverékből is egy 150 mm átmérőjű hengert, valamint egy 200 mm hosszú vonalas falelemet nyomtattunk. A kapott eredményeket és rétegszámokat a 4. ábra mutatja. A fejlesztett keverék mindkét vizsgálat esetén jobb eredményeket mutatott, mint a referencia keverék, ugyanakkor a felületen repedések jelentek meg, különösen a keveréstől számított idő előrehaladtával. Ez arra utal, hogy a keverék péptartalma és/vagy vízmegtartó képessége további fejlesztési igényt rejt magában.



4. ábra

a: S145 keverék, b: 600-D1,2-ML200 keverék nyomtatott faleleme; c: S145 keverék, d: 600-D1,2-ML200 keverék nyomtatott henger eleme

#### 5. KONKLÚZIÓK

A bemutatott kutatás célja helyi alapanyagok felhasználásával előállítható, 3D betonnyomtatásra alkalmas cementkötésű keverék kidolgozása volt. A referencia nyomtatható keverékek vizsgálata alapján meghatározott reológiai és mechanikai kritériumértékek megfelelő alapot biztosítottak a saját fejlesztésű receptúrák iteratív optimalizálásához.

A kísérleti eredmények egyértelműen igazolták, hogy a cementtartalom, a maximális szemnagyság és a szemeloszlás, valamint a finomadalékanyagok aránya kulcsszerepet játszik a frissbeton extrudálhatóságában és építhetőségében. A vizsgált keverékek közül a 600 kg/m<sup>3</sup> cementtartalmú,  $D_{max} = 2$  mm szemeloszlású receptúra mutatta a legkedvezőbb egyensúlyt a szivattyúzhatóság, az extrudálhatóság és a zsaluzat nélküli rétegfelépíthetőség között.

A laboratóriumi 3D nyomtatási validáció során a kiválasztott keverék nagyobb rétegszámot és jobb alakmegtartást biztosított, mint a referenciaanyag, ugyanakkor a nyomtatás előrehaladtával megjelenő repedések további keverékfejlesztési lehetőségekre – különösen a péptartalom és a vízmegtartó képesség optimalizálására – hívják fel a figyelmet.

Összességében a kutatás eredményei igazolják, hogy megfelelő keveréktervezéssel a 3D betonnyomtatás hazai alapanyagokra építve is megvalósítható, ami hosszú távon hozzájárulhat a technológia gazdaságosabb és fenntarthatóbb alkalmazásához.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Andrew, R. M. (2018). Global CO<sub>2</sub> emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- [2] Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- [3] Drávecz, B. (2023). 3D nyomtatáshoz alkalmazható keverék kutatása hazai alapanyagokból [BSc szakdolgozat, BME]
- [4] Ma, G., Wang, L., & Ju, Y. (2018). State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material - An emerging technique for construction. *Science China Technological Sciences*, 61, 475-495. <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>
- [5] Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>
- [6] Magyar Szabványügyi Testület. (2000). MSZ EN 1015-3:2000 – Falazóhabarcs vizsgálati módszerei. 3. rész: A friss habarcs konzisztenciájának meghatározása terítőasztallal. Budapest: MSZT
- [7] Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2019). Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete onsite 3D printing technology (CONPrint3D). In J. Sanjayan et al. (Eds.), *3D Concrete Printing Technology* (pp. 333-347). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6>
- [8] Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2-26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- [9] Zhang, C., Nerella, V. N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., & Banthia, N. (2021). Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104155. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104155>