



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

3B YAZICIYLA BASKILANMIŞ UÇUCU KÜL KATKILI HARÇLARIN RÖTRE ÖZELİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE SHRINKAGE PROPERTIES OF 3D PRINTED FLY ASH BLENDED MORTARS

Yazarlar (Authors): Tayfun Uygunoğlu^{ID*}, İlker Bekir Topçu^{ID}, Ömer Ergür^{ID}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Uygunoğlu T., Topçu İ. B., Ergür Ö., "3b Yazıcıyla Baskılanmış Uçucu Kül Katkılı Harçların Rötire Özelliklerinin Araştırılması" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 6(1): 143-148, (2022).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1068096

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

3B YAZICIYLA BASKILANMIŞ UÇUCU KÜL KATKILI HARÇLARIN RÖTRE ÖZELİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tayfun Uygunoğlu^a, İlker Bekir Topçu^b, Ömer Ergür^a

^aAfyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE
^bEskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: uygunoglu@aku.edu.tr

(Geliş/Received: 05.02.2022; Düzeltme/Revised: 30.03.2022; Kabul/Accepted: 29.04.2022)

ÖZ

Üç boyutlu (3B) baskı yazıcılar inşaat sektörüne yeni bir boyut kazandırmıştır. 3B baskılı harçlardaki sertleşmiş çimento hamurunun doğal kuruma büzülmesi çok yüksek çimento/ince agrega oranlarına sahip olmaları nedeniyle büzülme davranışı açısından büyük risk oluşturmaktadır. Bu çalışmada, mineral katkı içeren 3B baskı harçlarının yazdırıldıktan sonra zamana bağlı kuruma büzülme davranışları araştırılmıştır. Harçların bileşiminde mineral katkı olarak %0, %10 ve %20 oranlarında uçucu kül kullanılarak farklı harçlar tasarlanmıştır. Mineral katkı çimentoyla ağırlıkça yer değiştirme yöntemine göre kullanılmıştır. Harçlar 3B yazıcıda tek katman olarak baskılandıktan sonra laboratuvar ortamında 40 güne kadar boy değişimleri ölçülmüştür. Her bir ölçümün ilk boya oranına göre kuruma büzülme oranları belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre %20 oranında uçucu kül kullanımıyla kontrol harçların büzülme oranları %50 oranında azaltılmıştır.

Anahtar kelimeler: 3B baskı harç, Mineral katkı, Rötire.

INVESTIGATION OF THE SHRINKAGE PROPERTIES OF 3D PRINTED FLY ASH BLENDED MORTARS

ABSTRACT

Three-dimensional (3D) printers have brought a new dimension to the construction industry. The natural drying shrinkage of hardened cement paste in 3D-printed mortars poses a great risk in terms of shrinkage behavior due to their high cement/fine aggregate ratios. In this study, time-dependent drying shrinkage behavior of 3D printing mortars containing mineral additive was investigated. Different mortars were designed by using 0%, 10% and 20% fly ash as mineral additives in the composition of the mortars. Mineral additive was used according to the weight displacement method with cement. After the mortars were printed as a single layer in a 3D printer, their length changes were measured in the laboratory environment for up to 40 days. Drying shrinkage rates were determined and compared according to the initial dye ratio of each measurement. According to the findings, the shrinkage rates of the control mortars were reduced in 50% with the use of fly ash in ratio of 20%.

Keywords: 3B printing mortar, Mineral additive, Shrinkage.

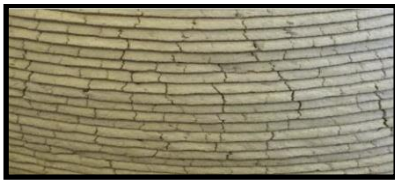
1. GİRİŞ

İnşaat Mühendisliği yapıları daha çok geleneksel üretime dayalı olarak yapılmasına rağmen sanayi devrimindeki teknolojik gelişmeler bu sektörü de dönüştürmeye başlamıştır. Mühendislik yapılarının az zamanda daha az insan gücü ile ve daha düşük

maliyetle inşa edilmesi ve çevreye duyarlı olmasının talepleri farklı üretim teknikleri arayışına yönlendirmiştir. Bu üretim tekniklerinde en son teknoloji üç boyutlu (3B) baskı yazıcılarıdır [1-3]. Endüstriyel alanda birçok olumlu gelişmeye imza atan 3B baskı yazıcılar inşaat sektörüne de yeni bir boyut

kazandırmıştır. Son teknolojik gelişmelerle birlikte, geleneksel yapım teknolojisine göre aynı yapı 3B baskı yazıcı ile %70 ekonomi tasarrufuyla inşa edilebilmektedir. Eklemeli imalat yöntemiyle 3B harç yazıcılarıyla yapının teşkil edilmesi sırasında üst katmanlara doğru çıkıldıkça harç katmanlarının birbiri üstünde durması ve iki katman arasındaki aderansın sağlanması da güçleşmektedir. Harcın birim ağırlığından dolayı daha alt katmanlardaki harçlar yayılmaya başlamakta ve yapının sürdürülebilirliğini risk altına atmaktadır [2-5].

Ekstrüzyon bazlı beton 3B baskı emekleme aşamasındadır ve inşaatta yaygın kullanımının yolunu açmak için bu yeni teknolojinin birçok yönünün kapsamlı bir şekilde araştırılması gerekmektedir. Sertleştirilmiş çimento hamurunun doğal kuruma büzülmesi, 3B baskılı betonun kuruma büzülmesinin kaynağı olduğundan, çok yüksek çimento/ince agrega oranlarına sahip çimento esaslı 3B baskı malzemelerinin büzülme davranışı, bu yenilikçi üzerinde çalışan araştırmacılar için en büyük zorluklardan biridir [6,7]. Ayrıca bu teknikte kalıp olmaması nedeniyle dış mekan 3B baskı ortamı aşırı nem kaybına ve kuruma rötresi çatlamasına neden olur (Şekil 1). Betonda, erken yaştaki boşluk suyu buharlaşması hacimsel büzülmeye neden olur ve bu, sınırlandırıldığında plastik büzülme çatlamasına neden olabilir [8]. 3B baskılı beton, kalıp kullanılmaması, minimum karma suyu, düşük agrega/bağlayıcı oranı ve karışımındaki yüksek miktarda ince tane nedeniyle plastik büzülme çatlamasına karşı savunmasızdır [9,10]. Beton 3B baskıda, yapıların yazdırılması sırasında kalıp kullanılmadığından ve erken aşamadaki su kaybı daha düşük derecede hidrasyonla sonuçlandığından yüzey suyunun buharlaşma olasılığı daha yüksektir. Beton tabakalarının birikmesinden sonra su kaybı seviyesini azaltmak için, taze 3B baskılı beton içindeki su taşıma özelliklerinin kontrol edilmesi gerekir [11,12].



Şekil 1. 3B yazıcı ile baskılanmış çimento esaslı yapı elemanında oluşan rötres çatlakları [13].

Konuyla ilgili olarak, Moelich vd. [14] 3B yazıcıyla baskılanan harçların kuruma büzülmesi davranışlarını incelemek için yeni bir deneysel yöntem önermişlerdir. Büzülme orta derecede bir buharlaşma hızı altında tutulduğunda şiddetli çatlama gözlemlendiği belirtilmiştir. Baskıdan sonraki ilk 2 saat içinde, normal betondan daha erken çatlaklar oluşmuştur. Ardışık katmanlarda diferansiyel yatay deformasyon ve buna bağlı olarak büzülme sınırlandırıldığında katmanlar arası kayma gözlemlendiği belirtilmiştir. Zhang ve Xiao [15] agrega olarak geri dönüştürülmüş kum kullanımının 3B yazdırılan harçların plastik büzülme davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Geri dönüştürülmüş kum, normal kum yerine %25, %50, %75 ve %100 olarak yer değiştirilmek suretiyle kullanılmıştır. 3B yazdırılan harçların 180 dk boyunca boyutsal değişimleri ölçülerek plastik rötresi ortaya konmuştur. Elde edilen bulgulara göre, 3B baskılı harcın plastik büzülmesinin, geri dönüştürülmüş kum içeriğinin artmasıyla arttığını göstermiştir. Geri dönüştürülmüş kumun daha yüksek ikame oranı ile, 3B baskılı harcın kısıtlama koşulları altında plastik çatlaması, daha yüksek bir çatlama derinliği göstermiştir. Bununla birlikte, geri dönüştürülmüş kumla karıştırılmış 3B baskılı harcın, %50 değiştirme oranı altında küçük bir plastik büzülme oranı gösterdiği sonucuna varılabileceği ifade edilmiştir. Shahmirzadi vd. [16], farklı kum/çimento oranlarındaki 3B baskı malzemelerinin nem kaybı, kuruması ve otojen büzülmesi üzerine bağıl nem (RH) ve sıcaklık gibi farklı dış ortam koşullarının etkilerine ilişkin kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Kuruma büzülmesi sonuçları, standart olmayan farklı kürlenme koşulları altında 3B yazdırılmış olan 28 günlük numunelerin, standart ortamdaki numunelerden %30'a kadar daha düşük bir uzunluk değişikliği gösterdiğini göstermektedir. Le vd. [17], EN 12617-4 [18]'e göre 3B baskılanmış betonun kuruma büzülmesini üç kürlenme koşulunda araştırdı: i) suya daldırılmış; ii) ortam sıcaklığında (%100 RH ve 15-25 °C) nemli çuvalla kaplanmış; ve iii) altı ay boyunca %60 bağıl nem ve 20°C ile iklim odası. 3B yazıcıyla baskılanmış betonun 184 günlük kuruma büzülmesinin, üç kürlenme koşulu altında sırasıyla yaklaşık 0.180, 0.57 ve 0.855 mm/mm olduğunu bulmuşlardır. Zhang vd. [19] 3B yazıcıyla baskılanmış bir çimento harç bloğundan 100x100x400 mm³ numuneler

kesmiş ve üç ay boyunca 20°C - %50 RH kürleme koşulu altında kuruma büzülmesini ölçmüştür. Çalışmalarında, 56 gün sonra kuruma büzülme değerinin 0.8-0.85 mm/mm aralığında olduğu rapor edilmiştir.

Literatürde 3B yazdırılmış harçların kuruma büzülmesi veya plastik büzülme gibi erken rötre özellikleri üzerine bazı çalışmalar yapılmışsa da, bileşen olarak mineral katkıların kullanılması durumunda kuruma büzülmesi davranışı üzerine kapsamlı çalışmaların yapılmadığı görülmüştür. Bu çalışmada, mineral katkı olarak uçucu külün 3B yazdırılan harç içerisinde bileşen olarak kullanılması durumunda kuruma büzülme davranışına etkisi incelenmiştir.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Malzemeler

Bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmış olup, Afyon Set Çimento fabrikası ürünüdür. Mineral katkı olarak da Tunçbilek termik santrali uçucu külü kullanılmıştır. Agrega olarak, özgül ağırlığı 2.64 ve en büyük tane boyutu 0.5 mm olan silis kumu kullanılmıştır. Bileşenlerin görünüşleri Şekil 2’de verilmiştir. Çimentonun özgül ağırlığı 3.07 ve uçucu külün özgül ağırlığı 1.99’dur. Her iki malzemenin de kimyasal analizi sonucunda elde edilen oksit değerleri Çizelge 1’de sunulmuştur.



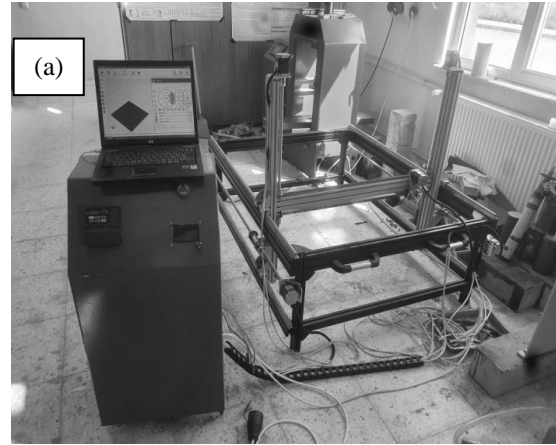
Şekil 2. 3B baskı harcında kullanılan bileşenlerden görünüm.

Çizelge 1. CEM I 42.5 Portland çimentosu ve Tunçbilek uçucu kül kimyasal analiz sonucu.

Bileşen, %	Çimento	Uçucu Kül
CaO	63.6	6.66
SiO ₂	16.6	47.4
Al ₂ O ₃	4.72	19.8
Fe ₂ O ₃	3.27	11.8
MgO	1.91	4.76
Na ₂ O	0.34	0.57
K ₂ O	1.06	2.62
SO ₃	4.72	1.86
Özgül ağırlık	3.07	1.99
İncelik (Blaine), cm ² /g	3312	3126

2.2. Harç Üretimleri ve Deneyle

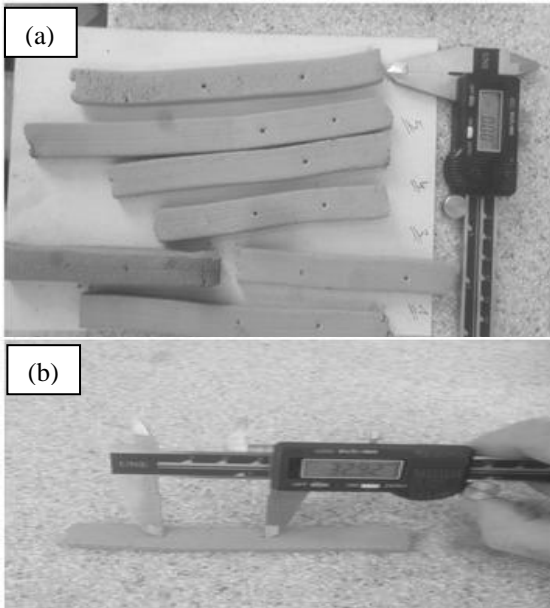
Elemeli imalat yöntemiyle üretilen yapıların rötre özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla pistonla itilerek bir uçtan çıkartılma (RAM) yöntemiyle ekstrüzyona bağlı 3B baskı ile harçlar üretilmiş ve deneyler bu harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Harçların bileşiminde bağlayıcı olarak 750 kg/m³ Portland çimentosu, 450 kg/m³ silis kumu ve 0.37 su/çimento oranına göre su ilavesi gerçekleştirilmiştir. Mineral katkı olarak uçucu kül (UCK), çimento ile %0 (kontrol), %10 ve %20 oranında ağırlıkça yer değiştirilerek harçlara ilave edilmişlerdir. Örneğin, %10 uçucu kül (UCK10) kullanılan karışımlarda, çimento miktarı ağırlıkça %10 oranında azaltılarak 675 kg/m³ çimento, 75 kg/m³ UCK, 450 kg/m³ de silis kumu kullanılmıştır. Diğer uçucu kül katkılı harçların üretiminde de aynı yöntem kullanılmıştır. Harçların üretimini takiben ekstrüzyona konulmuş ve 3B yazıcıya ekstrüde edilmiştir (Şekil 3). 3B yazıcı ile en az 100 mm uzunluğunda tek katmanlı harç örnekler yazdırılmıştır. Harç katmanların yazdırma genişlikleri 15 mm ve katman kalınlıkları 5 mm olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. (a) 3B harç yazıcı ve (b) yazdırılan harç katman.

Çizgi şeklinde yazdırılan harç katmanlar üzerine iki nokta işaretlemesi yapılarak bu noktalar arasındaki mesafe 0.01 hassasiyetli dijital kumpas ile belirli zaman aralıklarında ölçülmüştür (Şekil 4). Rötire deneyi EN 12617-4 [18] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Ölçüm süresi olarak, ilk hafta iki gün aralıkla ölçümler alınırken, daha sonra haftada en az bir ölçüm alınmış ve 40 gün boyunca ölçümler devam etmiştir.

Alınan tüm ölçümler (L_s), ilk gün alınan uzunluk değerinden (L_o) farkı alınarak boy değişimleri elde edilmiştir (ΔL). Boy değişimleri tekrar ilk uzunluk değerine oranlanarak rötire değerleri (mm/mm) elde edilmiştir.

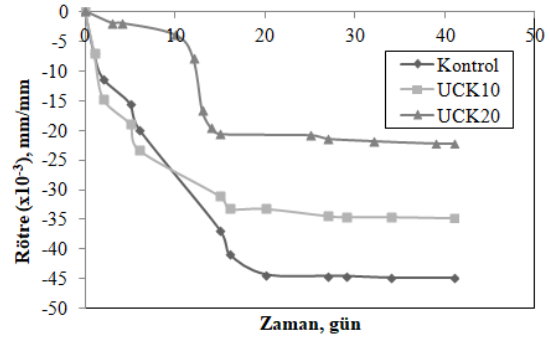


Şekil 4. (a) Yazdırılan eklemeli katmanlar ve (b) harç katmanlarda boy ölçümü.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Mineral katkı olarak UCK'nın kullanıldığı 3B baskı harçların zamana bağlı kuruma büzülme oranları (rötire) Şekil 5'te görülmektedir. Mineral katkı içermeyen kontrol harçlar laboratuvar şartlarında UCK içeren harçlara göre daha fazla büzülme davranışı göstermişlerdir. UCK kullanımıyla harçların büzülme oranları giderek azalmıştır. Bunun en önemli nedeni, çimentoyla ağırlıkça yer değiştirilen UCK taneciklerinin özgül ağırlıklarının daha düşük olması nedeniyle aynı hacimde daha fazla miktarda tanecik olarak dahil edilmiş olmalarıdır. UCK tanecik

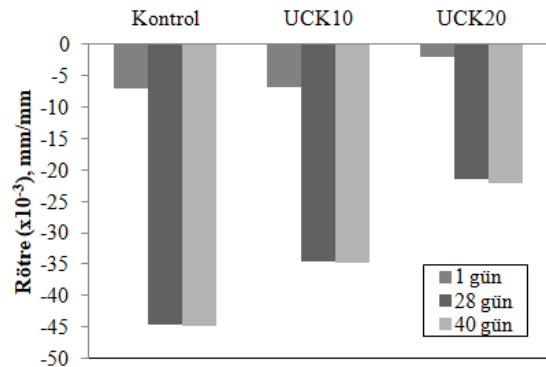
sayısının artmasıyla harç içerisindeki karışım suyunun UCK yüzey alanı tarafından tutulması sonucunda ortama daha az miktarda serbest su bırakılmış olmalarıdır. UCK20 serisinin kuruma sırasındaki büzülme değerlerinin kontrol harcınkine göre daha az olması da bu sonucu desteklemektedir. Diğer yandan çimento tanelerinin azalmasıyla hidrate için gerekli su ihtiyacı da azalmış ve bu su serbest su olarak ortamı terk etmiştir.



Şekil 5. Uçucu kül içeren 3B baskı harcının zamana bağlı rötire değişimi.

Kontrol harçlarda daha fazla hidrate su gerekli olduğundan oluşan hidrasyon reaksiyonu nedeniyle serbest suyun ortama bırakılması daha geç zamanda oluşurken, UCK içeren serilerde serbest su daha kısa sürede ortamı terk ederek büzülme neden olmuştur. Yaklaşık 20 gün sonunda tüm harçların boyutları kararlı hale gelmiştir. Deney sonuna kadar da önemli bir değişim olmamıştır.

Belirli günlerdeki (1, 28 ve 40 gün) 3B baskılanmış harçların boyutsal değişimleri Şekil 6'da karşılaştırılmıştır. Hem ilk gündeki boyutsal değişim değeri hem de 28 gün ve 40 gün gibi ileri günlerde en fazla boyutsal değişim değeri kontrol harçlarda elde edilmiştir.



Şekil 6. 3B baskı harcının farklı zamanlar için rötire değerlerinin karşılaştırılması.

İlk gündeki en düşük rötre değeri UCK20 harçlarında elde edilmiştir. Dolayısıyla, UCK20 ile baskılanan harçların ilk günde çatlama görülme durumu oldukça düşük bir risktir [20]. İleri günlerdeki harçlarda da ilk gündeki gibi en düşük çatlama riski UCK20 ile baskılanan harçlardadır. UCK'nın kullanımıyla neredeyse %50 oranında rötrenin azaltılmasında daha etkili olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, uçucu kül içeren 3B baskı harçlarının zamana bağlı rötre davranışı incelenmiş olup, elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

- Tüm harçların içerisindeki serbest su ortamdan uzaklaşarak harçların büzülmesine neden olmuştur.
- Kontrol harçların ve uçucu kül içeren harçların boyutsal değişimi belirli bir zamana kadar artarken, harç içerisindeki serbest suyun ortamı terk etmesiyle boy değişimleri sabit hale gelmiştir.
- Mineral katkılı harçlarda, UCK'nın birim hacimdeki aynı ağırlıktaki çimento miktarına göre daha fazla tanecik içermesi ile yüzey alanının artması sonucunda yüzeylerinde daha fazla serbest su tutmuşlardır. Bunun sonucunda harç içerisindeki serbest su miktarının azalmasını sağlamışlardır. Daha az serbest suyun harç bünyesinden uzaklaşmasıyla mineral katkılı harçlarda daha az rötre değeri elde edilmiştir.
- Mineral katkı kullanımı ile hem ilk günlerde hem de ileriki günlerde kontrol harçlara göre daha az büzülme elde edilmesi sağlanmıştır. Uçucu külün %20 oranında kullanımı durumunda en az (%50) rötre değeri elde edilmiştir.

Sonuç olarak, 3B baskılanan harçlarda çatlama riskinin azaltılması için hem ilk hem de ileri günlerde en iyi performans gösteren katkı tipi %20 oranında uçucu kül olacaktır. Uçucu kül ileri günlerdeki rötre değerini azaltacak olsa da, çatlama riskine karşı 3B baskılanmış harçların sulanarak kürlenmesi ile kontrol altında tutulabilecektir.

KAYNAKLAR

1. Uygunoğlu, T., Özgüven, S.B., Topçu, İ.B., "3D Teknolojisi İle Yapı Malzemesi Üretimindeki Gelişmeler", International Journal of 3B Printing Technologies and Digital Industry Vol. 3, Issue 3, 279-288, 2019.
2. Uygunoğlu, T, Barlas Özgüven, S., "3D Beton Yazıcılar İçin Tasarlanan Harçlarının Ekstrüde Edilebilirlikleri" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, Vol. 8, Issue 1; 410-420, 2021.
3. Kam, M., Saruhan H., İpekçi, A., "The effect of filling structures on strength of printed products by 3D printers," Duzce University Journal of Science & Technology, Vol. 7, Issue 3, 951-960, 2019.
4. Kam, M., Saruhan, H., İpekçi A., "Investigation the effects of 3D printer system vibrations on mechanical properties of the printed products," Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, Vol. 36, Issue 3, 655-666, 2018.
5. Nerella, V.N., Krause M., Mechtcherine, V., "Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability", Autom. Constr. Vol. 109, Issue 102986, 2020.
6. Ivanova, I., Ivaniuk E., Bisetti, S., Nerella, V.N., Mechtcherine, V., "Comparison between methods for indirect assessment of buildability in fresh 3D printed mortar and concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 156, 1-17, 2022.
7. Wi, K., Wang, K., Taylor, P.C., Laflamme, S., Sritharan, S., Qin, H., "Properties and microstructure of extrusion-based 3D printing mortar containing a highly flowable, rapid set grout", Cement and Concrete Composites, Vol. 124, 1-12, 2021.
8. Suiker, A.S.J., Wolfs, R.J.M., Lucas, S.M., Salet, T.A.M., "Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing", Cement and Concrete Research, Vol. 135, Issue 106016, 2020.
9. Samouh H., Rozière E., Loukili A., "The differential drying shrinkage effect on the concrete surface damage: Experimental and numerical study", Cement and Concrete Research, Vol. 102, 212-224, 2017.
10. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J., "3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research", Cement and Concrete Research, Vol. 112, 37-49, 2018.
11. Marchon D., Kawashima S., Bessaies-Bey H., Mantellato S., Ngo S., "Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: potential

admixture and cement chemistry", *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, 96–110, 2018.

12. Ma S., Kawashima S., "Rheological and water transport properties of cement pastes modified with diutan gum and attapulgite/palygorskite nanoclays for 3B concrete printing", *RILEM Int. Conf. Concr. Digit. Fabr.*, Springer, 61–69, 2018.

13. Luhar S., Suntharalingam T., Navaratnam S., Luhar I., Thamboo J., Poologanathan K., Gatheeshgar P., "Sustainable and renewable bio-based natural fibres and its application for 3B printed concrete: A review", *Sustainability*, Vol. 12, Issue 24; 1-31, 2020.

14. Moelich G.M., Kruger J., Combrinck R., "Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 200, Issue 108313, 2020.

15. Zhang H., Xiao J., "Plastic shrinkage and cracking of 3D printed mortar with recycled sand", *Construction and Building Materials*, Vol. 302, 124405, 1-11, 2021.

16. Shahmirzadi M.R., Gholampour A., Kashani A., Ngo T.D., "Shrinkage behavior of cementitious 3D printing materials: Effect of temperature and relative humidity", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 124, Issue 104238, 2021.

17. Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Law R., Gibb A.G.F., Thorpe T., "Hardened properties of high-performance printing concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, 558–566, 2012.

18. EN 12617–4, "Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures. Test Methods, Determination of Shrinkage and Expansion", British Standard Institution, Milton Keynes, UK, 2002.

19. Zhang Y., Zhang Y., She W., Yang L., Liu G., Yang Y., "Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 201, 278–285, 2019.

20. Yang J., Wang Q., Zhou Y., "Influence of Curing Time on the Drying Shrinkage of Concretes with Different Binders and Water-to-Binder Ratios", *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 2695435, 1-10, 2017.