

ÇİMENTO C₃A İÇERİĞİNİN 3B BETON KARIŞIMLARININ BAZI TAZE HAL ÖZELLİKLERİ VE BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

Hatice Gizem ŞAHİN *^{ID}
Ali MARDANI *^{ID}

Alınma: 07.07.2022; düzeltme: 05.08.2022; kabul: 18.08.2022

Öz: Bu çalışmada, çimento C₃A miktarının 3B beton karışımlarının bazı taze hal özellikleri ve basınç dayanımına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı miktarda C₃A içeren iki seri 3B beton karışımı hazırlanarak optimum karışım oranı belirlenmiştir. 3B betonların optimum karışım oranları ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik parametreleri dikkate alınarak tespit edilmiştir. Enjeksiyon tabancasından kolaylıkla pompalanabilen karışımların ekstrüde edilebilir olduğu kabul edilmiştir. Üç katman halinde basılabilen ve pürüzsüz yüzeye sahip olan karışımlar inşa edilebilir olarak seçilmiştir. Belirlenen 3B beton karışımlarının zamana bağlı yayılma davranışı, şekil kararlılığı, reolojik özellikleri ve basınç dayanımı incelenmiştir. Karışımların reolojik özellikleri, statik eşik kayma gerilmesi, dinamik eşik kayma gerilmesi, viskozitesi ve yapısal toparlanma hızı olmak üzere dört farklı açıdan incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çimento C₃A içeriğindeki artış ile karışımların zamana bağlı kıvam kaybı, şekil koruma kapasitesi ve yapısal toparlanma hızının arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, çimento C₃A içeriğindeki artış ile 3B beton karışımlarının statik ve dinamik eşik kayma gerilmesi ile basınç dayanımı azalmıştır. Viskozite değerlerinde ise önemli bir değişikliğin olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B beton, çimento C₃A içeriği, ekstrüde edilebilirlik, inşa edilebilirlik, yapısal toparlanma hızı

Effect of Cement C₃A Content on Some Fresh State Properties and Compressive Strength of 3D Printing Concrete Mixtures

Abstract: In this study, the effect of cement C₃A content on some fresh state properties and compressive strength of 3D Printing Concrete (3DPC) was investigated. For this purpose, two series of 3DPC having different amounts of C₃A were prepared and the optimum mix design was determined. The optimum mix design of 3DPC was determined according to extrudability and buildability parameters. Mixtures that can be easily pumped from an injection gun are considered to be extrudable. Mixtures that can be printed in three layers and have a smooth surface are chosen as buildable. Time-dependent flow behavior, shape-stability, rheological properties and compressive strength of selected 3DPC mixtures were investigated. The rheological properties of the mixtures were determined by monitoring four different viewpoints: static/dynamic yield stress, viscosity and structural build-up. According to the results, it was observed that time-dependent loss of consistency, shape-stability capacity and structural build-up of the mixtures increased by increment in C₃A content. However, static and dynamic yield stress and compressive strength of 3DPC decreased. There was no significant change in viscosity values.

Keywords: 3DPC, cement C₃A content, extrudability, buildability, structural build-up

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa
İletişim Yazarı: Ali MARDANI (ali.mardani16@gmail.com)

1. GİRİŞ

3B teknolojisi, özel mimari tasarım elemanlarını ya da büyük ölçekli yapı elemanlarını kalıp kullanmadan katman katman şeklinde üretebilmeye olanak sağlamaktadır (Han ve diğ., 2022). 3B teknolojisinin, özellikle beton endüstrisinde kullanılan geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı üretim yapılmasına olanak sağlanması, iş kazalarını azaltması, daha az malzeme israfı ve kısmen malzeme maliyetinin düşürülmesi gibi üstün özelliklere sahip olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Mohan ve diğ., 2022; Pasupathy ve diğ., 2022; Hao ve diğ., 2022). İnşaat sektöründe 3B yazıcı uygulanmasına ilişkin araştırmaların henüz başlangıç aşamasında olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, 3B betonlar için optimum özelliklere sahip karışım oranlarının tespit edilmesini kısmen zorlaştırmaktadır. 3B beton karışımları, geleneksel betona kıyasla farklı özelliklere sahip olduğundan mevcut standartların 3B betonun karışım oranı hakkında rehberlik sağlayamadığı vurgulanmıştır (Zhang ve diğ., 2019). Genellikle araştırmacılar tarafından, optimum karışım oranı seçilmeden önce birkaç deneme karışımı kullanıldığı anlaşılmıştır. Kazemian ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, 3B betonların optimum karışım oranları, baskı kalitesi, şekil kararlılığı ve yazdırılabilirlik süresi parametreleri ile değerlendirilerek belirlenmiştir. Rahul ve diğ. (2019) tarafından yapılan başka bir çalışmada da, 3B betonların optimum karışım oranları, ekstrüde edilebilirlik, inşa edilebilirlik, sağlamlık ve yapısal toparlanma parametreleri ile değerlendirilmiştir. Ekstrüde edilebilirlik, pompalama sistemi kullanılarak 3B beton karışımlarının nozula iletilmesi olarak tanımlanmıştır (Özalp ve diğ., 2018). Genellikle, 3B beton karışımlarında ekstrüde edilebilirlik kriterlerinin sağlanması amacıyla agrega miktarının azaltıldığı ve çimentolu malzeme miktarının artırıldığı literatürden anlaşılmıştır (Van Der Putten ve diğ., 2019a). Bu durumun, hem ekonomik hem de ekolojik anlamda olumsuz etkileri bulunmaktadır. Söz konusu etkilerin önlenmesi amacıyla, 3B beton karışımlarında uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi mineral katkıların ikame edilerek kullanıldığı literatürden anlaşılmıştır (Moeini ve diğ., 2020).

Geleneksel beton karışımlarına kıyasla, 3B beton karışımlarının farklı reolojik özelliklere gereksinim duyduğu çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Souza ve diğ., 2020; Jeong ve diğ., 2019; Zhang ve diğ., 2021). 3B beton karışımlarının rahat pompalanabilmesi için ekstrüzyondan önce daha yüksek işlenebilirliğe, daha düşük eşik kayma gerilmesi (EKG) ve viskoziteye sahip olması gerektiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, yazdırma işlemi sonucunda katman katman üretimin yapılabilmesi ve her bir katmanın üst katmanların ağırlığını taşıyabilmesi için karışımların yüksek yapısal toparlanma hızına sahip olması gerektiği çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Lloret ve diğ., 2015; Ma ve diğ., 2018). Yapısal toparlanma hızı, 3B beton karışımlarının ekstrüzyonundan sertleşmesine kadar olan süreçte yapı kararlılığını koruması olarak tanımlanmıştır (Zhang ve diğ., 2018). 3B betonlarda istenilen bu reolojik gereksinimlerinin sağlanması için araştırmacılar tarafından genellikle viskozite düzenleyici katkıların kullanıldığı rapor edilmiştir (Yalçınkaya, 2022). Bununla birlikte, viskozite düzenleyici katkı kullanımının 3B beton karışımlarının inşa edilebilirliğini arttırdığı (Wi ve diğ., 2021) ve karışımların kuruma-büzülme değerini azalttığı bildirilmiştir (Bentz ve diğ., 2013). 3B betonların inşa edilebilirliğini ve katmanlar arası bağlanma mukavemetini etkileyen diğer önemli parametrelerin katmanlar arası yazdırma zaman aralığı ve yazdırma hızı olduğu bilinmektedir. Genellikle araştırmacılar tarafından, katmanlar arası yazdırma zaman aralığı artışıyla 3B betonların inşa edilebilirliğinin arttığı belirtilmiştir (Perrot ve diğ., 2016). Ancak, Panda ve diğ. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, katman yazdırma zaman aralığı artışının 3B beton karışımlarının katmanlar arası bağlanma mukavemetinin azalmasına neden olduğu bildirilmiştir. Benzer ifadeler çeşitli araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir (Sanjayan ve diğ., 2018; Chen ve diğ., 2020). Bu duruma, katmanlar arası yazdırma zaman aralığının artışıyla katmanların yüzey neminde meydana gelen azalmanın neden olabileceği bildirilmiştir (Moelich ve diğ., 2021). Bununla birlikte, araştırmacılar tarafından genellikle, yazdırma hızının

artışıyla 3B beton karışımlarının inşa edilebilirlik ve katmanlar arası bağlanma mukavemetinin olumsuz etkilendiği bildirilmiştir (Panda ve diğ., 2018; Wolfs ve diğ., 2019). Bu durumun, yazdırma hızının artışıyla katmanların pürüzlülüğünün azalmasından kaynaklanabileceği Van Der Putten ve diğ. (2019b) tarafından belirtilmiştir.

Bilindiği gibi, çimentolu sistemlerin reolojik özellikleri, çimento inceliği, mineral katkı türü ve miktarı, kimyasal katkı türü ve miktarı, agrega özellikleri ve ortam koşulları gibi birçok parametreden etkilenmektedir (Şahin ve diğ., 2022a; Şahin ve diğ., 2021; Kobya ve diğ., 2022; Özen ve diğ., 2022; Mardani-Aghabaglou ve diğ., 2017a; Altun ve diğ., 2021). Söz konusu parametrelere ek olarak, çimentonun en reaktif bileşeni olma özelliğini taşıyan C₃A morfolojisi ve içeriğinin de çimentolu sistemlerin reolojik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır (Mardani-Aghabaglou, 2016). Literatürde genellikle, çimento C₃A içeriğinin azalmasıyla karışımların statik ve dinamik eşik kayma gerilmesinin azaldığı belirtilmiştir (Mardani-Aghabaglou ve diğ., 2017b). Bununla birlikte, C₃A içeriğinin artışıyla karışımların tiksotropik davranışının arttığını belirten araştırmacılar da bulunmaktadır (Quanji, 2010). Yapılan literatür araştırmasında, C₃A içeriğine bağlı olarak oluşan tiksotropik davranışın, 3B beton karışımlarının uygunluk kriterlerine (ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik) olan etkisinin incelendiği bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Literatürdeki söz konusu eksikliği gidermek amacıyla yapılan bu çalışmada, çimento C₃A içeriğinin 3B beton karışımlarının bazı taze hal özellikleri ve basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, hammadde ve klinkere ilave edilen alçıtaşı türü aynı ancak iki farklı C₃A içeriğine sahip çimento kullanılarak üretilen iki seri 3B beton karışımı hazırlanmıştır. 3B betonların optimum karışım oranları ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik parametrelerine göre tespit edilmiştir. Belirlenen 3B beton karışımlarının zamana bağlı yayılma davranışı, şekil kararlılığı, reolojik özellikleri ve basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Sonuçta, çimento C₃A oranının artmasının karışımların zamana bağlı kıvam kaybı, şekil koruma yüzdesi ve yapısal toparlanma hızını arttırdığı ancak basınç dayanımında bir azalmaya neden olduğu belirlenmiştir.

2. MALZEME VE METOT

2.1. Malzemeler ve Karışım Oranları

Çalışma kapsamında hammadde ve klinkere ilave edilen alçıtaşı aynı ancak C₃A içeriği %2,13 ve %6,82 olmak üzere iki farklı CEM I 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan farklı C₃A içeriğine sahip çimentolar ve uçucu kül sırasıyla Oyak Çimento Fabrikasından ve Orhaneli Termik Santralinden temin edilmiştir. Tüm karışımlara 250 kg/m³ olarak sabit miktarda uçucu kül ilave edilmiştir. Çalışmada kullanılan çimento, uçucu kül ve su azaltıcı katkıya ait üretici firma tarafından verilen bazı özellikler sırasıyla, Tablo 1-3'te gösterilmiştir. İnce agrega olarak maksimum tane çapı 2 mm olan kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Agreganın TS EN 1097-3 ve TS EN 1097-6 Standartlarına uygun olarak hesaplanan gevşek/sıkışık birim hacim ağırlık, su emme ve özgül ağırlığı değerleri sırasıyla, 1456/1620 kg/m³, %0,4 ve 2,54 olarak ölçülmüştür.

Tablo 1. Çalışma kapsamında kullanılan çimentoların fiziksel ve kimyasal özellikleri

Oksit (%)	%2,13 C ₃ A	%6,82 C ₃ A
SiO ₂	18,94	19,73
Al ₂ O ₃	4,33	5,19
Fe ₂ O ₃	5,53	4,10
CaO	61,67	62,62
MgO	1,55	1,75
SO ₃	2,82	2,36
Na ₂ O	0,31	0,36
K ₂ O	0,57	0,57
Cl ⁻	0,0375	0,0436
Serbest CaO	0,75	1,11
C ₃ A	2,13	6,82
C ₃ S	58,98	52,96
C ₂ S	9,80	16,61
C ₄ AF	16,83	12,48
Özgül ağırlık	3,21	3,17
Özgül yüzey (Blaine, cm ² /g)	3786	3659
0,045 mm elekta kalıntı (%)	4,3	3,0

Tablo 2. F sınıfı uçucu külün kimyasal bileşimi

Oksit (%)	F Sınıfı	Fiziksel özellikler	F Sınıfı
SiO ₂	59,22	Özgül ağırlık	2,31
Al ₂ O ₃	22,86	Mekanik özellikleri	
Fe ₂ O ₃	6,31	Dayanım aktivite indeksi (%)	7-günlük
CaO	3,09		28-günlük
MgO	1,31		90-günlük
SO ₃	0,17		110,2
Na ₂ O+0.658 K ₂ O	1,4	İncelik	
Cl ⁻	0,001	Özgül yüzey (Blaine) cm ² /g	4000
Çözünmeyen kalıntı	0,32	0,045 mm elekta kalan (%)	10
Kızdırma kaybı	3,2		
Serbest CaO	0		

ASTM C 618 standartlarına göre, uçucu külün, SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃≥ %50, Na₂O≤ %1.5 ve SO₃≤ %5 olmalıdır. **TS EN 450'ye göre, uçucu külün SO₃≤%3 ve serbest CaO≤%1 olmalıdır.

Tablo 3. Polikarboksilat-eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	Katı Madde İçeriği (%)	pH Değeri	Klorür İçeriği (%)	Alkali Oranı, (%) Na ₂ O
1,060	32	2-5	<0,1	<10

Çalışma kapsamında farklı miktarda C₃A içeren iki seri 3B beton karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan 3B betonlarda, optimum karışım oranlarını belirlemek amacı ile her bir seri için farklı su/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranlarında 5'er karışım hazırlanmıştır. 1 m³ 3B beton üretiminde kullanılan malzeme miktarları Tablo 4'te gösterilmiştir. Serilerin isimlendirilmesi C₃A içeriklerine göre yapılmıştır. Örneğin, %2,13 C₃A'lı çimento içeren karışım PÇ_2,13 olarak isimlendirilmiştir. Optimum karışım özelliklerini sağlayan 3B betonlar belirlenerek çalışmanın devamında kullanılmıştır.

Tablo 4. Optimum karışım oranlarını belirlemek amacı ile hazırlanan 1 m³ 3B beton üretiminde kullanılan malzeme miktarları

Karışım	Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	DYK* Agregası (kg/m ³)	s/b oranı	k/b oranı	Katkı Dozajı (%)**
PÇ_2,13_1	500	250	1181,1	0,32	1,58	0,4
PÇ_2,13_2	500	250	1163,3	0,33	1,55	0,4
PÇ_2,13_3	600	250	984,25	0,35	1,16	0,3
PÇ_2,13_4	550	250	1230,3	0,33	1,54	0,5
PÇ_2,13_5	550	250	1079,5	0,35	1,35	0,3
PÇ_6,82_1	500	250	1181,1	0,32	1,58	0,4
PÇ_6,82_2	500	250	1163,3	0,33	1,55	0,4
PÇ_6,82_3	600	250	984,25	0,35	1,16	0,3
PÇ_6,82_4	550	250	1230,3	0,33	1,54	0,5
PÇ_6,82_5	550	250	1079,5	0,35	1,35	0,3

*Doğun Yüzey Kuru

**Bağlayıcı miktarının yüzdesi

2.2. Metot

2.2.1. Karışımların Hazırlanması ve Harç Enjeksiyon Tabancasına Yerleştirilmesi

3B beton karışımları üç farklı aşamada hazırlanmıştır. İlk aşamada, bağlayıcı malzemeler (çimento ve uçucu kül) ve ince agregası 1 dakika boyunca düşük hızda (62,5 rpm) karıştırılmıştır. 2. aşamada, karışıma su ve su azaltıcı katkı ilave edilerek 1 dakika boyunca düşük hızda (62,5 rpm) karıştırılmıştır. 3. aşamada ise karışım 2 dakika boyunca yüksek hızda (125 rpm) karıştırılmıştır. Karışımlar hazırlandıktan hemen sonra Şekil 1.a'da gösterilen Harç Enjeksiyon Tabancasına yerleştirilerek, karışımın katmanlar halinde basılması sağlanmıştır.



Şekil 1:

Çalışma kapsamında kullanılan **a.** Harç Enjeksiyon Tabancasına ve **b.** nozul boyutları

2.2.2. Karışımların Taze Hal ve Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Harç karışımlarının yayılma değerleri ASTM 1437-20 Standardına uygun olarak belirlenmiştir. 3B betonların optimum karışım oranları ekstrüde edilebilirlik ve inşa edebilirlik parametrelerine göre belirlenmiştir (Şahin ve diğ., 2022a). Harç Enjeksiyon Tabancasından rahatlıkla pompalanabilen karışım, ekstrüde edilebilir olarak kabul edilmiştir. Katmanlar bekleme süresi olmadan basılmıştır. Herhangi bir çökme ve yüzey pürüzlülüğü olmadan üç katman halinde basılabilen karışım inşa edilebilir olarak seçilmiştir. Her iki kriteri sağlayan karışımlar optimum olarak seçilmiştir. Bu karışımlarda, 3B beton uygunluk kriterlerinin sağlandığı varsayılmıştır.

Optimum oranda hazırlanan 3B karışımlarının şekil kararlılığı Denklem 1'den elde edilen şekil koruma kapasitesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Çalışmada genişliği 42 mm olan nozul kullanılmıştır. Şekil koruma kapasitesi %95 ve üzeri olan karışımların şekil kararlılığı kriterini sağladığı kabul edilmiştir.

$$\text{Şekil koruma kapasitesi (\%)} = \frac{\text{Ekstrüzyondan sonraki katman genişliği}}{\text{Nozul genişliği}} \cdot 100 \quad (1)$$

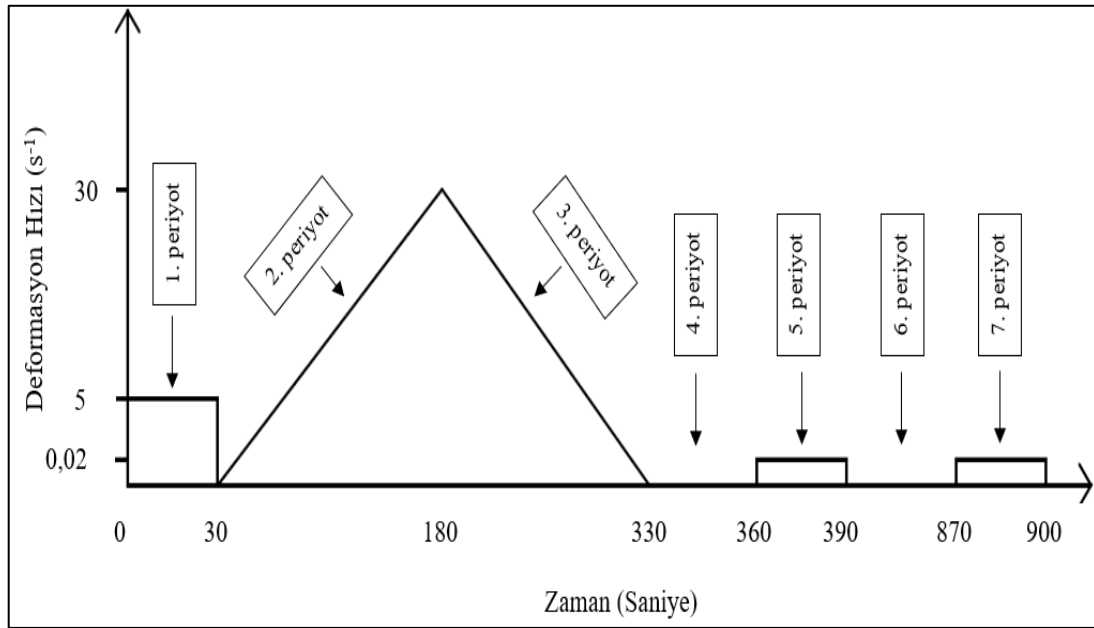
Reolojik ölçümlerinde Şekil 2'de gösterilen ve bilyeli ölçüm sisteminden yararlanan reometre kullanılmıştır. Karışımların reolojik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan reolojik ölçüm yöntemi Şekil 3'te gösterilmiştir. Kullanılan reolojik ölçüm yöntemi Mardani-Aghabaglou (2016) ve Yao ve diğ. (2022) tarafından önerilen iki farklı reolojik ölçüm yönteminin modifiye edilmesiyle oluşturulmuştur. Akma eğrisi verilerinin Herschel-Bulkley modeli yardımıyla analizi sonucunda, dinamik eşik kayma gerilmesi ve nihai viskozite değerleri her karışım için hesaplanmıştır. Ayrıca, karışımların yapısal toparlanma hızı Denklem 2 kullanılarak belirlenmiştir.

$$A_{thix} = \frac{\tau_{s,f} - \tau_{s,i}}{t_d} \quad (2)$$

Burada, A_{thix} yapısal toparlanma hızını (Pa/s), $\tau_{s,f}$ 7. periyottaki statik eşik kayma gerilmesini (Pa), $\tau_{s,i}$ 5. periyottaki statik eşik kayma gerilmesini (Pa) ve t_d karışımın dinlenme süresini (s) temsil etmektedir.



Şekil 2:
Çalışmada kullanılan reometre cihazı



Şekil 3:
Çalışmada uygulanan reolojik ölçüm yöntemi

2.2.3. Karışımların Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

3B beton karışımlarının 7 günlük basınç dayanımları 40 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C109 Standardına uygun olarak belirlenmiştir. Her bir seri karışım için bir adet 3 katmanlı prizma üretilmiştir. Üretilen prizmalardan, üç adet 40 mm'lik küp numune kesilmiştir. Hazırlanan numuneler deney gününe kadar buhar küründe bekletilmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Optimum Karışım Oranının Belirlenmesi

Karışımların yayılma değeri ve ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik deney sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Çimento C₃A içeriğinden bağımsız olarak 130 mm yayılma değerine sahip 1 nolu karışımın kolaylıkla pompalanmadığı sonuçlardan anlaşılmıştır. Bu bağlamda, söz konusu karışımın ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik kriterinin sağlanmadığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, ekstrüde edilebilirliği arttırmak amacıyla karışımın su/bağlayıcı (s/b) oranı artırılarak 140 mm yayılma değerine sahip 2 nolu karışım üretilmiştir. Ancak, söz konusu karışımın da ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik kriterinin sağlanmadığı gözlemlenmiştir. Karışımın akışkanlığını arttırmak amacı ile s/b oranı artırılarak ancak kum/bağlayıcı (k/b) oranı azaltılarak yayılma değeri 225 mm olan 3 nolu karışım hazırlanmıştır. Çimento C₃A oranından bağımsız olarak 3 nolu karışımın ekstrüde edilebilirlik kriteri sağlanmıştır. Ancak, karışımın ekstrüde edilebilmesine rağmen inşa edilebilirliğin bir kriteri olan üç katmanlı yapı üretilmemiştir. Söz konusu 3 nolu karışımın, karışımın kendi ağırlığını, üst katmanların ağırlığını ve pompa basıncından kaynaklanan deformasyonları taşıyamamasının, k/b oranının oldukça düşük olmasından ve s/b oranının nispeten yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu sebeple, s/b oranının azaltılması ve kum/bağlayıcı oranının artırılması ile yayılma değeri 200 mm olan 4 nolu karışım üretilmiştir. Üretilen karışım, ekstrüde edilebilir olarak tanımlanmıştır. Ancak, k/b bağlayıcı oranının artışına bağlı olarak karışımların yüzeyinde pürüzlülüklerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple, söz konusu karışımın da inşa edilebilirlik kriteri sağlanamamıştır. Ayrıca, bu karışımın istenilen yayılma değerini sağlamak için maksimum miktarda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Karışımların inşa edilebilirliğinin bir kriteri olan yüzey pürüzlülüğünü önlemek amacıyla k/b oranı azaltılarak yayılma değeri 200 mm olan 5 nolu karışım üretilmiştir. Üretilen karışımın ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik kriterlerinin sağlandığı gözlemlenmiştir. Bu karışım her iki seri için de optimum 3B beton karışım olarak seçilmiştir. Bu karışımın s/b ve k/b oranları sırasıyla, 0,35 ve 1,35 olmuştur. Çalışma kapsamında üretilen karışımlarda, ekstrüde edilebilme ve inşa edilebilme kriterlerinin sağlanabilmesi için yayılma değerlerinin 200 mm olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu değer altındaki yayılma değeri karışımların ekstrüde edilebilme kapasitesini olumsuz etkilerken, bu değer üzerindeki yayılma değerlerinde karışımların inşa edilebilme kapasitesi olumsuz etkilenmiştir. Benzer şekilde, Yalçınkaya (2022) tarafından yapılan bir çalışmada 200 mm yayılma değerine sahip 3B yazdırılabilir beton karışımlarının ekstrüde edilebilirlik, şekil kararlılığı ve inşa edilebilirlik kriterlerini sağladığı tespit edilmiştir.

Tablo 5. Karışımların ekstrüde edilebilirlik, inşa edilebilirlik ve yayılma deney sonuçları

Karışım	Ekstrüde Edilebilirlik	İnşa Edilebilirlik	Yayılma Değeri (mm)
PÇ_2,13_1	X	X	130
PÇ_2,13_2	X	X	140
PÇ_2,13_3	√	X	225
PÇ_2,13_4	√	X	200
PÇ_2,13_5	√	√	200
PÇ_6,82_1	X	X	130
PÇ_6,82_2	X	X	140
PÇ_6,82_3	√	X	225
PÇ_6,82_4	√	X	200
PÇ_6,82_5	√	√	200

3.2. Karışımların Şekil Kararlılığı Yüzdesi ve Zamana Bağlı Yayılma Davranışı

Daha öncede vurgulandığı gibi, ekstrüde ve inşa edilebilirlik kriterlerini sağlayan karışımlarda şekil kararlılığı kriteri incelenmiştir. 3B karışımlarının Denklem 1 kullanılarak elde edilen şekil koruma kapasitesi değeri Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca, söz konusu karışımların zamana bağlı yayılma performansı da irdelenmiştir. Bu amaçla, 200 mm başlangıç yayılma değerine sahip karışımların 60 dakika boyunca her 15 dakika da bir ölçülen yayılma değerleri Tablo 7'de özetlenmiştir.

Tablo 6'dan da anlaşıldığı gibi, çimento C₃A oranından bağımsız olarak 3B karışımlarının şekil koruma yüzdesi %95 in üzerinde ölçülmüştür. Bu sebeple, her iki karışımda da şekil kararlılığı kriterinin sağlandığı anlaşılmıştır. PÇ_6,82_5 karışımının şekil koruma kapasitesi açısından daha üstün performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu durumun, C₃A'nın artışı ile etrenjitin daha fazla ve hızlı oluşmasından kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Bilindiği gibi, C₃A'nın reaksiyonuyla oluşan etrenjit, ortamdaki su moleküllerini tüketmekte ve karışımlarının işlenebilirliğinde bir azalmaya sebep olmaktadır. Geleneksel betonları karışımları için C₃A içeriğindeki azalmanın karışımların taze hal özellikleri açısından istenen bir durum olduğu beyan edilmiştir (Mardani-Aghabaglou, 2016). Ancak, 3B Beton gibi erken yaşta deformasyon kaynaklarına maruz kalan karışımlarda çimento hamurunun hızlı katılaşması gerekli olduğundan, C₃A oranındaki artışın karışımların şekil kararlılığını olumlu etkilediği tespit edilmiştir.

Tablo 6. Karışımların şekil koruma kapasitesi

Karışım	Katman Genişliği (mm)	Şekil Koruma Kapasitesi (%)
PÇ_2,13_5	41	97,6
PÇ_6,82_5	42	100

Çimento C₃A içeriğinden bağımsız olarak, karışımların yayılma değerlerinde hidratasyona bağlı olarak zamanla azalmanın meydana geldiği anlaşılmıştır (Tablo 7). Çimento C₃A içeriğinin artışıyla karışımlarda kıvam kaybı değerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun,

C₃A oranının artışına bağlı olarak karışımda daha fazla miktarda etrenjitin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmüştür (Kim ve diğ., 2016). C₃A-sülfat iyonu reaksiyonu sonucu oluşan 32 mol su içeren iğne şekline sahip etrenjitin, ortamda var olan suyu tüketerek çimento hamurunun kısa sürede kıvam kaybetmesine ve katılaşmasına sebep olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından beyan edilmiştir (Rajasekaran, 2005; Pavoine ve diğ., 2012). Daha önce de vurgulandığı gibi, 3B betonlar katmanlar halinde basıldığından, basılan katmanların çeşitli deformasyon kaynaklarına direnebilmesi gerekmektedir (Şahin ve Mardani, 2022b). Bu sebeple, 3B beton karışımlarında zamana bağlı kıvam kaybının nispeten yüksek olmasının istenen bir durum olduğu anlaşılmıştır. Ancak, karışımlardaki bu kıvam kaybının nozula hasar vermeyecek ve ekstrüde edilebilirliği olumsuz etkilemeyecek mertebede yüksek olmasına dikkat edilmesi gerektiği de çeşitli araştırmacılar tarafından vurgulanmıştır (Panda ve diğ., 2018; Sanjayan ve diğ., 2018). Bu sebeple, inşa edilebilirlik kriteri açısından PÇ_6,82_5 karışımının daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 7. Karışımların zamana bağlı yayılma performansı

Karışım	Zamana Bağlı Yayılma (mm)				
	0. dk	15.dk	30.dk	45.dk	60.dk
PÇ_2,13_5	200	190	180	175	160
PÇ_6,82_5	200	185	175	165	155

3.3. Karışımların Reolojik Özellikleri

3B beton karışımlarının, geleneksel beton karışımlarına kıyasla farklı reolojik özelliklerine gereksinim duyduğu daha önce de vurgulanmıştır. 3B beton karışımlarında daha yüksek ekstrüde edilebilirlik performansının sağlanması için daha düşük bir dinamik eşik kayma gerilmesi değerine ancak, daha üstün inşa edilebilirlik performansının sağlanması için daha yüksek bir statik eşik kayma gerilmesi değerine sahip olması gerektiği vurgulanmıştır (Şahin ve Mardani, 2022c). 3B beton karışımlarının reolojik özelliklerinin, dinamik ve statik eşik kayma gerilmesine (EKG) kıyasla yapısal toparlanma hızı (A_{thix}) ile daha iyi karakterize edildiği çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilmiştir (Zhang ve diğ., 2018; Pan ve diğ., 2021; Yuan ve diğ., 2020). 3B beton karışımlarının kendi ağırlığından, üst katmanların ağırlığından ve ekstrüzyon basıncından kaynaklanan yapısal deformasyonlara direnebilmesi için yüksek bir A_{thix} değerine sahip olması gerektiği vurgulanmıştır (Reiter ve diğ., 2018; Şahin ve Mardani, 2022b). A_{thix} değerinin, etrenjit oluşumu gibi betonun akışkanlığını azaltan kimyasal reaksiyonlara bağlı olarak artan statik eşik kayma gerilmesini temsil ettiği Roussel (2006) tarafından vurgulanmıştır. Karışımlara ait reolojik ölçüm sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. PÇ_2,13_5 ve PÇ_6,82_5 karışımlarında hem ekstrüde edilebilirlik hem de inşa edilebilirlik kriterlerinin sağlandığı daha önce de vurgulanmıştır. Bu karışımların statik eşik kayma gerilmesi değerlerinin sırasıyla, 1657 ve 1587 Pa olarak ölçüldüğü Tablo 8’den de anlaşılmıştır. Bu bağlamda, statik eşik kayma gerilmesi değeri 1587-1657 Pa arasında değişen karışımlarda 3B betonların uygunluk kriterlerinin sağlanacağı tespit edilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, beklentinin tersine daha düşük C₃A içeriğine sahip PÇ_2,13_5 karışımının PÇ_6,82_5 karışımına kıyasla daha yüksek statik EKG ve dinamik EKG değerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu durumun, bir taraftan PÇ_2,13_5 çimentosunun daha yüksek C₃S içeriğine sahip olmasından bir diğer taraftan ise incelik değerinin daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Karışımların viskozite değerlerinde belirgin bir değişikliğin olmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, PÇ_6,82_5 karışımının A_{thix} değeri, PÇ_2,13_5 karışımına kıyasla %6.5 daha yüksek ölçülmüştür. Bu durum, C₃A’nın artışına bağlı olarak daha yüksek miktarda etrenjit oluşumundan kaynaklanmaktadır. Mardani ve diğ. (2017b) tarafından, oluşan

etrenjitin karışım suyunu kimyasal olarak bağlayarak veya fiziksel olarak hapsederek karışımın işlenebilirliğini olumsuz etkilediği bildirilmiştir.

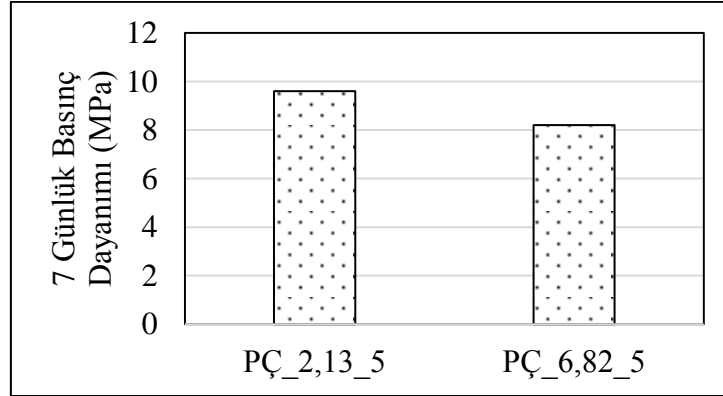
Karışımların yapısal toparlanma hızında meydana gelen bir artışın, katmanların deformasyonlara direnme gücünü ve şekil koruma kapasitesini de arttırabileceği düşünülmüştür. Bu sebeple, söz konusu parametreler incelendiğinde A_{thix} değeri yüksek olan karışımın şekil koruma kapasitesinin de yüksek olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 8. Karışımların reolojik özellikleri

Karışım	Statik EKG (Pa)	Dinamik EKG (Pa)	Viskozite (Pa.s)	A_{thix} (Pa/s)
PC_2,13_5	1657	246	24,3	0,57
PC_6,82_5	1587	120	24,4	0,61

3.4. Karışımların Basınç Dayanımı

Karışımlarının 7 günlük dayanım sonuçları Şekil 4'te gösterilmiştir. PC_2,13_5 karışımının PC_6,82_5 karışımına kıyasla yaklaşık %14 daha yüksek dayanım gösterdiği sonuçlardan anlaşılmıştır. Bu durumun, bir ölçüde PC_2,13_5 çimentosunun daha yüksek oranda C_3S içermesinden bir diğer taraftan ise incelik değerinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Mardani-Aghabaglou ve diğ., 2017a).



Şekil 4:

Karışımlara ait 7 Günlük Basınç Dayanım Değerleri

4. SONUÇ

Çimento C_3A içeriğinin ekstrüzyon yöntemiyle üretilen 3B beton karışımlarının bazı taze hal özellikleri ve basınç dayanımına etkisinin araştırılması amacıyla gerçekleştirilen çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- 200 mm yayılma değerine sahip 3B beton karışımlarında uygunluk kriterleri olan ekstrüde ve inşa edilebilirlik parametrelerinin sağlandığı tespit edilmiştir. 200 mm'nin altında yayılma değerine sahip karışımlarda ekstrüde edilebilirlik kriteri sağlanamazken, bu değer üstünde ise karışımların inşa edilebilirliğinin olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir.

- Çimento C₃A oranının artışı ile karışımların zamana bağlı kıvam kaybı, şekil koruma yüzdesi ve yapısal toparlanma hızı artarken, viskozite değerlerinde belirgin bir değişikliğin olmadığı tespit edilmiştir.
- Çimento C₃A oranının artışı ile 3B beton karışımlarının statik eşik kayma gerilmesi, dinamik eşik kayma gerilmesi ve basınç dayanımı değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar(lar), bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Hatice Gizem ŞAHİN: Çalışmanın Kavramsal ve/veya Tasarım Süreçlerinin Belirlenmesi, Çalışmanın Kavramsal ve/veya Tasarım Süreçlerinin Yönetimi, Veri Toplama, Veri Analizi ve Yorumlama, Makale Taslağının Oluşturulması, Fikirsel İçeriğin Eleştirel İncelemesi, Ali MARDANI: Çalışmanın Kavramsal ve/veya Tasarım Süreçlerinin Belirlenmesi, Çalışmanın Kavramsal ve/veya Tasarım Süreçlerinin Yönetimi, Veri Toplama, Veri Analizi ve Yorumlama, Makale Taslağının Oluşturulması, Fikirsel İçeriğin Eleştirel İncelemesi.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne (BAP) (Proje No: 219M425, FAY-2021-579) katkılarından dolayı teşekkür eder. Yazarlar ayrıca çimento, agrega, uçucukül ve su azaltıcı katkının sağlanmasında ve özelliklerinin belirlenmesinde desteklerinden dolayı Bursa-Beton Hazır Beton, Oyak Çimento Fabrikası, Orhaneli Termik Santrali ve Polisan Yapı Kimyasalları A.Ş yetkililerine teşekkür eder. Ayrıca birinci yazar, TÜBİTAK 2211-A burs programı kapsamındaki destekleri için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkür eder.

KAYNAKLAR

1. Altun, M. G., Şahin, H. G. ve Mardani Aghabaglou, A. (2021) Effect of Main and Side Chain Lengths Change of Water Reducing Admixture on Setting Time and Compressive Strength of Cementitious Systems, *6th International Conference on Engineering and Natural Science*, Belgrade, 13.
2. Bentz, D. P., Snyder, K. A., Peltz, M. A., Obla, K. ve Kim, H. (2013) Viscosity modifiers to enhance concrete performance. *ACI Materials Journal*, 110(5), 495.
3. Chen, Y., Jansen, K., Zhang, H., Rodriguez, C. R., Gan, Y., Çopuroğlu, O. Ve Schlangen, E. (2020) Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study, *Construction and Building Materials*, 262, 120094. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120094
4. Han, N., Xiao, J., Zhang, L. ve Peng, Y. (2022) A microscale-based numerical model for investigating hygro-thermo-mechanical behaviour of 3D printed concrete at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 344, 128231. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128231

5. Hao, L., Xiao, J., Sun, J., Xia, B. ve Cao, W. (2022) Thermal conductivity of 3D printed concrete with recycled fine aggregate composite phase change materials, *Journal of Cleaner Production*, 132598. doi:10.1016/j.jclepro.2022.132598
6. Jeong, H., Han, S. J., Choi, S. H., Lee, Y. J., Yi, S. T. ve Kim, K. S. (2019) Rheological property criteria for buildable 3D printing concrete, *Materials*, 12(4), 657. doi:10.3390/ma12040657
7. Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E. ve Khoshnevis, B. (2017) Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture, *Construction and Building Materials*, 145, 639-647. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015
8. Kim, M. J., Kim, K. B. ve Ann, K. Y. (2016) The influence of C3A content in cement on the chloride transport, *Advances in Materials Science and Engineering*. doi:10.1155/2016/5962821
9. Kobya, V., Kaya, Y. ve Mardani-Aghabaglou, A. (2022) Effect of amine and glycol-based grinding aids utilization rate on grinding efficiency and rheological properties of cementitious systems, *Journal of Building Engineering*, 47, 103917. doi:10.1016/j.jobbe.2021.103917
10. Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M. ve Langenberg, S. (2015) Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*, 60, 40-49. doi:10.1016/j.cad.2014.02.011
11. Ma, G. ve Wang, L. (2018) A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(3), 382-400. doi:10.1007/s11709-017-0430-x
12. Mardani-Aghabaglou, A. (2016) Portland çimentosu ve süper akışkanlaştırıcı katkı uyumunun incelenmesi (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir).
13. Mardani-Aghabaglou, A., Felekoğlu, B. ve Ramyar, K. (2017b) Effect of cement C3A content on properties of cementitious systems containing high-range water-reducing admixture, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(8), 04017066. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001925
14. Mardani-Aghabaglou, A., Son, A. E., Felekoglu, B. ve Ramyar, K. (2017a) Effect of cement fineness on properties of cementitious materials containing high range water reducing admixture, *Journal of Green Building*, 12(1), 142-167. doi:10.3992/1552-6100.12.1.142
15. Moeini, M. A., Hosseinpour, M. ve Yahia, A. (2020) Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing, *Construction and Building Materials*, 257, 119551. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119551
16. Moelich, G. M., Kruger, J. ve Combrinck, R. (2021) Modelling the interlayer bond strength of 3D printed concrete with surface moisture, *Cement and Concrete Research*, 150, 106559. doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106559
17. Mohan, M. K., Rahul, A. V., De Schutter, G. ve Van Tittelboom, K. (2022) Salt Scaling Resistance of 3D Printed Concrete, *In RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Springer, Cham, 188-193.
18. Özalp, F., Yılmaz, H. D. ve Yaşar, Ş. (2018) 3D YAZICI TEKNOLOJİSİNE UYGUN SÜRDÜRÜLEBİLİR VE YENİLİKÇİ BETONLARIN GELİŞTİRİLMESİ, *Hazır Beton*, 62-70.

19. Özen, S., Altun, M. G., Mardani-Aghabaglou, A. ve Ramyar, K. (2022) Multi-effect of superplasticisers main and side-chain length on cementitious systems with fly ash, *Magazine of Concrete Research*, 1-13. doi:10.1680/jmacr.21.00134
20. Pan, T., Jiang, Y., He, H., Wang, Y. ve Yin, K. (2021) Effect of Structural Build-Up on Interlayer Bond Strength of 3D Printed Cement Mortars, *Materials*, 14(2), 236. doi:10.3390/ma14020236
21. Panda, B., Paul, S. C., Mohamed, N. A. N., Tay, Y. W. D. ve Tan, M. J. (2018) Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar, *Measurement*, 113, 108-116. doi:10.1016/j.measurement.2017.08.051
22. Pasupathy, K., Ramakrishnan, S. ve Sanjayan, J. (2022) Fresh and Hardened Properties of 3D Printable Foam Concrete Containing Porous Aggregates, *In RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Springer, Cham, pp. 65-70.
23. Pavoine, A., Brunetaud, X. ve Divet, L. (2012) The impact of cement parameters on Delayed Ettringite Formation, *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 521-528. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.012
24. Perrot, A., Rangeard, D. ve Pierre, A. (2016) Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques, *Materials and Structures*, 49(4), 1213-1220. doi: 10.1617/s11527-015-0571-0
25. Quanji, Z. (2010) Thixotropic behavior of cement-based materials: effect of clay and cement types. Iowa State University.
26. Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H. ve Ghani, Z. (2019) 3D printable concrete: Mixture design and test methods, *Cement and Concrete Composites*, 97, 13-23. doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014
27. Rajasekaran, G. (2005) Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays, *Ocean engineering*, 32(8-9), 1133-1159. doi:10.1016/j.oceaneng.2004.08.012
28. Reiter, L., Wangler, T., Roussel, N. ve Flatt, R. J. (2018). The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete, *Cement and Concrete Research*, 112, 86-95. doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.011
29. Roussel, N. (2006) A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications, *Cement and concrete research*, 36(10), 1797-1806. doi:10.1016/j.cemconres.2006.05.025
30. Sahin, H. G. ve Mardani, A. (2022c) SUSTAINABLE 3D PRINTING CONCRETE MIXTURES, *Journal of Modern Technology and Engineering*, 7(1), 20-29.
31. Sanjayan, J. G., Nematollahi, B., Xia, M. ve Marchment, T. (2018) Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete, *Construction and Building Materials*, 172, 468-475. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.03.232
32. Souza, M. T., Ferreira, I. M., de Moraes, E. G., Senff, L. ve de Oliveira, A. P. N. (2020) 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects, *Journal of Building Engineering*, 32, 101833. doi:10.1016/j.jobe.2020.101833
33. Şahin, H. G. ve Mardani-Aghabaglou, A. (2022b) Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review, *Construction and Building Materials*, 316, 125865. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125865

34. Şahin, H. G., Biricik, Ö. ve Mardani-Aghabaglou, A. (2022a) Polycarboxylate-based water reducing admixture–clay compatibility; literature review, *Journal of Polymer Research*, 29(1), 1-19. doi:10.1007/s10965-021-02884-5
35. Şahin, H., Biricik, Ö. Z. N. U. R. ve Mardani Aghabaglou, A. L. I. (2021) The Enhancement Methods of Polycarboxylate-Based Water Reducing Admixture Performance in Systems Containing High Amount of Clay Literature Review, *6th International Conference on Engineering and Natural Science*, Belgrade, 14.
36. Van Der Putten, J., De Schutter, G. ve Van Tittelboom, K. (2019a) Surface modification as a technique to improve inter-layer bonding strength in 3D printed cementitious materials, *RILEM Technical Letters*, 4, 33-38. doi:10.21809/rilemtechlett.2019.84
37. Van Der Putten, J., Deprez, M., Cnudde, V., De Schutter, G. ve Van Tittelboom, K. (2019b) Microstructural characterization of 3D printed cementitious materials, *Materials*, 12(18), 2993. doi: 10.3390/ma12182993
38. Wi, K., Wang, K., Taylor, P. C., Laflamme, S., Sritharan, S. ve Qin, H. (2021) Properties and microstructure of extrusion-based 3D printing mortar containing a highly flowable, rapid set grout, *Cement and Concrete Composites*, 124, 104243. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104243
39. Wolfs, R. J. M., Bos, F. P. ve Salet, T. A. M. (2019). Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion, *Cement and Concrete Research*, 119, 132-140. doi: 10.1016/j.cemconres.2019.02.017
40. Yalçinkaya, Ç. (2022) Influence of Hydroxypropyl Methylcellulose Dosage on the Mechanical Properties of 3D Printable Mortars with and without Fiber Reinforcement, *Buildings*, 12(3), 360. doi.org: 10.3390/buildings12030360
41. Yao, H., Xie, Z., Li, Z., Huang, C., Yuan, Q. ve Zheng, X. (2022) The relationship between the rheological behavior and interlayer bonding properties of 3D printing cementitious materials with the addition of attapulgit, *Construction and Building Materials*, 316, 125809. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125809
42. Yuan, Q., Zhou, D., Huang, H., Peng, J. ve Yao, H. (2020) Structural build-up, hydration and strength development of cement-based materials with accelerators, *Construction and Building Materials*, 259, 119775. doi.org: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119775
43. Zhang, C., Hou, Z., Chen, C., Zhang, Y., Mechtcherine, V. ve Sun, Z. (2019) Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content, *Cement and Concrete Composites*, 104, 103406. doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.103406
44. Zhang, C., Nerella, V. N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V. ve Banthia, N. (2021) Mix design concepts for 3D printable concrete: A review, *Cement and Concrete Composites*, 122, 104155. doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104155
45. Zhang, D. W., Wang, D. M., Lin, X. Q. ve Zhang, T. (2018) The study of the structure rebuilding and yield stress of 3D printing geopolymers, *Construction and Building Materials*, 184, 575-580. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.233

