



Makale / Research Paper

3D Yazıcılar İçin Tasarlanan Harçlarının Ekstrüde Edilebilirlikleri

Tayfun UYGUNOĞLU^a, Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN^b

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 03200
Afyonkarahisar/TÜRKİYE, uygunoğlu@aku.edu.tr; svcnbrls@gmail.com

Received/Geliş: 03.01.2021

Accepted/Kabul: 25.01.2021

Öz: İnşaat sektöründe 3D yazıcıların kullanımı günden güne yaygınlaşmaktadır. 3D yazıcılarda kullanılan harçların yazdırılabilirlikleri için özel olarak tasarlanmaları gerekir. Bu çalışmada, 3D yazıcı için tasarlanan harçların ekstrüde edilebilirliği araştırılmıştır. Bağlayıcı olarak çimento kullanılan harçlar, maksimum tane boyutu 0.4 mm olan agregalarla ve 0.33, 0.35, 0.37 su/çimento oranlarında hazırlanmıştır. Harçlar ekstrüzyon cihazında 50-200 mm/dk hız aralıklarında ve dairesel ve dikdörtgen çıkış ucu kullanılarak ekstrüde edilmişlerdir. Çalışmada, RAM tipi ekstrüzyon kullanılmıştır. Harçların ekstrüzyon cihazından çıkış yaptıktan sonra kesintisiz bir şekilde akabilme uzunlukları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, ekstrüzyon hızının artmasıyla birlikte harçların kesintisiz bir şekilde akabilmeleri sağlanmıştır. Diğer yandan, daha büyük kesit alanına sahip olan dikdörtgen çıkış ucuyla ekstrüde edilen harçlar dairesel uçlarla ekstrüde edilenlere göre daha kesintisiz bir şekilde elde edilebilmişlerdir. 3D yazıcı harçlar için hem kesintisiz ekstrüde edilebilen hem de konulduğu yüzeyde dağılmayan harçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: 3D yazıcı, harç, ekstrüzyon.

Extrudability of Mortars Designed for 3D Printers

Abstract: The use of 3D printers in the construction industry is increasing day by day. The grout used in 3D printers must be specially designed to be printed. In this study, the extrudability of mortars designed for 3D printing was investigated. Mortars using cement as binder were prepared with aggregates with a maximum particle size of 0.4 mm and at a water / cement ratio of 0.37. The mortars were extruded in the extruder at speeds of 50-200 mm / min using a circular and rectangular outlet. RAM type extrusion was used in the study. The continuous flow length of the mortars after exiting the extruder was measured. According to the results, with the increase of the extrusion speed, the continuous flow of the mortars was achieved. On the other hand, mortars extruded with a rectangular exit end could be obtained more seamlessly than those extruded with circular ends. For 3D printer mortars, mortars that can be extruded continuously and do not disperse on the surface were obtained.

Keywords: 3D Printer, mortar, extrusion.

1. Giriş

Yapıların daha az zamanda daha az insan gücü ile düşük maliyetle yapılması, çevreye duyarlı ve enerji verimli olması isteği farklı üretim teknikleri arayışına yönlendirmiştir. Bu üretim tekniklerinde de en son teknoloji 3D baskı yazıcılarıdır. Endüstriyel alanda birçok olumlu gelişmeye imza atan 3D baskı yazıcılar inşaat sektörüne de yeni bir boyut kazandırmıştır [1]. Çimentolu malzemeler için yeni katkı üretim yöntemleri, inşaat endüstrisinde otomasyonu artırmak için yüksek bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte, bu yöntemler, imalat işleminin belirli özelliklerine ilişkin

Bu makaleye atıf yapmak için

Uygunoğlu, T., Barlas Özgüven, S., "3D Beton Yazıcılar İçin Tasarlanan Harçlarının Ekstrüde Edilebilirlikleri" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8(1); 410-420.

How to cite this article

Uygunoğlu, T., Barlas Özgüven, S., "Extrudability of Mortars Designed for 3D Concrete Printers" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8(1); 410-420.

ORCID ID (0000-0003-4382-8257)

performans gereksinimlerini karşılayan yeni malzemeler geliştirilmesini gerektirmektedir [2]. Bu malzemelerin uygun karakterizasyon yöntemleri halen birçok araştırmacı tarafından araştırılmaktadır [3]. Bu yöntemlerden birisi de harçların ekstrüzyon yöntemiyle yazdırılmasıdır. Ekstrüzyon harçları günümüz teknolojisinde üç boyutlu yazıcılarda baskı harcı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu harçların sahip olması gereken en önemli özellikleri ise baskı sonrası tiksotropik davranış sergilemeleri ve bu davranışı üst katmanlar altında korumaya devam etmeleridir [4]. Özellikle 3D baskı olarak da bilinen inşaat endüstrisindeki Eklemeli İmalat (EM), yapıları kontrollü, genellikle katman bazında, malzeme ekleyerek imal eden üretim teknolojisi olarak tanımlanabilir [5]. Genel olarak, doğrudan dijital tasarım yöntemiyle bir nesne üreten ve robot teknolojisi tabanlı ekipmanla uygulanan eklemeli imalat yöntemi, günümüzde polimerler [6], köpükler [7], cam [8], kereste [9] ve çelik gibi malzemeleri filament olarak kullanmaktadır. İnşaat teknolojisinde ise bu filamentlerin yerini harç veya beton almaktadır [10].

Son zamanlarda, 3D baskı en popüler katkı üretim teknolojilerinden biri haline gelmiştir. Bu teknoloji ile günümüzde moda, gıda, otomotiv, medikal ve inşaat gibi çeşitli uygulamalar için birçok bileşenler üretilmektedir [11]. Son yıllarda, otomasyon da inşaat alanında giderek daha yaygın hale gelmiştir [12]. Ekstrüzyon baskı, çimento esaslı malzemeleri basmak için en başarılı yöntemdir, ancak yine de malzemelerin pompalanabilirliği, inşa edilebilirlik, malzemelerdeki tutarlılık, akışkanlık ve işlenebilirlik gibi önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorlukları aşmak amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Ekstrüzyon baskı tekniği, katmanlı bir yapıyı basmak için bir çerçeveye bağlı bir nozülün çimentolu bulamacı ekstrüde eden bir ekstrüderden oluşur. İnşaat alanında bu tekniğin ilk çalışmaları Le vd. [13] tarafından yapılmaya başlanmıştır.

Shakor vd. [14] çimentolu 3D harç karışımının oranlarının yazdırılabilir ve mekanik özelliklerini araştırmak için birtakım testler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, 3D baskı harcın optimum mekanik özelliklerini elde etmek ve baskı işlemi sırasında karışık çimentolu harç için uygun akışkanlık ve tutarlı işlenebilirlik elde etmek için otomasyonla bağlantılı olarak 3D baskılı fiber takviyeli çimentolu harç prizmalarının ve elemanlarının özelliklerini araştırmaktadır.

Buswell vd. [4], dairesel, oval ve dikdörtgen şeklinde kullanılan farklı ekstrüzyon nozullarından bahsetmişler, ancak nozüller arasındaki farklılıklar için pek fazla ayrıntı vermemişlerdir. Mümkün olan en yüksek katmana ve gerekli şekle ulaşmak için uygun bir nozüle sahip olmanın gerekli olduğu belirtilmiştir. Dairesel nozulun, harcı yazdırırken nozul açısını değiştirmek için daha fazla kolaylık sağladığını savunmuşlardır [15]. Kwon [16] tarafından yapılan çalışmada kare şekilli nozülün elips tipinden daha iyi bir yüzey kalitesine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Lim ve ark. [17], çapları 4–22 mm olan dairesel nozul kullanmışlar ve yapılan çalışmalar sonucunda optimum nozul çapının 9 mm olması sonucuna ulaşmışlardır.

Bununla birlikte, taze harç işlenebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesi genel olarak akış özelliklerine dayandırılmıştır [15]. Ayrıca, yazdırılabilirlik için henüz tam olarak bir işlenebilirlik ölçütü belirlenmemiştir. Yazdırılabilir harçların tasarımı, geleneksel betonlardan farklıdır. 3D harçlardaki gereksinimler harcın sertleşmiş özellikleriyle sınırlı değildir. Bu harçlarda ekstrüde edilebilirlik ve şeklini koruma gereksinimleri de karşılanmalıdır. Diğer bir ifadeyle, harcın ekstrüzyondan akışı sırasında aşırı baskı kullanmadan ve kopmalar ve/veya boşluk oluşmadan baskı sisteminden geçebilecek kadar işlenebilir olmalıdır. Bir diğer husus da yazdırıldıktan sonra mümkün olduğunca üzerine gelen katmanları taşıyabilmeli ve katman sayısı istenilen kadar yükseltilebilmelidir [18]. Altta kalan katmanlar deformasyon yapmadan stabilitesini koruyabilmelidir. Dolayısıyla her iki gereksinim de karşılandığında, harcın yazdırılabilir olduğu düşünülebilir. Tay vd. [19], farklı bileşenlerle 3D yazıcı için harçlar tasarlamışlar ve bu harçların hem yazdırılabilir özelliklerini katman sayısı ve yazdırılan şekildeki harcın işlenebilirliğini hem de aynı harçların yayılma tablasında yayılma değerlerini belirlemişlerdir (Şekil 1). 3D yazdırılabilir harç için en iyi kıvama sahip olabilmesi için yayılma değerinin 130-210 mm arasında değerler

alması önerilmiştir. Bazı harç tasarımlarında katman sayısı arttırılabilmişken, bu harçların yazdırılmasında kesintiler ve boşluklar oluştuğu belirtilmiştir. Dolayısıyla, tasarlanan harçların sadece birbiri üzerinde durması değil, aynı zamanda kesinti olmadan yazdırılabilmesi gereklidir. Literatürde bu konuda yapılmış az sayıda çalışma bulunmaktadır.



Şekil 1. 3D yazıcıyla ekstrüde edilmiş harçların katman sayıları (a: 20; b: 27; c: 30; d: 18; e: 13; f: 6) [19]

Harçların ekstrüde edilebilirliği üzerine Figueiredo vd. [20] de bazı çalışmalar yapmışlardır. Toplamda 12 farklı harç tasarımı yapılan çalışmada polivinil alkol (PVA) liflerin kullanımı da denemiştir. Bu tasarımlarda üç tanesi hem yazdırılabilir hem de 5 m mesafeye pompalanabilir olarak elde edilmiştir. Tasarlanan karışımların çoğu başlangıçta ekstrüde edilirken kopma davranışı gösterirken, bu karışımlara PVA lif ilave edildiklerinde kopmadan ekstrüde edilebilmişlerdir. Dolayısıyla, harçların uygun bir işlenebilirliğe sahip olup 3D yazıcılarda baskılanabilmeleri için ekstrüde edilebilirlikleri ön plana çıkmaktadır. Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda, bu çalışmada, 3D baskı harcı tasarımında üst üste gelen katmanların deforme olmadan daha fazla katman taşıyabilmeleri için literatürde verilen çalışmalardan farklı olarak harçların farklı baskı hızlarında ekstrüde edilebilirliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalar harçlar üzerinde gerçekleştirilmiş olup, bağlayıcı olarak TS EN 197-1 [21] standardına uygun olan çimento CEM I 42.5 Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül yüzey alanı $3320 \text{ cm}^2/\text{g}$ olup, özgül ağırlığı 3.1'dir. Çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Çimentonun kimyasal bileşenleri

Bileşen, %	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	KK
Çimento	63.6	19.6	4.72	3.27	1.91	0.34	1.06	4.72	2.69

Harç üretimlerinde agrega olarak da 0.5-400 mikron aralığında silis kumu kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı da 2.64'tür. Yine harcın oluşturulabilmesi için şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.2. Harç Üretimleri

3D yazıcılar için harç tasarımı ve ekstrüde edilebilirliği için çimento, kum ve su bileşenler olarak karıştırılmış ve harç elde edilmiştir. Harçlar, 0.33, 0.35 ve 0.37 su-çimento oranlarında

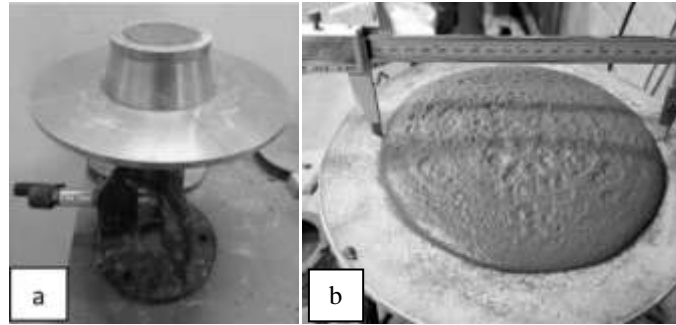
hazırlanmışlardır. Bileşenlerin belirlenmesinde ön denemeler sonucunda agrega:çimento oranları her su-çimento oranı için ağırlıkça 0.75:1.0 olarak seçilmiştir. Özellikle agrega miktarı bu oranın üzerinde kullanıldığında harçlar ekstrüde edilememiştir. Her üç bileşen (agrega, çimento, su) bir kap içerisinde homojen hale gelinceye kadar spatula ile karıştırılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Harçların hazırlanmasından bir görünüm

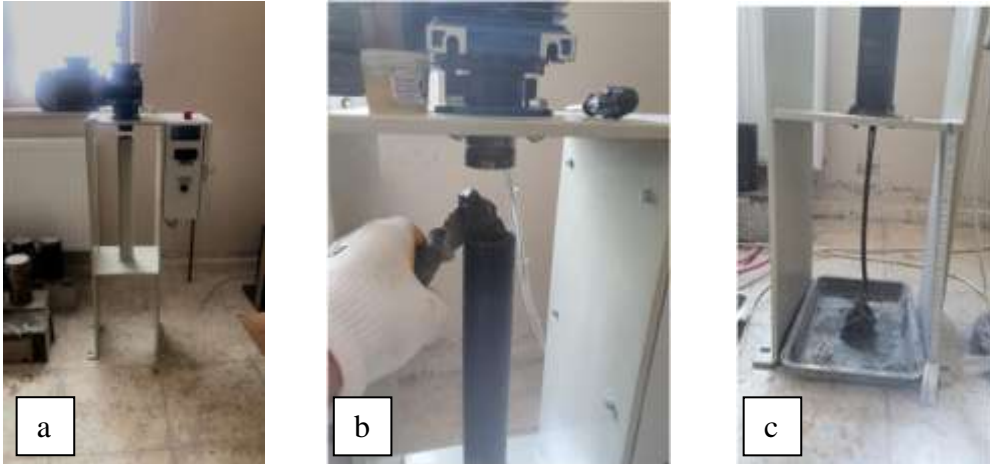
2.3. Yapılan deneyler

Harç karışımları yapıldıktan sonra öncelikle işlenebilirlik kontrolü amacıyla yayılma tablasında harçların yayılma özellikleri belirlenmiştir. Bunun için harçlar yayılma tablası üzerinde tablanın bir bölümü olan mini koni içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.a). Koni yukarı doğru çekildikten sonra, tablanın altındaki kol vasıtası ile 15 vuruş yaptırılarak harca darbe uygulanmış ve bu sarsıntıyla tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Yayılan harcın birbirine dik doğrultuda yayılma çapları ölçülerek aritmetik ortalaması alınmıştır (Şekil 3.b).

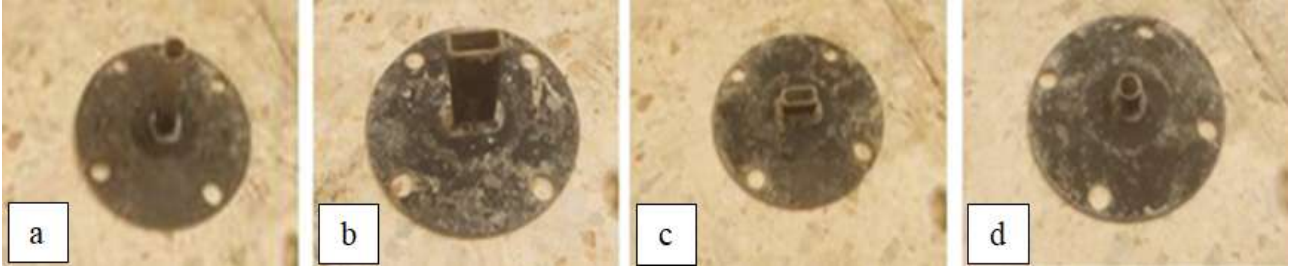


Şekil 3. a) Harcın yayılma tablasında görünümü; b) yayılan harç üzerinde çap ölçümü

Yayılma deneyinden sonra ekstrüde edilebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ekstrüzyon cihazında (Şekil 4) tıkanma yapmadan ve kopmadan akabilen uygun kıvamlı harçların tasarımı üzerinde durulmuştur. Ekstrüzyon cihazı olarak RAM tipi ekstrüzyon kullanılmıştır. Hazırlanan harç cihazın haznesine konduktan sonra 50-300 mm/dk arasında altı farklı hız değerlerinde harca piston ile itme kuvveti uygulanmış ve daha küçük çaplı çıkıştan sürekli akması hedeflenmiştir (Şekil 4). Cihazın hazne çıkış ucu yerden 400 mm yüksekliktedir. Harcın nozülünden çıktuktan sonra aşağı doğru kopmadan akabildiği uzunluk değeri akış sırasında bir metre ile ölçülerek kaydedilmiştir. Çıkış ucu olan nozul boyutu olarak da 10 mm çapında ve 40 mm uzunluğunda dairesel uzun uç; 10x15 mm kesitli ve 40 mm uzunluğunda dikdörtgen uzun uç kullanılmıştır. Bunlara ilaveten çıkış ucu etkisini görmek için aynı kesitlerin (daireysel ve dikdörtgen) 10 mm uzunluğa sahip kısa uçları da kullanılarak toplamda 4 farklı nozul şekli deneysel çalışmalarda cihazda denenmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. Proje kapsamında tasarlanarak yaptırılan ekstrüzyon ünitesi
(a: Ekstrüzyon cihazı; b: cihaz haznesi; c: harç akışı)

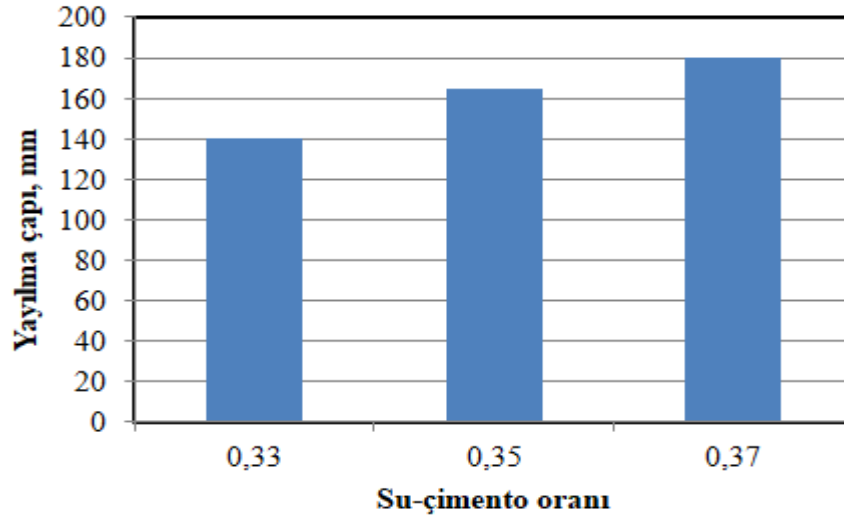


Şekil 5. Harçların ekstrüzyonunda kullanılan nozul şekilleri
(a: dairesel uzun; b: dikdörtgen uzun; c: dairesel kısa; c: dikdörtgen kısa)

Deneysel çalışmalar kapsamında, üç farklı su-çimento oranı, 6 farklı hız değeri ve 4 farklı nozul şekli olmak üzere 72 farklı harç verisi kaydedilmiştir. Her bir su-çimento değeri için, harçların Brookfield DV-II model Viskozimetre cihazı ile cihazın kapasitesi ölçüsünde 75-200 dev/dk kayma hızı değerlerinde görünen viskozite değerleri de ölçülmüştür. Viskozite ölçümleri laboratuvar ortam sıcaklığında ve V-72 nolu kanat şeklindeki uç kullanılarak yapılmıştır.

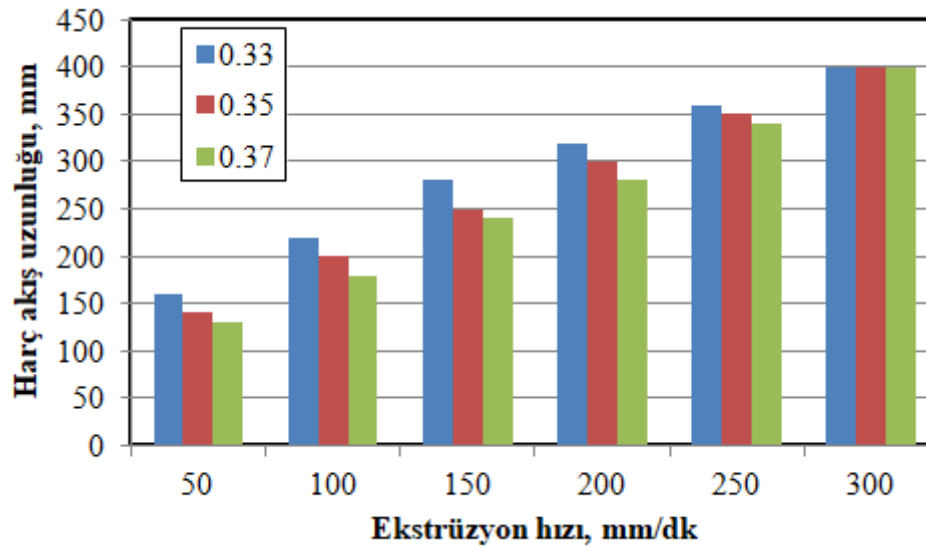
3. Deney Sonuçları

Her bir harç hazırlandıktan sonra yayılma tablası üzerinde darbeli yayılma deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen yayılma çaplarının ortalaması Şekil 6'da su-çimento (s-ç) oranına bağlı olarak verilmiştir. En düşük s-ç oranındaki harcın yayılma değeri 140 mm iken, 0.35 ve 0.37 s-ç değerlerindeki harçlarda sırasıyla 165 mm ve 180 mm yayılma elde edilmiştir. Harç bileşimindeki su miktarının artmasıyla agrega ve çimento tanecikleri arasındaki iç sürtünme azalarak harcın işlenebilirliği de artmış ve bu da yayılma tablası üzerinde daha yüksek yayılma değerlerinin alınmasını sağlamıştır. Yayılma değerleri açısından literatürle karşılaştırıldığında, Tay vd. [19] tarafından kopma olmadan 3D yazdırma için önerilen yayılma değerleri arasında kaldığı görülmektedir.



Şekil 6. Harçların yayılma değerleri

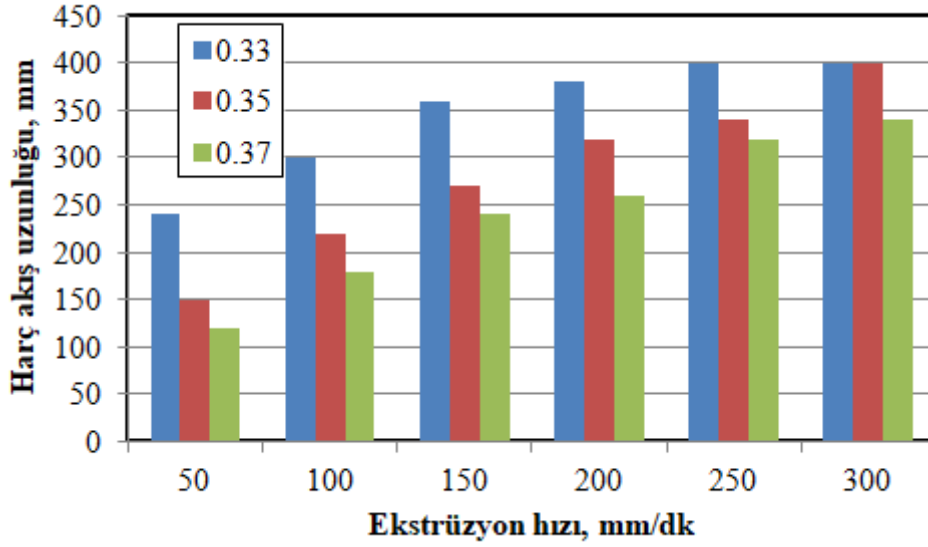
Ekstrüzyon cihazında nozul şekli olarak uzun dairesel çıkış ucu kullanıldığında, hız değerlerine bağlı olarak harçların akış uzunluğu Şekil 7'de görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, hazne çıkış ucunun yerden yüksekliği 400 mm olduğundan, harçların bu uzunluk değerinde akabilmeleri hedef değerler olmuştur. Ekstrüzyon hızı değerlerinin artmasıyla tüm s-ç oranlarındaki harçların akış uzunluğu da düzenli bir şekilde artmıştır. Düşük hız değerlerinde ekstrüde edilen harçlar kesikli bir şekilde akmışlardır. Ekstrüde edilebilirlik sırasında hızın düşük olması durumunda, baskı sırasında harcın itilmesi yavaş olduğundan akmaya başlayan harç birim ağırlığının ve yerçekiminin etkisiyle de belirli mesafelerde koparak akabilmiştir. Bu kopma mesafeleri, diğer bir ifadeyle akış uzunlukları, 0,33 s-ç oranında diğer s-ç oranlarındaki harçlara göre daha yüksek elde edilmiştir. Tüm s-ç oranındaki harçlar 300 mm/dk ekstrüzyon hızı değerinde kopmadan sürekli olarak akabilmişlerdir.



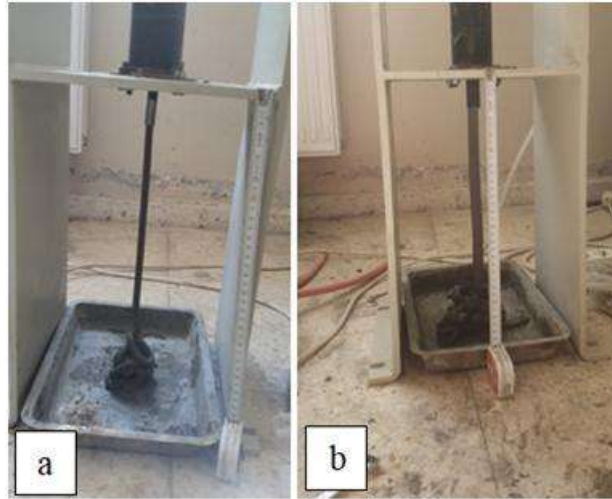
Şekil 7. Harçların dairesel uzun uçtan ekstrüde edilebilirliği

Nozul olarak dikdörtgen uzun uç kullanıldığında da dairesel uzun uçtaki gibi hız değerlerinin artırılmasıyla akış uzunluklarında artışlar elde edilmiştir (Şekil 8). Ancak farklı bir durum olarak, s-ç oranının 0,35 ve üzerinde kullanılmasıyla ekstrüzyon hız değerlerindeki harçların akış uzunluğu

0.33 s-ç oranlarına göre belirgin bir şekilde daha az olduğu görülmektedir. Buna ilaveten, 300 mm/dk hız değerinde iki harcın kesintisiz akabildiği, s-ç oranı 0.37 olan harçlarda 340 mm uzunluğunda akabildiği görülmektedir. Bir diğer husus da aynı çıkış uzunluğundaki dairesel kesitli ucun kullanıldığı harçlara göre daha uzun akışlar elde edilmiştir. Bunun nedeni, çıkış kesit alanının dairesel uca göre daha fazla olmasıdır. Ancak s-ç oranının artmasıyla birlikte harcın işlenebilirliği artmış ve iç çekim kuvveti olan kohezyonun azalmasıyla harcın akış sırasında daha kolay kopmasına neden olmuştur [20]. Dolayısıyla ekstrüzyon deneyi ile tasarlanacak harçların kohezyon özeliğinin de belirlenebileceği görülmektedir. Hem dairesel hem de dikdörtgen kesitli uzun uçlardan harcın kesintisiz akış görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir.

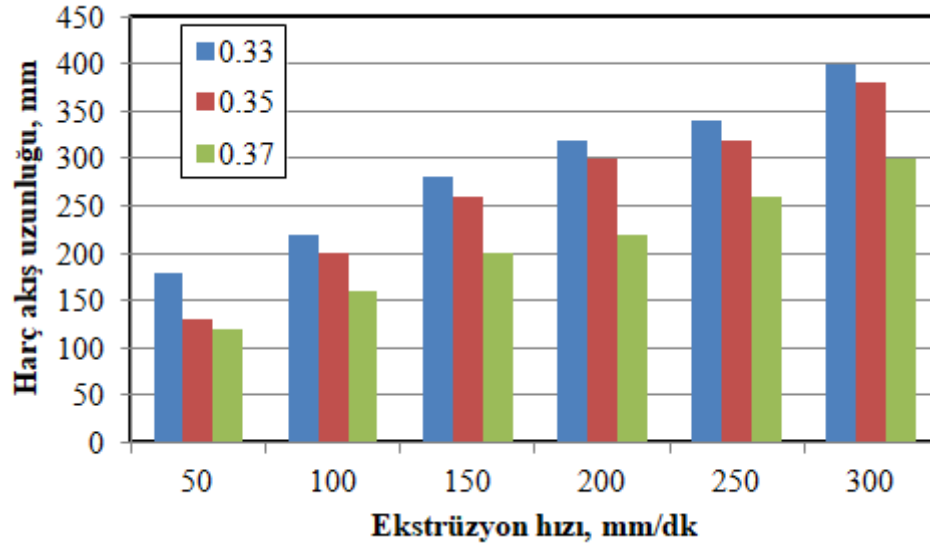


Şekil 8. Harçların dikdörtgen uzun uçtan ekstrüde edilebilirliği

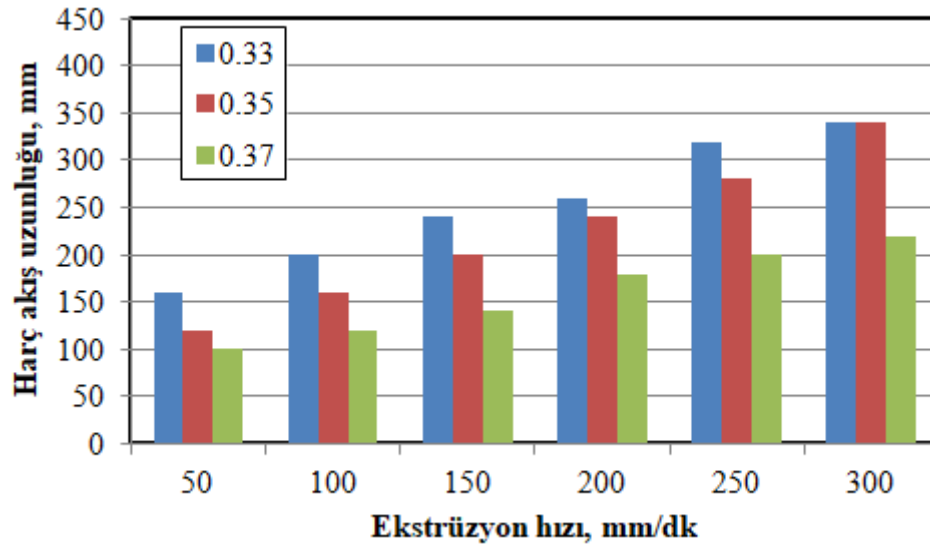


Şekil 9. Kopmadan ekstrüde edilen harçlardan (s-ç: 0.33) bir görünüm
(a: uzun dairesel uç; b: uzun dikdörtgen uç)

Ekstrüzyon cihazında kısa çıkış ucu kullanılması durumunda aynı kesit alanına sahip uzun uçlarda elde edilen akış değerlerine göre daha düşük harç akış uzunlukları elde edilmiştir (Şekil 10 ve Şekil 11). Kısa uçlu nozullarda harcın daha kısa nozul içerisinde ilerleyerek doğrudan aşağı doğru yer çekimine maruz kalmasından dolayı diğer uzun uçlara göre nispeten daha kısa akış uzunlukları elde edilmiştir. Kesit alanının artması da bu duruma eklendiğinde, dikdörtgen kesitli kısa uçlarda dairesel kısa uçlara göre daha düşük akış uzunluklarının elde edildiği grafiklerden açıkça görülmektedir.

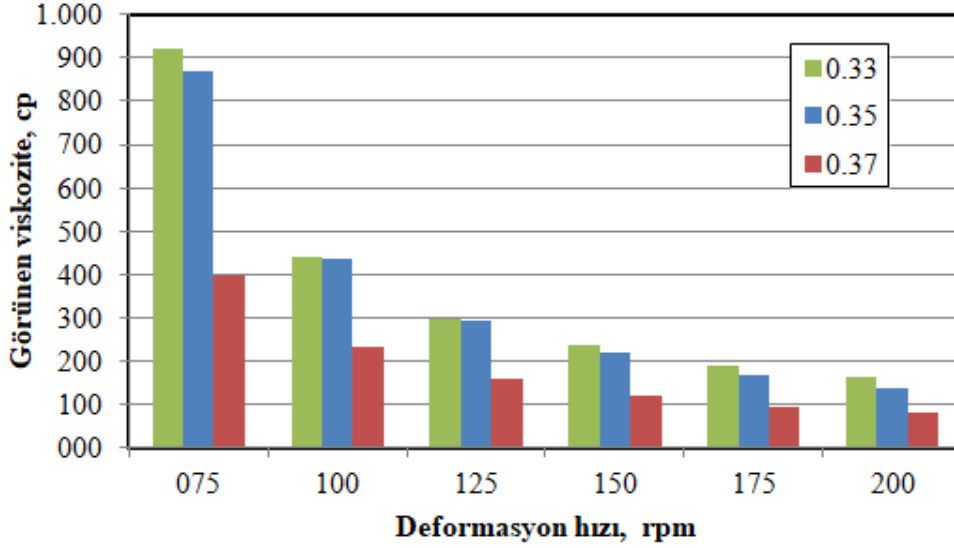


Şekil 10. Harçların dairesel kısa uçtan ekstrüde edilebilirliği



Şekil 11. Harçların dikdörtgen kısa uçtan ekstrüde edilebilirliği

Her s-ç oranı için harçların farklı deformasyon hızlarındaki görünen viskoziteleri Şekil 12'de verilmiştir. Bütün deformasyon hızları için düşük s-ç oranlarında (0.33 ve 0.35) yakın değerler elde edilirken, s-ç oranının 0.37 olmasıyla harçların tanecikleri arasındaki iç sürtünmenin azalmasıyla daha düşük görünen viskozite değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Deformasyon hız değerinin artmasıyla da artan kayma gerilmelerinden dolayı bütün harçların viskozite değerleri azalmıştır. Ekstrüzyon cihazında en fazla akış uzunlukları yüksek ekstrüzyon hızlarında elde edildiğinden, harçların 200 rpm civarındaki viskozite değerlerinin de genel olarak 100-200 cp arasında kalması önerilebilir. Özellikle uzun dairesel ve dikdörtgen uçlarda bu hız değerlerinde 350 mm üzerinde önemli bir akış uzunluğunun elde edildiği görülebilir.



Şekil 12. Harçların görünen viskoziteleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, çimento esaslı 3D harç yazıcılar için farklı tipte nozullardan ekstrüzyon yöntemiyle yine farklı s-ç oranlarında hazırlanan harçların kopmadan akabilme yetenekleri araştırılmış ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Harçların s-ç oranı arttırıldığında, iç sürtünme etkisinin azalmasından dolayı yayılma tablasında daha fazla işlenebilirlik elde edilmiştir.
- Ekstrüzyon hızı arttırıldığında, çıkış ucundan bağımsız düşünüldüğünde, tüm harçların akış uzunlukları fark edilir derecede artmıştır.
- Uzun dikdörtgen uçlarda dairesel uçlara göre kesit alanının daha fazla olmasından dolayı, daha kesintisiz harç akışları elde edilebilmiştir. Ancak kısa uçlarda, dairesel olanlarda daha uzun harç akışları ölçülmüştür.
- Özellikle kısa uçlarda hem dairesel hem de dikdörtgen uç tiplerinde harçların akış uzunlukları uzun uç tiplerine göre daha düşük değerler almıştır.
- Harçların s-ç oranı düşük iken kohezyonun yüksek olmasından dolayı yer çekimi etkisi altında bile yüksek ekstrüzyon hızlarında 400 mm mesafede kopmadan sürekli akış sağlanabilmiştir. S-ç oranının artmasıyla harçların sürekli akışı kaybolmaya başlamıştır.

Sonuç olarak, 3D yazıcılar için hem uygun işlenebilirliğe sahip hem de kohezyonu yüksek olup yazdırıldıktan sonra üste gelen katmanlar altında deforme olmaması için mümkün olduğunda düşük su-çimento oranında harçların üretilmesi gerekmektedir. Böylece hem akış sırasında kesintisiz veya kopmadan harç yazdırılması işlemi gerçekleşecek hem de alt tabakalardaki deformasyon sorunu en aza indirilecektir.

Teşekkür

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 19.FEN.BİL.37 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., Salet, T., Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual Phys. Prototyp.* 2016, 11, 209-225.
- [2] Ramirez, R.R., Alarcón, L.F.C., Knights, P., Benchmarking system for evaluating management practices in the construction industry, *Journal of Management in Engineering* 20 (3) (2004) 110-117.
- [3] Nerella, V.N., Ogura, H., Mechtcherine, V., Incorporating reinforcement into digital concrete construction, *Proceedings of the IASS Symposium 2018 Creativity in Structural Design*, Boston, 2018.
- [4] Buswell, R.A., Leal de Silva, W.R., Jones, S.Z., Dirrenberger, J., 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cem. Concr. Res.* 2018, 112, 37–49.
- [5] Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., Malek, S., Review of Emerging Additive Manufacturing Technologies in 3D Printing of Cementitious Materials in the Construction Industry. *Front. Built Environ.* 2019, 4.
- [6] De Leon, A.C., Chen, Q., Palaganas, N.B., Palaganas, J.O., Manapat, J., Advincula, R.C., High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications, *Reactive and Functional Polymers* 103 (2016) 141-155.
- [7] Murr, L.E., Gaytan, S.M., Medina, F., Martinez, E., Martinez, J.L., Hernandez, D.H., Machado, B.I., Ramirez, D.A., Wicker, R.B., Characterization of Ti-6Al-4V open cellular foams fabricated by additive manufacturing using electron beam melting, *Materials Science and Engineering A* 527 (7-8) (2010) 1861-1868.
- [8] Luo, J., Pan, H., Kinzel, E.C., Additive manufacturing of glass, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 136 (6) (2014) 061024.
- [9] Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinarska, A.A., Gramazio, F., Kohler, M., Robotic timber construction expanding additive fabrication to new dimensions, *Automation in Construction* 61 (2016) 16-23.
- [10] Uygunoğlu, T., Barlas Özgüven, S., Topçu, İ.B., 3D teknolojisi ile yapı malzemesi üretimindeki gelişmeler, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 3:3 (2019) 279-288.
- [11] Soltan, D.G., Li, V.C., A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing, *Cement and Concrete Composites* 90 (2018) 1-13.
- [12] Panda, B., Paul, S.C., Tan, M.J., Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material, *Materials Letters* 209 (2017) 146-149.
- [13] Le, T.T., Austin, S.A., Lim, S., Buswell, R.A., Gibb, A.G.F., Thorpe, T., Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Mater. Struct.* 2012, 45, 1221-1232.
- [14] Shakor, P., Nejadi, S., Paul, G., A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar, *Materials* 2019, 12, 1708, 1-23.
- [15] Li, X., Zhou, R., Yao, W., Fan, X., Flow characteristic of highly under expanded jets from various nozzle geometries. *Appl. Therm. Eng.* 2017, 125 (Suppl. C), 240–253.
- [16] Kwon, H. *Experimentation and Analysis of Contour Crafting (CC) Process Using Uncured Ceramic Materials*; University Of Southern California: Los Angeles, CA, USA, 2002.
- [17] Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Wackrow, R., Austin, S.A., Gibb, A.G.F., Thorpe, T. Development of a viable concrete printing process. In *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, (ISARC2011)*, Seoul, Korea, 29 June–2 July 2011; pp. 665–670.
- [18] Marchment, T., Sanjayan, J. Method of Enhancing Interlayer Bond Strength in 3D Concrete Printing. In *Proceedings of the 1st RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Zurich, Switzerland, 10–12 September 2018; Springer: Zurich, Switzerland, 2019; pp. 148–156.

- [19] Tay, Y.W.D., Qian, Y., Tan, M.J., Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test, *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174, 106968, 1-9.
- [20] Figueiredo S.C., Rodriguez C.R., Ahmed Z.Y., Bos D.H., Xu Y., Salet T.M., Copurođlu O., Schlangen E., Bos F.P., An approach to develop printable strain hardening cementitious composites, *Materials and Design* 169 (2019) 107651, 1-17.
- [21] TS EN 197-1, 'imento- Bölüm 1: Genel imentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri', Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2012).