



İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ 3D TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN HARÇLARIN REOLOJİK ÖZELİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Tayfun Uygunoğlu^{a*}, Sevcan Barlas Özgüven^b

^{a,b}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

*Sorumlu Yazar: uygunoglu@aku.edu.tr

(Geliş/Received: 14.06.2019; Düzeltme/Revised: 24.08.2019; Kabul/Accepted: 29.08.2019)

ÖZET

İnsanoğlu var olduğu günden beri temel ihtiyaçlarından biri olan barınma ihtiyacını karşılamak için sürekli yeni arayışlar içinde olmuştur. Günümüz teknolojisi ile yapı üretim aşamasına gelinceye kadar geçen bir milyonu aşkın sürede insanlar barınma ihtiyaçlarını çok farklı yöntemlerle gerçekleştirmiştir. Başlangıçta insanlar doğada hazır bulunan ortamları barınak olarak kullanmışlardır. Zamanla toplumsal ve bilimsel birikimleri, teknolojik olanakları kullanarak barınak yapmada değişim ve dönüşüm yaşamışlardır. Yapılar daha çok geleneksel üretime dayalı olarak yapılmasına rağmen teknolojik gelişmeler bu sektörü de dönüştürmeye başlamıştır. 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 en son teknoloji 3D baskı yazıcılarıdır. Endüstriyel segmentte birçok olumlu gelişmeye imza atan 3D baskı yazıcılar inşaat sektörüne de yeni bir boyut kazandırmıştır. Bu çalışmada betonun zaman içinde gelişiminden bahsedilmiştir. Geleneksel yapı üretiminde yaygın olarak kullanılan betonun ve 3D baskı yazıcı da kullanılan harcın taze (reolojik) ve sertleşmiş haldeki özellikleri, bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Son olarak da 3D baskı yazıcıların gelecekte inşaat sektörüne nasıl yön vereceği tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yapı teknolojisi, 3D baskı harcı, Reoloji

ABSTRACT

Since the day when human beings have been one of their basic requirements, we are constantly in search of accommodation needs. With more than one million people living in the vicinity of the building until the stage of production with today's technology, housing has been made in many different ways in the city. In the beginning, people used the environments available in nature as shelter. In the course of time, the social and scientific accumulation, technological guidance guide has experienced changes and transformations in shelter making. Structures were mostly made ready for traditional production. It has led the buildings to seek different production techniques that need to be environmentally friendly and energy efficient with less manpower in less time. These are the latest technology 3D printing in production techniques. 3D printing technology, which have not developed advantageously in the industrial segment, added a new dimension to the construction sector. In this study, the development of concrete in time is mentioned. Traditional structure development and general used concrete, 3D printing mortar properties as fresh (rheological) and hardened state and advantages and disadvantages of these methods have been investigated. Finally, how the construction of 3D printing technology to guide the construction industry was discussed.

Keywords: Construction technology, 3D printing mortar, rheology.

1. GİRİŞ

Yapı sektörü teknolojik yenilikleri kullanarak doğal ortamı barınak olarak kullanma noktasından günümüzdeki yüksek teknolojik mühendislik harikası yapılara ulaşmıştır [1]. Diğer taraftan inşaat endüstrisi, kayda değer miktarda kaynak tüketen ve önemli çevresel baskılar yaratan bir endüstri olarak kabul edildiği için özellikle verimlilik, çevre ve diğer hususları iki şekilde ele alan inşaat inovasyonları üzerine çalışmalar yürütülmüştür [2]. 21. Yüzyılda ise yapı sektörüne yeni bir teknoloji olan 3D baskı yazıcılar dahil olmuştur. İlk olarak Chuck Hull'un 1983 yılında icat ettiği katman kontrolüne sahip otomatik bir üretim prosesi olan 3-D baskı, son yıllarda hızlı bir gelişme göstermiştir. 3D baskı yazıcı ile otomatik yapı üretim teknolojisi, robotik temelli olup katmanlı bir üretim teknolojisidir [3]. Bu üretim teknolojisi, özel mimari tasarım elemanları ya da büyük ölçekli yapı elemanlarını kalıp kullanmaksızın katman şeklinde üretebilmeye olanak sağlamaktadır. Bir bileşenin geometrik karmaşıklığı 3D baskı yazıcıda önem taşımamakta ve üretim sürecine herhangi bir ek maliyet getirmemektedir. 3D baskı yazıcıda kullanılan harçta farklı malzemelerin kullanılabilmesi, kalıpsız serbest biçimli yapıların oluşturulması, daha az insan gücüne rağmen daha hızlı üretilebilmesi ve inşaat maliyetini azaltması katman bazlı üretim tekniğini konvansiyonel metoda göre avantajlı kılmaktadır. Ayrıca katmanlı yapı üretim teknolojisinde CO₂ emisyonu ve enerji sarfiyatının da düşmesi nedeniyle inşaat endüstrisine önemli faydalar sağlayacağı öngörüldüğünden, 3D baskı yazıcılara yönelik bilimsel araştırmalar ve ticari faaliyetler gün geçtikçe artmaktadır [4-6]. Bununla birlikte, inşaat sektöründe 3D baskı yazıcı uygulanmasına ilişkin araştırmaların henüz başlangıç aşamasında olduğu unutulmamalıdır. 3D yazıcının inşaat sektörüne getirebileceği potansiyelin tamamını keşfetmek için birçok yeni deney yapılmaya devam etmektedir. Ancak katmanlı yapı üretim teknolojisinde kullanılacak harcın özellikleri hakkında çalışmalar oldukça azdır. 3D baskı yazıcıda kısa sürede üst üste binen katmanlar şeklinde beton dökümü yapıldığı için beton harcın reolojik özellikleri çok önemli olmaktadır [7]. Üst üste gelen katmanlar yıkılmadan durabilmeli ve harç katmanları birbirine kenetlenmelidir (Şekil 1).



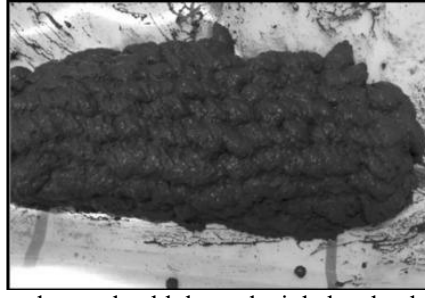
Şekil 1. 3D baskı yazıcı ile katmanlı üretim denemesi.

Bu makalede, beton harcının 3D baskı malzemesi olarak kullanabilmesi için bileşen özellikleri ile taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri araştırılmıştır.

2. 3D BASKI HARÇ BİLEŞENLERİ

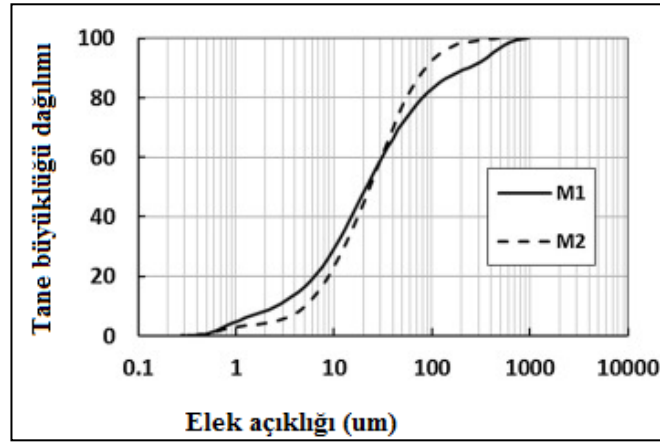
2.1. Agregalar

Agregalar, 3D baskı yazıcı üretim sürecinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Beton harç karışımında kullanılan agrega tipi ve büyüklüğü yapının yük taşıma dayanımına katkıda bulunur. Baskı yazıcının ucunda bulunan nozulun boyutları 20-40 mm arasındaki ölçekte değişiklik gösterir [8]. Bu nedenle seçilen agrega boyutunun ekstrüzyon sırasında herhangi bir bloke oluşturmaması için agrega boyutlarının 4-6 mm'den büyük olmaları tercih edilmez [9]. Akışkan tabaka varsayımıyla çimento hamurunun agregalar tarafından sürüklendiği açıklansa da gerçekte bloklaşma sırasında çimento hamuru iri agregalardan kolayca ayrılabilir. Karışımında daha büyük boyutlu agregaların kullanılması yazdırılan katmanlarda kararsızlığa neden olarak yapı oluşumunun çökmesine neden olur (Şekil 2). Ayrıca basılı yapının daha estetik olması için birçok araştırmacı genellikle iri agrega yerine ince agrega kullanımı önerilmektedir. Çünkü iri agregalar basılı yapı yüzeyinde düzgün bir görüntü oluşturmazlar [10].



Şekil 2.Nozulda meydana gelen bloke nedeniyle basılan katmanların çökmesi

Literatürde, granüler malzemenin bir silo deliğinden akışı, laboratuvar deneyleri ve sayısal simülasyonlarla geniş çapta incelenmiştir [11]. $D_{\text{nozzle}} / D_{\text{max}}$ çap oranı, ekstrüzyon sırasında herhangi bir bloke olmayacak şekilde belirlenmelidir. Çıkış deliğinin çapı ve taneciklerin çapı arasındaki oran 4.94'den daha yüksek olduğunda silo içindeki blokenin önlenebileceği bulunmuştur (± 0.03) [8]. İnce tabakaları tıkanma ile karşılaşmadan üst üste getirmek için, daha küçük nozul açıklığı ve tane büyüklüğü kullanılmalıdır (Şekil 3).



Şekil 3. Farklı karışım bileşenlerinde tane büyüklük dağılımı.

2.2. Su/Çimento Oranı

3D baskı yazıcı ile otomatik yapı üretim sürecinde katmanlar üst üste geldiğinde alt katmanlarda hiç çökme olmaması hedeflenir. Ancak sıfır çökmeye göre dizayn edilmiş harcı, 3D yazıcının küçük nozul boyutlarından geçirmek oldukça zor olacaktır. Bununla birlikte yazdırılan katman erken dayanım kazanarak sonraki katmanı taşıyabilmelidir. Harcın akıcı kıvam kazanarak nozuldan geçirilebilmesi için su/çimento oranını artırılması dayanımı olumsuz etkileyecektir. Bu nedenle istenilen işlenebilirliği elde etmek için karışıma süper akışkanlaştırıcılar eklenmelidir. Beton kıvamı nedeniyle farklı şekil ve boyutlarda nozullar kullanılacağı için su/çimento oranı baskı işleminde kullanılan nozul tipine bağlı olarak da değişir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, süper akışkanlaştırıcı kullanılarak su/çimento oranının 0.25-0.44 aralığında tutulmasının karışıma yazdırılabilir harç özeliği kazandırdığı kanıtlanmıştır [4,12]. Su/çimento oranı 3D baskı yazıcı harcının hidrasyon işleminde önemli rol oynar. En az miktarda su ile kimyasal ve mineral katkıların kullanımı, basılan katmanın dayanım kazanıp sertleşmesi ve bir sonraki katmanın üzerine yerleştirilmesi için daha iyi bir işlenebilirlik sağlar. Bunun sonucunda 3D baskılı yapının tamamının çökmesinin önüne geçilmiş olur. Karışımın 3D baskı yazıcının nozullarından sorunsuz bir şekilde sıkılabilmesi için karışım içinde kullanılan su içerisinde yabancı maddeler bulundurmamalıdır.

2.3. Kimyasal ve mineral katkıları

Kimyasal ve mineral katkıları, beton harcın bazı özelliklerini değiştirerek performansını arttırabilmek ve beton harcın maliyetini azaltmak için kullanılmaktadır. 3D baskı yazıcı harçlarının yazdırılabilir olması için akıcı kıvamda olması gerekir. Yüksek akışkanlığa sahip malzeme ile ilgili olarak, bileşenlerin çimentolu malzemenin reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için çok sayıda araştırma

yapılmıştır. Chen vd. [13] ince çimentonun reolojik özellikler üzerindeki etkilerinin su/çimentosu oranına önemli ölçüde bağlı olduğunu bildirmiştir. Jiao'ya [14] göre, uçucu külün de reolojik özellikler ile yakın bir ilişkisi vardır. Uçucu külün çimentolu malzemenin taze reolojik özellikleri üzerindeki etkisi, şekil değişikliği ve malzeme bileşenlerinin çapına bağlı olarak çok fazla değişiklik gösterir. Çoğu durumda, uçucu kül içeriğinin eklenmesiyle malzemenin akma gerilmesi ve plastik viskozitesi artar [15]. Benaicha vd. [16], silis dumanı ile yapılan beton harç karışımların viskoz ve kompakt davranış sergiledikleri için, farklı bir reoloji elde edildiğini göstermişlerdir. Silis dumanının baskı harç karışımına eklenmesi durumunda çökme akış çapı değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir. Bu, silis dumanının, incelikleri ve parçacıklar arası sürtünmeyi artıran puzolanik özellikleri nedeniyle yüksek bir reaktiviteye sahip olduğu gerçeğine bağlanmaktadır. Bununla birlikte, silis dumanı ilave edilmiş karışımlar üzerlerine bir basınç uygulandığında akışkanlaşırlar. Viskozite, silis dumanının konsantrasyonu ile artar. Bu özellik, ayrılma görünümü riskini azaltarak bir avantaj sağlar. 3D baskı yazıcı yazdırılabilir harç karışımına, yoğunluğu düşük malzemeler eklenerek harcın yoğunluğu ve ağırlığının azaldığı belirlenmiştir [17]. Harç yoğunluğu azaltılarak altta kalan filamentin deforme olması ve çatlak oluşumunun önlenmesi hedeflenmektedir.

3. 3D BASKI TAZE HARÇ ÖZELİKLERİ

3D baskı yazıcılarda malzemenin yazdırılabilir baskı harcı olarak tanımlanabilmesi için çok spesifik reolojik özellikleri ve kimyasal gereksinimleri karşılaması gerekmektedir. Baskı işleminde kullanılacak harç, pompalanabilir kıvamda olmalı, baskı işlemi boyunca sıkılabilmeli ve şekil verilebilmelidir. Ayrıca harcın üzerine üst kat harç filamentler basıldığında şeklini kaybetmeden tutmalı ve yapışkanlığını korumalıdır [4]. Bu nedenle optimal karışımı tasarlayabilmek için belirli hedefler belirlenmiştir (Çizelge 1).

Çizelge 1. 3D baskı yazıcıda kullanılacak harç karışım hedefleri.

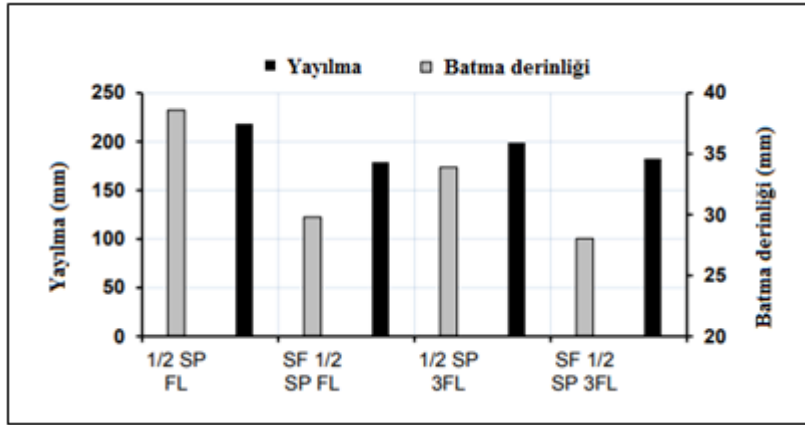
Yapılan işlem	Hedef
Maksimum basınç dayanımı	Maksimum işlenebilirlik
Sistemde akışkanlığı maksimum düzeye Çıkarmak	Harcın yazdırılması sırasında yapışmanın maksimum düzeyde tutulması
Beton ayar hızının maksimize edilmesi	Uygun ayar oranının korunarak sonraki katmanlarla bağlanmasını sağlamak

Çizelge 1'deki karışım hedeflerine bakıldığında bazıları birbirleriyle çelişiyor gibi görünmektedir. Örneğin, karışımındaki basınç dayanımını maksimum yapmak için su/çimento oranını minimum tutmak gerekir. Ancak harcın işlenebilirliğini sağlamak için içerikte belirli bir su miktarı da muhafaza edilmelidir. Bunlara ek olarak sistemdeki karışımın akıcı olması aynı zamanda da üst üste binen katmanların ağırlığının alt katmanlar tarafından tutularak erken dayanım kazanmaları beklenir. Bu nedenle basılı malzemenin yüksekliği arttıkça sertleşmesi için taze harcın reolojik özellikleri zaman içinde değişmelidir [9]. Belli bir yükseklikte, alt katmanların genişliğini korumak ve yazdırılan yapının daha fazla katmanı yazdırılırken düşmesini önlemek için sertleşmeye başlaması gerekir. Son olarak ta katmanın biri yazdırıldıktan sonra diğer katmanın baskısı için gerekli karışım, mümkün olduğunca çabuk ayarlanmalıdır. Aynı zamanda sonraki katmanla uygun bir şekilde bağlanmasına engel olacak kadar da hızlı olmamalıdır. Geliştirilen karışım bu şartları sağladığında, 3D baskı yazıcılar için uygulanabilir bir harç olduğu kabul edilir ve yazdırılabilir harç olarak adlandırılır [12]. 3D baskı yazıcılarda kullanılan yazdırılabilir harç karışımların işlenebilirliğini tayin etmek için çökme, yayılma derinliğinin ölçülmesi gibi deneyler literatürde mevcut değildir. Bu nedenle geleneksel metotla üretilen taze harç karışımlara uygulanan çökme deneyi 3D baskı yazdırılabilir harçlara uygulanmaktadır [18,19]. 3D baskı yazıcı için hazırlanan karışımın işlenebilirliğin belirlenebilmesi için çökme-yayılma deneyi TS EN1015-3'e [20] göre yapılmaktadır (Şekil 4.a). Bununla birlikte daldırma uç yöntemiyle penetrasyon deneyi de TS EN 1015-4 [21] standardına göre gerçekleştirilebilmektedir (Şekil 4.b).

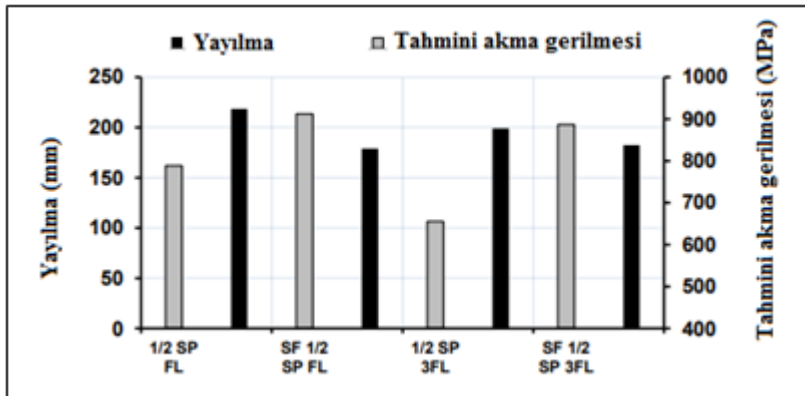


Şekil 4. 3D baskı harcında a) çökmede-yayılma ve b) batma derinliği yapılması

3D baskı yazdırılabilir harç karışımlarına silis dumanı ilavesiyle çalışmaların çoğunda, silis akma dayanımı ve plastik viskozitesinin arttığı sonuçlarına ulaşılsa da [22], Zhang vd. [23], silis dumanının akma gerilmesini ve plastik viskozitesini azalttığını göstermiştir (Şekil 5, Şekil 6). Ahari vd. [24], silis dumanının plastik viskoziteyi azaltırken akma gerilmesini artırabileceğini bildirmiştir. Bu farklılıklar iki sebebe dayandırılabilir. İlki, karışımdaki silis dumanının yüzey özellikleri ve hacim fraksiyonunun çeşitli olmasıdır. İkincisi de silis dumanı ve içerik arasındaki etkileşimin reolojik özellikleri etkilemesidir [14].

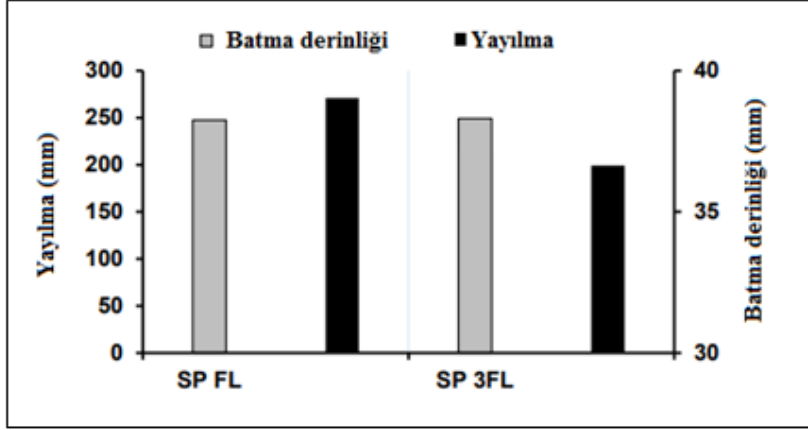


Şekil 5. Silis dumanı katkıli harçların yayılma ve batma derinliğine etkisi [23]



Şekil 6. Silis dumanı katkıli harçların yayılma ve tahmini akma gerilmesinin değişimi [23].

3D baskı yazıcı yazdırılabilir harç karışımında lif kullanılması durumunda, karışımdaki lif miktarının artmasıyla birlikte çökme miktarında azalma olduğu ancak batma derinliğinde değişiklik olmadığı görülmektedir (Şekil 7). Ayrıca yazdırılabilir harca eklenen liflerin filamentlerin art arda basılmasında çatlamayı engellediği, geleneksel beton harç malzemesinde olduğu gibi eğilme ve basınç dayanımında da artışa neden olduğu gözlenmiştir [25].

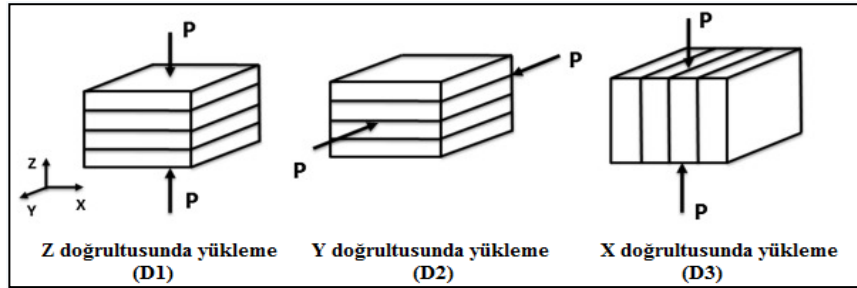


Şekil 7. Karışımdaki lif miktarının yayılma ve batma derinliğine etkisi [23].

4. 3D BASKI HARÇLARININ SERTLEŞMİŞ HALDEKİ ÖZELİKLERİ

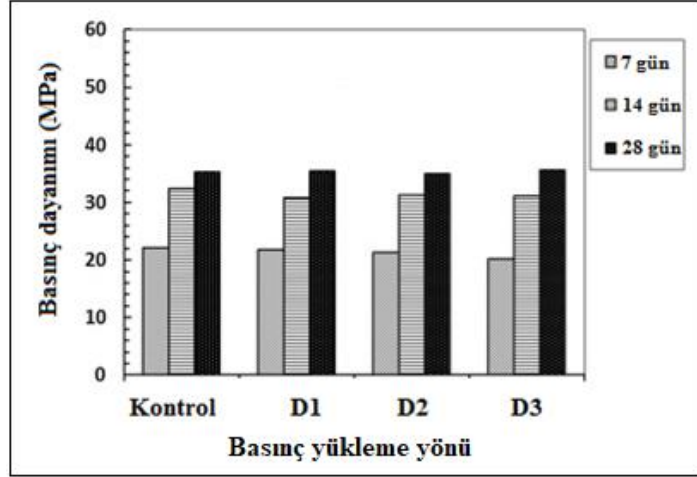
Basınç dayanımını belirlemek için kontrol numuneleri ile birlikte 3D yazdırılabilir harç örneklerine TS EN 12390-3'e göre basınç deneyleri yapılmaktadır. 3D baskı nesnelerinin farklı yönlerinden küp ve baskı işlemindeki katmanlara şekilsel uygunluk sağlaması için prizma numuneler alındıktan sonra, numuneler 21 ± 2 °C ortam sıcaklığında ve bağıl nemde kür edilerek 28 günlük dayanımları esas alınmak üzere farklı günlerde de belirlenmektedir [5].

Basılı numunelerdeki dayanım gelişimiyle ilgili kontrol numuneleri basılan örneklerle karşılaştırıldığında baskı yönünün, basılı numunelerin mekanik özelliklerinde etkili olduğu görülmektedir (Şekil 8). Nerella vd. çalışmalarında birikimlere dik doğrultuda yapılan testlerde daha yüksek basınç dayanımı elde etmişlerdir. 28. günün sonunda baskı yönünden toplanan örneklerin D1 ve D3 doğrultusunda, kontrol örnekleri de dahil olmak üzere diğer yönlerden toplanan tüm örneklerle kıyasla %10 ve %14 daha fazla dayanım gösterdiklerini belirtmişlerdir (Şekil 9) [6].



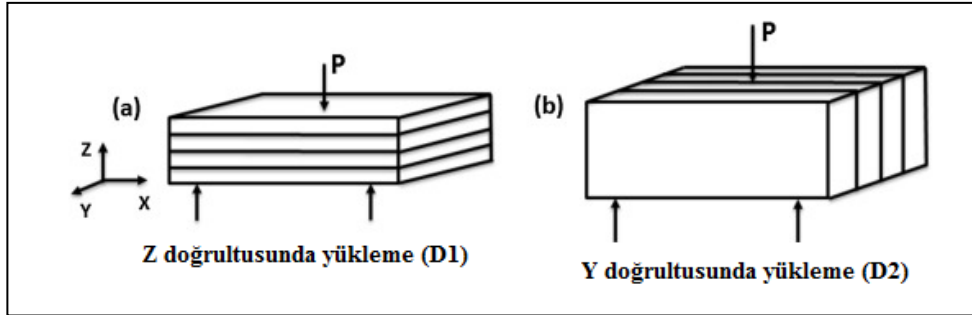
Şekil 8. 3D baskı yazıcılarla üretilmiş nesnelere baskı yönü doğrultusunda basınç uygulaması [6].

Tek katmanlı haddelenmiş numunelerle ilgili yapılan araştırmada, haddelenmiş örneklerin mekanik dayanımının kontrol numunelerinden daha yüksek olabileceği belirtilmiştir [7]. Haddelenmiş numunelerde yüksek mukavemetin olması ekstrüzyon işlemi sırasında daha yoğun matris oluşumu ile açıklanmaktadır. Ekstrüzyon işleminde, taze harca belirli miktarda basınç uygulanmasıyla birlikte ekstrüde edilmiş numunedeki boşluklar azalarak daha yüksek dayanım elde edilmektedir.



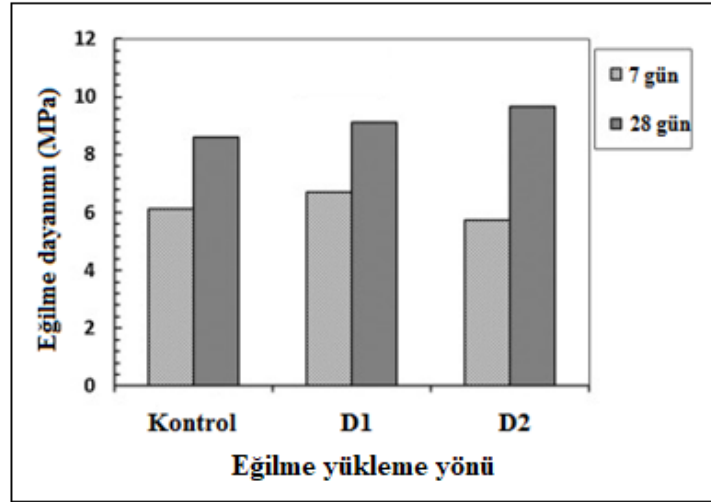
Şekil 9. 3D baskı yazıcı betonun baskı yönüne göre basınç dayanımı [12].

Nerella vd. [6] tek katmanlı haddelenmiş numunelere D1 ve D3 doğrultusunda yaptıkları yüklemelerde, haddelenmiş örnekler kontrol numunelerine göre %11 ile %15 oranında daha yüksek dayanım elde etmişlerdir (Şekil.10).



Şekil 10. 3D baskı yazıcıyla üretilmiş numunelerde baskı yönü doğrultusunda eğilme yükünün uygulanması [6]

Eğilme dayanımını belirlemek içinse kontrol numuneleri ile 3D yazdırılabilir harç örneklerine TS EN 12390-5'e göre deneyler yapılmaktadır. Alınan numuneler 21 ± 2 °C ortam sıcaklığında ve bağıl nemde kür edilerek 28 günlük dayanımları esas alınmak üzere farklı günlerde de belirlenmektedir. Nerella vd. [6], yaptıkları çalışmada basınç dayanımına benzer şekilde eğilme dayanımı içinde basılı örneklerde baskı yönünü dikkate alarak eğilme yükü uygulamışlardır. Ancak basınç dayanımından farklı olarak dayanım iki farklı baskı yönünde belirlenmiştir. 28 günlük kontrol numunesinde, D1 ve D2 yönlerinden toplanan örnekler göre maksimum % 6 ve % 12 oranında daha az eğilme dayanımı bulunmuştur. Ayrıca D2 yönünde test edilen numunelerde, kontrol numunelere kıyasla maksimum % 14 daha yüksek eğilme dayanımı elde edildiği de olmuştur. Sonuçlardaki değişikliğin dairesel ve dikdörtgen nozullardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Dairesel bir nozul deliğinde iki boncuk arasındaki temas alanı dikdörtgen veya kare bir delikle karşılaştırıldığında daha az olmasından dolayı daha düşük dayanım elde edilebilmektedir. Buna ek olarak dairesel nozul, farklı dönme açılarından dolayı herhangi bir karmaşık nesneyi yazdırmak için dikdörtgen ve kare nozuldan daha avantajlıdır. Dairesel nozul doğru hizalamayı korurken, kare nozulun konumu yazdırma yolunun dışına düşer. Bu nedenle, 3D baskı ile herhangi bir yapı tasarlanırken, malzemenin mekanik özelliklerini etkilemesi nedeniyle nozul boyutu ve şekli gözönünde bulundurulmalıdır. 3B baskılı beton numunelerdeki zayıf derzler boyunca basınç ve eğilme yarılmaları meydana gelebilir.



Şekil 11. 3D baskı yazıcı betonun yükleme yönüne göre eğilme dayanımı [12].

5. SONUÇLAR

Geleneksel yapı üretimine göre daha özgür tasarımlar gerçekleştirmeye olanak sağlaması, çevreci olması, beden gücünü azaltması ve maliyeti düşürmesi gibi avantajları olmakla birlikte 3D baskı yazıcılarda kullanılan çimento esaslı harç malzemesinin malzeme verimliliği için tanımlanmış standart testler yoktur. Belli bir yükseklikte, alt katmanların genişliğini korumak ve yazdırılan yapının daha fazla katmanı yazdırılırken düşmesini önlemek için sertleşmeye başlaması gerekir. Son olarak ta katmanın biri yazdırıldıktan sonra diğer katmanın baskısı için gerekli karışım, mümkün olduğunca çabuk ayarlanmalıdır. Aynı zamanda sonraki katmanla uygun bir şekilde bağlanmasına engel olacak kadar da hızlı olmamalıdır. Tüm bu özellikler harcın reolojik özellikleriyle ilgilidir. 3D harçlar için özel geliştirilmiş test yöntemleri olmadığından, taze harçlarda standartlara uygun çökme, batma derinliği ve viskozite gibi geleneksel deney yöntemleri kullanılmaktadır. Harçların nozuldan akmaları sonrası gerekli özellikleri sağlamaları için bileşen olarak mineral katkıları ile kısa kesilmiş liflerin kullanımının oldukça fayda sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle, 3D baskının inşaat endüstrisindeki uygulanabilirliğini arttırmak için harç özellikleri üzerine gelecekteki çalışmaların yapılması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Lipson H., Kurman M., "Fabricated: The New World of 3D Printing", John Wiley & Sons, 2013.
2. Peng, W., Jun W., Xiangyu W., 'A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry', In Automation in Construction, Vol 68, Pages 21-31, 2016.
3. Khoshnevis, B., 'Automated Construction By Contour Crafting – Related Robotics And Information Technologies', Published in Journal of Automation in Construction, Vol 13 Issue 1, Pages 5-19, 2004.
4. 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, Materials and Structures', Vol 45, Pages 1221-1232, 2012.
5. BS EN 196-1:2016., 'Methods of testing cement. Part 1: Determination of strength', BSI Standards Limited, ISBN 9780580845802
6. Nerella V.N., Krause M., Näther M., 'Mechanical Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology', (CONPrint3D) Proceeding for the 25th Conference on Rheology of Building Materials, Regensburg, Germany, 2016.
7. De Koker D., 'Manufacturing processes for engineered cement-based composite material products' (M.Sc. thesis) Stellenbosch University, South Africa, 2004.

8. Zuriguel I., Garcimartin A., Maza D., Pugnaroni L.A., Pastor J.M., ‘Jamming during the discharge of granular matter from a silo’, *Phys. Rev. E*, 71, 2005.
9. Mankoc C., Janda A., Arévalo R., Pastor J.M., Zuriguel I., Garcimartin A., Maza D., ‘The flow rate of granular materials through an orifice’, *Granular Matter*, Vol 9, Pages 407-414, 2007.
10. Beverloo W.A., Leniger H.A., Velde J.V., ‘The flow of granular material through orifices’, *Chem. Eng. Sci.*, Vol 15, Pages 260-296, 1961.
11. Tighe B.P., Sperl M., ‘Pressure and motion of dry sand: translation of Hagen’s paper from 1852’, *Granular Matter*, Pages 141-144, 2007.
12. Paul, S.C., ‘Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction’, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol 8, Pages 311-319, 2018.
13. Chen J., Kwan A., ‘Super fine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste’, *Cem. Concr. Compos.*, Vol 34, Issue 1, Pages 1-10, 2012.
14. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H., ‘Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete’ – a review *Cem. Concr. Compos.*, Vol 83, Pages 146-159, 2017.
15. Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R., ‘The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete’, *Cem. Concr. Res.*, Vol 31, Issue 2, Pages 245-255, 2001.
16. Benaicha, M., Roguiez, X., Jalbaud, O., Burstchell, Y., Alaoui, A.H., ‘Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self-compacting concrete’, *Construction and Building Materials*, Vol 84, Pages 103-110, 2015.
17. Gökkonca, E.K., ‘Diatomit katkılı harçların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin değişiminin incelenmesi’, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 67s, Denizli, 2010.
18. Rousse IN., ‘Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes’, *Mater. Struct.*, Vol 40, Issue 10, Pages 1001-1012, 2007.
19. Roussel N., ‘A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications’, *Cem. Concr. Res.*, Vol 36, Issue 10, Pages 1797-1806, 2006.
20. TS EN 1015-4, ‘Kâgir harcı- Deney metotları- Bölüm 4: Taze harç kıvamının tayini (daldırma ucu kullanımıyla)’, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
21. TSEN 1015-3, ‘Kâgir harcı-Deney metotları-Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayıma tablası ile)’, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
22. Rahman M., Baluch M., Malik M., ‘Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures’, *Constr. Build. Mater.*, Vol 50, Pages 710-717, 2014.
23. Zhang X., Han J., ‘The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste’, *Cem. Concr. Res.*, Vol 30, Issue 5, Pages 827-830, 2000.
24. Ahari R.S., Erdem T.K., Ramyar K., ‘Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials’, *Cem. Concr. Compos.*, Vol 59, Pages 26-37, 2015.
25. Kurt, G., ‘Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri’, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.