

# 3D YAZICI TEKNOLOJİSİNE UYGUN SÜRDÜRÜLEBİLİR VE YENİLİKÇİ BETONLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Fatih Özalp<sup>1</sup>, Halit D. Yılmaz<sup>2</sup>, Şenol Yaşar<sup>3</sup>

## Özet

Bu çalışmada, 3D yazıcılar için geliştirilen elyaf takviyeli ince agregalı yüksek performanslı betonun karışım tasarımı ile taze ve sertleşmiş hâlde beton özelliklerine ilişkin deney sonuçları sunulmaktadır. Bu beton, üst üste katmanlı yapısal bileşenleri oluşturmak için bir 3D yazıcı nozulundan ekstrüde edilecek şekilde tasarlanmıştır. Yapım süreci, geleneksel beton inşaat yöntemlerinin aksine, kalıp olmadan mimari ve yapısal bileşenleri inşa edebilen yeni bir dijital kontrollü beton üretim yöntemidir ve eklemeli üretim (additive manufacturing) olarak isimlendirilmektedir.

Çalışmada, en kritik taze beton özelliklerinin ekstrüde edilebilirlik ve taşıyabilirlik ile bu özelliklerle bağlantılı işlenebilirlik ve açık zaman (çalışabilirlik süresi) olduğu anlaşılmaktadır. Bu özellikler çökme (slump) deneyi ve taze betonun kayma dayanımı parametrelerine bağlı olacak şekilde değerlendirilmektedir. Betonun taze hâldeki özelliklerinin, bileşen malzeme oranları ile süperakışkanlaştırıcı, priz geciktirici, priz hızlandırıcı vb. kimyasal katkıların miktarlarından önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir. Ayrıca, 3D teknolojisi ile üretilen betonların sertleşmiş hâldeki basınç ve eğilme dayanımları gibi mekanik özellikleri, hızlı klor iyonu geçirimsizliği ve kılcal su emme deneyleri ile geçirimsizlik özellikleri bu çalışma kapsamında incelenmektedir. Çalışmanın son bölümünde ise beyaz çimento kullanılarak üretilen dekoratif şehir mobilyaları gibi çeşitli uygulama örnekleri de sunulmaktadır.

## Giriş

3D yazıcı teknolojisi, günümüzün en önemli gelişmelerinden biridir. Tıp dünyasından gıda endüstrisine, havacılık mühendisliğinden evlerdeki kullanım alanlarına kadar uygulama potansiyelini ortaya koymuştur. Yapı endüstrisinde bu teknoloji benimsenmekte ve büyük ölçekte üretimlerde kullanması hedeflenmektedir.

3D beton yazıcı teknolojisi, hem mimari hem de yapısal tasarımda daha fazla özgürlük sağlayan, düşük maliyetli ve yüksek hızlı inşaat yöntemi sunmaktadır. Birkaç öncü şirketin ve bütün dünyadaki farklı firmaların sergilediği çalışmalara rağmen, yapı endüstrisi 3D eklemeli üretim tekniğinin geliştirilmesinde henüz tam anlamıyla başarılı olamamıştır. Bu durumun, basılacak olan yapısal elemanların, davranışları üzerine temel araştırmaların yetersizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir [1].

Beton yapıların 3D yazımı, bugünkü inşaat teknolojisinde devam eden yüksek teknolojik gelişmelerden birisi olup, yüksek hızlı inşaat, kalıp gerektirmeme, daha az iş yükü ve en önemlisi tasarımda özgürlüğün artması gibi üstünlükleri vardır [1].

3D beton yazıcısının, beton yapılarda aşağıda sıralanan bazı zorlukları karşılayabilmesi beklenmektedir [1]:

- Beton yazıcılar ile daha kolay karmaşık şekiller üretilebileceğinden kalıp kısıtlamaları olmaksızın ürün tasarımında yeni bir mimari özgürlük mümkün olacaktır,
- Üst üste eklemeli üretim yöntemi, sadece ihtiyaç duyulan yerlerde beton baskı yapılmasına ve beton tüketiminden

## Developing Innovative and Sustainable Concrete For 3D Printer Technology

In this study, experimental results of fresh and hardened concrete properties are presented with the mix design of fiber reinforced high performance concrete with fine aggregate developed for 3D printer. This concrete is designed to be extruded from a 3D printer nozzle to form added structural components.

The construction process is a new method of digitally controlled concrete production, which can build architectural and structural components without molds, unlike conventional concrete construction methods, and is called additive manufacturing.

<sup>1</sup>fatih.ozalp@iston.istanbul <sup>2</sup>halit.yilmaz@iston.istanbul <sup>3</sup>senol.yasar@iston.istanbul

İSTON, İstanbul Beton Elemanları ve Hazır Beton Fabrikaları San. Tic. AŞ

**Anahtar Kelimeler:** 3D yazıcı, 3D beton, yenilikçi, sürdürülebilirlik, eklemeli üretim

tasarruf edilmesine olanak sağlamaktadır,

- Robotlarla üretimde artık betonun vibrasyonla yerleştirilmesine gerek duyulmamaktadır,
- Kalıp gerektirmemesi nedeniyle üretkenlik artabilir ve yazıcılar 7 gün 24 saat çalışabilir,
- Dijital üretim türü, binaların bilgi modelleriyle mükemmel şekilde eşleşen dijital bir tasarım türü ile birlikte çalışabilir,
- Üretilen elemanlar, üretim masraflarında veya sürelerinde belirgin bir artış olmadan defalarca değişebilir.

## 2. Dünyada Mevcut Gelişme

Yapı endüstrisi, 3D yazıcıların kullanıldığı eklemeli üretim yöntemindeki gelişmeleri yakından takip etmekte ve bunları daha büyük ölçekte uygulamayı amaçlamaktadır. Beton ve çimento esaslı malzemelerin 3D yazıcılar ile birlikte kullanımı son zamanlarda mimarlık ve inşaat alanında oldukça fazla ilgi görmektedir. Bu kapsamda, küçük yapısal olmayan uygulamalarla başlayan süreç (örneğin, tezgâh [2], çocuk oyun kalesi [3]), daha sonra bir ofis [4,5], bir yaya köprüsü [6], bir laboratuvar [7], bisiklet ve yayalar için köprü [8], bir ev [9], motorlu araçlar için trafik köprüsü [10], bir ofis-otel [11] üretimine ulaşmıştır. Ayrıca, Tay ve diğ. [12], 2013'ten bu yana 3D yazım teknikleri ile ilgili yayınlarda sadece sayısal olarak değil, aynı zamanda içerik bakımından kapsamlı bir artış olduğunu belirtmiştir.

Bilinen ilk 3D baskı tekniği, 1998 yılında Khoshnevis'in Contour Crafting olarak isimlendirdiği yöntemdir. Contour Crafting ile polimer, seramik bulamaç, çimento ve çeşitli diğer malzemeler ve karışımlar kullanılarak katmanlı bir imalat yöntemi geliştirilmiştir [13]. Contour Crafting ile NASA uzay araştırmaları yönetimi de ilgilenmiş ve finansman sağlamıştır. İnsanlar gelecekte Ay'a ve Mars'a yerleşebilecektir ancak inşaat önerilerinin çoğu yeryüzünden yapısal öğelerin taşınması ve hedef sahada bir araya toplanması üzerine kurulmuştur. Bu durum, daha büyük ölçekte pahalı ve gerçekleştirilemez bir yaklaşımdır. Bunun yerine, 3D baskı ile yerinde malzeme kullanılması önerilmiştir [14].

Loughborough Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 3D eklemeli üretim yöntemi için yüksek performanslı bir betonu geliştirmiştir. Yüksek mukavemet özelliklerine (28. günde, 100 MPa basınç ve 12 MPa eğilme mukavemeti) ulaşılmasını amaçlayan malzeme araştırması ve performans deneye-

ri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca, karışımın tasarımı esnasında işlenebilirlik, ekstrüde edilebilirlik ve taşıyabilirlik gereksinimleri göz önüne alınmıştır [15].

Çinli firma Yingchuang, büyük ölçekli yapı elemanlarını fabrikalarında yüksek hızda yazdırmak için 150 (boy) x 10 (genişlik) x 6,6 (yükseklik) metre boyutlu bir yazıcı geliştirmiştir. İç ve dış yan duvarlar basılarak, ardından zikzak şeklinde bir iç yapı oluşturulmuştur. Bu teknikle firma, çok katlı evler, beş katlı apartman ve 1.100 metrekairelik bir bina inşa etmiştir [16].

Minnesota'da inşaatçı Andrey Rudenko, Contour Crafting'e benzer bir üretim tekniği geliştirmiştir ancak çok daha küçük katman yüksekliği (5mm) ile bir üretim gerçekleştirmiştir [17].

Hollanda'da kurulan CyBe Additive Industries firması birkaç dakika içinde kabul edilebilir bir mukavemete ulaşan harç kullanmaktadır. CyBe uygulamalarını, düzenli bir robot koluna bir baskı kafası takarak yapmaktadır [18].

Slovenya'da faaliyet gösteren BetAbram firması, ticari kullanım için 3D beton yazıcılar geliştirmiştir. Çeşitli boyutlarda yazıcıları satışa çıkaran firma, 3D yöntemiyle basılan bir merdivenle 3D yazıcıların kullanımını açıklamıştır [19].

Emerging Objects firması tarafından kullanılan karışımın işlenebilirliğini arttırmak için ince agrega ve lif takviyeli çimento karışımı kullanılmıştır. İki tür bağlayıcı kullanılmış olup; bir tanesi alkol bazlı bağlayıcı olup, diğeri üstün yapışma özeliğine ve yüksek dayanıma sahip suda çözünen sentetik polimerdir [20].

Neri Oxman liderliğindeki "The Mediated Matter" grubu, değişen yenilikçi baskı tekniklerini incelemektedir. Araştırma grubu,

hızlı şekilde imal edilen elemanlar için benzer bir özellik önermektedir. Karışım yoğunluğunun alüminyum tozu ve kireç karışımıyla kontrol edilen beton köpüğü karışımı geliştirilmiştir [21].

Catalonia İleri Mimarlık Enstitüsü (IAAC), 3D yazıcı teknolojisi ile üretime uygun minyatür basım tekniğini geliştirmiştir. Bu yöntem, herhangi bir boyutta beton yapıları bir arada yazabilen üç küçük robot ailesini kullanmaktadır [22].

Diğer bir 3D basım yöntemi; kil, kum ve çamur karışımını kullandığından tam olarak beton baskı türü değildir. WASP (World's Advanced Saving Project), üçüncü dünya ülkelerinde 3D baskı barınağı yapmayı amaçlamaktadır. İtalyan şirketi,

In the study, it is understood that the most critical fresh concrete properties are extrudability and buildability, which have connection with workability and open time. These properties are evaluated according to slump test and shear strength parameters of fresh concrete. The fresh properties of the concrete are significantly influenced by the mix proportions and the presence of chemical admixtures such as superplasticizer, set retarder, set accelerator. In addition, mechanical properties such as compressive and bending strengths, rapid chloride ion permeability and permeability properties of concrete produced with 3D technology are analyzed in this study. In the last part of the study, various application examples such as decorative city furnitures produced using white cement are also presented.

konutlarını değişen ölçekli ev modellerini basarak göstermiş, ticari kullanım için yazıcılarını satmayı amaçlamaktadır. Elde edilen gelirin ise, ihtiyaç duyulan ülkelerdeki evleri üretmek için kullanılması düşünülmektedir [23].

Son zamanlarda Eindhoven Teknoloji Üniversitesi tarafından 2017 yılında bisikletçiler için 3D beton ile üretilen köprü kullanıma açılmıştır [24]. Birleşik Arap Emirlikleri'nde Dubai'deki ofisler ve Filipinler'deki Lewis Grand Hotel'deki bazı yapılar da 3D baskı teknolojisi ile katmanlar oluşturarak inşa edilmiştir [25].

### 3. Betonun Karışım Tasarımı ve Beton Özellikleri

Bu bölümde 3D beton yazımı için yüksek performanslı, elyaf takviyeli, ince agregalı betonun karışım tasarımı ve beton özelliklerine ilişkin deney sonuçları sunulmaktadır. 3D beton, tabaka-tabaka yapısal bileşenleri oluşturmak için bir nozuldan ekstrüde edilecek (pompalanabilir) şekilde tasarlanmaktadır. 3D yazdırma işlemi, geleneksel beton üretim yöntemlerinin aksine, kalıplama yapılmadan mimari ve yapısal bileşenleri inşa edebilen yeni bir dijital kontrollü üretim yöntemidir. Yapılan çalışmalar, bu betonda en kritik taze beton özelliklerinin, ekstrüde edilebilirlik (pompalanabilirlik) ve üst üste taşıyabilirlik (inşa edilebilirlik) ile bu özelliklerle ilişkili olan işlenebilirlik ve çalışılabilirlik süresi (open time) olduğunu göstermiştir. Bu özellikler, kullanılan bileşen malzemeler ve karışım oranları, süperakışkanlaştırıcı, priz geciktirici, priz hızlandırıcı ve polipropilen elyaflarının miktarı ile önemli ölçüde etkilenmektedir.

Le ve diğerleri 3D yazım sürecinde taze betonun en kritik özelliklerinin ekstrüde edilebilirlik (pompalanabilirlik) ve inşa edilebilirlik (katların kendini taşıması) olduğunu belirtmişlerdir. Ekstrüzyon, betonun, beton pompasından, iletim hortumlarından ve püskürtücü nozuldan geçme kapasitesi olarak tanımlanmış, betonun işlenebilirliğinin, karışım oranlarından (çimento esaslı bağlayıcı/agrega oranı, su/bağlayıcı oranı, katkı kullanımı, lif miktarı) etkilendiği ifade edilmiştir. İyi ekstrüde edilebilirliğin, kendiliğinden yerleşen beton ve püskürtme beton ilkelerini karışım tasarımına birlikte uygulanarak başarıldığını göstermişlerdir [26].

3D eklemeli üretim yönteminde, alt tabakaların üst tabaka baskının ağırlığıyla minimum deformasyona uğraması, aynı zamanda alt katmanın tabakalar arası aderans oluşabilmesi için üst katmanlarla bağlanması gerektiğini belirtmişlerdir. İnşa edilebilirliğin başlangıçtaki işlenebilirliğe ve çalışılabilirlik süresine (işlenebilirliğin zamanla istenilen seviyede devamlılığı) bağlı olduğunu, ayrıca iyi bir ekstrüde edilebilirlik ve sürekli bir akış oranını korumak için uygun işlenebilirlik ve uzun bir çalışılabilirlik süresi gerektiğini ifade etmişlerdir. Bu durumda bir ikileme karşılaşıldığını, kısa bir işlenebilirlik süresinde malzemenin sertleştiğini, betonun akış hızını ve baskı hızının yavaşladığını ve iletim hortumunda tıkanmaya (blokaj) neden olduğunu vurgulamışlardır. Öte yandan, uzun bir işlenebilirlik

durumunun ekstrüzyon kabiliyetini arttırdığını ve tabakalar arası bağlanmaya yardımcı olduğunu ancak inşa edilebilirlik açısından katmanların deformasyonu yönünden zararlı olduğunu belirtmişlerdir [26].

Tabakalarının kendi ağırlığını taşıma kabiliyetinin beton reolojisine ve taze betonun kayma gerilmesine bağlı olduğunu, zamanla yapının yıkılmadan inşasına devam edilebilmesi ve mevcut katmanların kararlılığını sağlamak için betonun kayma gerilmesinin bu yükü karşılayabilecek değerde olması gerektiğini ifade etmişlerdir. Ancak, bu noktada yeni bir çelişkinin ortaya çıktığını, çimento hamurunun ekstrüzyon yapılabilmesi (pompalanabilmesi) için yeterince sıvı olması ve yapının mekanik stabilitesi içinde yeterince sağlam olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu çelişkinin başka bir ifadesi olarak ekstrüzyon esnasında hem yeterli akışkanlığın sağlanması hem de taşıyabilirlik için betonun yapısal gelişiminin sağlanması gerektiğini vurgulamışlardır [26].

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler ve Karışım Tasarımı

Betonun karışım tasarımı, taze ve sertleşmiş betonun performans gereksinimlerini karşılayacak şekilde yapılmalıdır. Literatür araştırmalarında belirtildiği gibi; 3D yazıcılarda kullanılacak olan betonların, geleneksel betonun performansına ek olarak, işlenebilirlik, çalışılabilirlik süresi (open time), ekstrüde edilebilirlik (pompalanabilirlik) ve katmanların kendi kendisini taşıyabilirlik (inşa edilebilirlik) gibi özelliklerine sahip olmalıdır. Ayrıca, standart taze beton özelliklerinden farklı olarak 3D yazıcılara uygun beton tasarımında betonun reolojik özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Betonun çalışma süresi uzatılırken kayma dayanımının arttırılması temel ilkelerinden birisidir. Bu amaçla, karışıma ilave edilen katkıları betonun viskozitesini arttırmadan betonda kaymayı önleyici özellik katarak kayma dayanımını arttırmaktadır. Bu katkılardan viskozite düzenleyici katkının başlıca işlevi betonun kayma dayanımını arttırmak ve üst üste eklenen beton tabakaların kaymasını önlemektir. Viskozite düzenleyici katkıların kullanılmadığı durumda standart viskozite seviyesinde beton fazlasıyla kayma eğilimi göstermektedir. Viskozite düzenleyici kullanılması ile aynı viskozite seviyesinde betonun kaymasını önleyici bir özellik kazandırılmaktadır. Böylece, çalışılabilirlik süresi de artmaktadır.

Ayrıca, 3D yazıcı tekniği ile üretilen betonun kaymasını engellemek ve çalışılabilirlik süresini uzatarak verimi arttırmak için reoloji düzenleyici kıvamı ayarlayan katkıları da bu çalışmada kullanılmıştır. Bu katkılarda betonun kaymasını yüksek oranda önlemektedir.

Viskozite düzenleyiciler betona, tiksotropik özellik katarak reolojisini değiştirmektedir. Böylece, betonun viskozitesi güç uygulandığında azalmakta, beton rahat işlenebilir ve iyi bir pompalama sağlamakta, güç uygulanması durduğunda viskozite artmakta, böylece beton iyi bir kayma direnci sağlamakta

tadır. Betonda su tutma özelliği olan kıvam ayarlayıcı kimyasalların kullanılması ile harç içerisindeki belirli bir miktar su arzu edilen bir süre için kimyasalın bünyesinde hapsedilmekte, böylece harcın çalışma süresinin ayarlanabilmesine imkân sağlanmaktadır. Özellikle çalışabilirlik süresinin arttırılmasında betonun reolojisini düzenleyen bu katkıları gereklidir.

Bu çalışmada pompalamayı kolaylaştıran ve kaymayı önleyen viskozite düzenleyici ve çalışma süresini uzatan kıvam ayarlayıcı katkı kullanılmıştır. Bu katkıları sayesinde betonun viskozitesini arttırma gereği duyulmadan kaymayı önleyici özellik sağlanmıştır. Ayrıca, çok daha uzun çalışabilirlik süreleri elde edilmiştir.

Beton tasarım çalışmalarında yapılan literatür araştırmalarının ışığında, nozul ağız çapına bağlı olarak, 0-1,5 mm aralığında dayanımı yüksek silis kumu kullanılmıştır. Silis kumu hem malzeme içeriğinin temizliği hem de agrega dayanımının yüksek olması sebebiyle tercih edilmiştir. CEM I 42,5 R ve BPC 52,5 çimentolar bağlayıcı olarak seçilmiş, başlangıç çalışmaları süresince mineral katkıları (uçucu kül, silis dumanı vb.) karışıma dâhil edilmemiştir. Su/bağlayıcı oranını düşürmek ve betonun arzu edilen işlenebilirliğini sağlarken hem erken hem de ileri yaş beton mukavemetini arttırmak için yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı (SA) katkı kullanılmıştır. 3D betonun karışım oranları; çimento: su: ince kum (0-1,5 mm): kimyasal katkı = 1: 0,30: 1,5: 0,02 şeklindedir. Karışımlardaki çimento miktarı yaklaşık olarak 800 kg/m<sup>3</sup>tür. Su azaltıcı SA kimyasal katkı miktarı, çimento ağırlığına oranla % 1,5 - % 2 arasında değişmektedir. Betonda, rötre ve çatlak oluşumunu azaltmak için polipropilen mikro fiberler tüm karışımlarda 600 gr/m<sup>3</sup> olarak ilave edilmiştir.

3D yazıcı ile yazım süresince yeterli bir çalışabilirlik süresi elde etmek için beton karışımına priz geciktirici ilave edilmesine yönelik birçok deneme çalışması da yapılmıştır. Ayrıca, bazı çalışmalarda inşa edilebilirliği sağlamak için priz hızlandırıcılar da kullanılmıştır.

### 3.2 Taze Beton Özellikleri

Betonlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesinde birçok deney yöntemi kullanılmaktadır. Bu deneyler arasında en yaygın olarak kullanılan çökme deneyidir. Çökme (slump) değeri işlenebilmenin tanımlanmasındaki tek yöntem olmayıp agrega tane şekli, kullanılan kimyasal katkı tipi vb. sebeplerle aynı çökme değeri farklı işlenebilirliklere karşılık gelmektedir. Çökme deneyi, agrega nem durumuna bağlı olarak beton karışımlarında stabilitenin izlenmesi için faydalı olmasına karşın betonun sıkıştırılabilmesi, pompalanabilmesi ve pompa iletim borusunda betonun hareketi gibi özellikler açısından her hangi bir bilgi vermemektedir. Ancak, bu çalışmada aynı betonun zaman içerisindeki taze beton davranışı incelendiğinden betonun işlenebilme özelliğinin zamanla değişiminin kontrolü için bir değişim parametresi olarak çökme deneyi kullanılmıştır.

### Ekstrüde Edilebilirlik (Pompalanabilirlik)

Ekstrüde edilebilirlik, taze betonun bir huni ve pompalama sistemi yoluyla sürekli bir katman olarak beslenmesi gereken bir nozula nakil kabiliyeti ile ilgilidir. Bu kabiliyetle ilgili daha önceki araştırmalar betonun pompalanmasına ve püskürtülmesine yönelik olup, 3D yazıcı teknolojisinde taze beton bir ekstrüzyon yerine bir partikül akımı olarak sistemden çıkmaktadır. Ekstrüzyonla beton katmanlarının oluşturulmasından birçok araştırmada söz edilmektedir, ancak bu beton özelliğini değerlendirmek için uygun bir deney yöntemi tanımlanmamıştır.

### İşlenebilirlik

Çeşitli beton standartlarında işlenebilirlik için çökme, sıkıştırma faktörü ve akış tayini gibi deneyler bulunmaktadır. Basit ve kolay şekilde uygulanabilir bir deney yöntemi olmasından dolayı çökme deneyi çok yaygın olarak taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Ancak, çökme deneyi betonun reolojik değişkenlerinden sadece kayma dayanımı ile korelasyon göstermekte, beton için önemli ikinci reolojik değişken olan plastik viskozite hakkında bilgi vermemektedir [27]. Tek değişkenle ilişkili bu deney "tek noktalı deney" olarak ifade edilmektedir. Betonun akışkan davranışını kayma dayanımı ve plastik viskozitesi açısından karakterize edebilen "iki noktalı deney" daha iyi bir reolojik değer vermektedir [28].

Le ve arkadaşları 3D yazıcılarda kullanılacak betonun işlenebilirliğini kayma dayanımı ile ilişkilendirdiği çalışmada, kayma dayanımının azaltılması, böylece işlenebilmenin arttırılması için süperakışkanlaştırıcı katkı miktarını bağlayıcıya oranla %0,5'ten %1 değerine çıkarmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı katkının bağlayıcıya oranının iki kat artması ile kayma dayanımını değerinin de 2,60 kPa'dan 0,55 kPa değerine azaldığı belirtilmiştir [26].

Bu çalışmada ise su/çimento ve süperakışkanlaştırıcı /çimento oranları değiştirilerek 3D baskı betonun taze haldeki davranışı ve işlenebilme özelliği değerlendirilmiştir. Öncelikle çimentoya ağırlıkça %1 oranında SA (süperakışkanlaştırıcı katkı) katkı, su/çimento oranı 0,30 olan karışımda kullanılmış ancak bu betonda çökme değeri elde edilememiş ve beton basılamamıştır. Aynı karışımın su miktarı artırılarak su/çimento oranının 0,40 olması durumunda 200 mm çökme meli beton elde edilmiş ancak bu durumda da beton 3 sıradan fazla kendi ağırlığını taşıyamamıştır. 3D yazıcılar için üretilen betonlarda istenilen işlenebilirlik sağlanırken betonun erken yaş dayanım gelişimi için su/çimento oranının azaltılması önemlidir. Çalışmada su/çimento oranı 0,30 ve SA'nın çimentoya ağırlıkça %2 olarak kullanılmasıyla 190 mm çökme meli beton elde edilmiş ve betonun rahatlıkla basılarak kendi ağırlığını taşıyabildiği görülmüştür (Şekil 1).



SA/çimento 0,01  
Su/çimento 0,30

SA/çimento 0,01  
Su/çimento 0,40

SA/çimento 0,02  
Su/çimento 0,30

Şekil 1. SA/çimento ve su/çimento oranlarının işlenebilirliğe ve taşıtılabilirliğe etkisi

### Çalışabilirlik Süresi

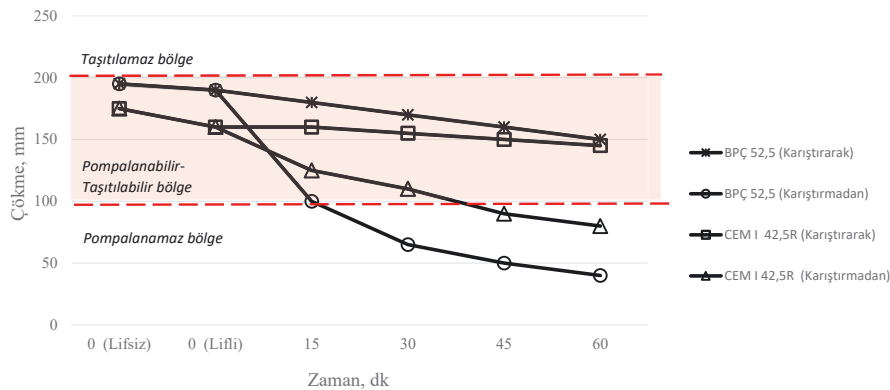
Çimento esaslı malzemeler için çalışabilirlik süresi (open time) genellikle bir Vicat cihazıyla ölçülebilen priz süresiyle ilişkilidir. Ancak bu cihaz, taze betona göre işlenebilirlik değişiminin karakterize edilmesinde başlangıç ve nihai priz süresini belirlemek üzere tasarlanmıştır.

Le ve arkadaşları [15] çalışabilme süresini tanım olarak; taze betonun işlenebilirliğinin ekstrüde edilebildiği (pompalanabilirdiği) bir seviyede olduğu zaman periyodu olarak belirlemiştirlerdir. Çalışılabilirlik süresinin sona ermesi, ölçülen kayma dayanımının betonun başlangıçtaki kayma dayanımından 0,3 kPa artış göstermesine denk geldiği ve kayma dayanımındaki bu artışın (işlenebilirlikteki azalmanın), basılma zorluğunun artmasıyla aynı anlama geldiğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar başka bir çalışmada 0,9 kPa üzeri kayma dayanımında betonun ekstrüde edilemediğini, beton iletim borularında ve nozulda tıkanmaya neden olduğunu, 0,3 kPa değerinin altında ise beton katmanlarının zamanla kendisini taşıyamadığını belirlemiş ve arzu edilen çalışabilirlik süresi için bu kayma dayanımı değerleri arasını kabul etmişlerdir [26].

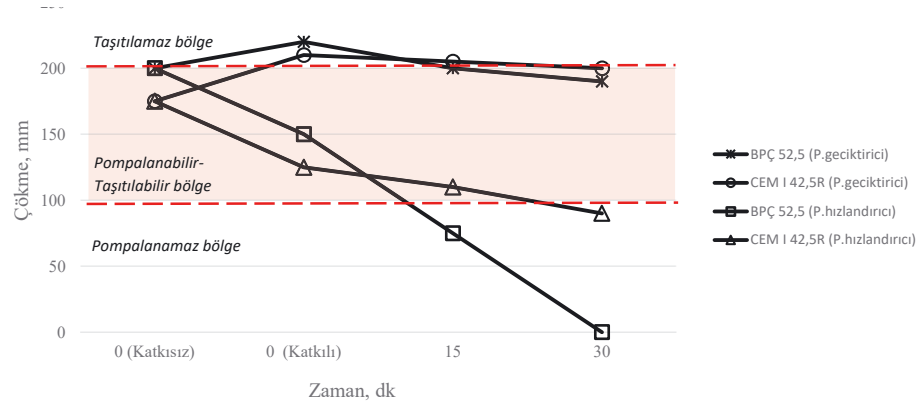
Bu çalışmada ise, BPC 52,5 ve CEM I 42,5 R çimentolarıyla hazırlanan karışımlar, zamanla değişen çökme test sonuçları incelenerek ve bir beton sıkma hunisi (mutfak işlerinde krema sıkmakta kullanılan aparat) yardımı ile pompalanabilirlik kontrolü yapılarak, Şekil 2’de verilen grafik elde edilmiştir.

Grafik incelendiğinde, hem beyaz çimento içeren hem de Portland çimentosu (CEM I 42,5R) içeren karışımda herhangi bir karıştırma işlemi yapılmaması durumunda 15-30 dakika aralığında beton işlenebilirliğini önemli ölçüde kaybetmekte ve pompada basılamaz hâle gelmektedir. Bu durum, uygulamada sıklıkla betonun pompada veya iletim hortumunda tıkanması problemini ortaya çıkarmaktadır. 3D yazıcı tekniği ile yazdırılan betonun çalışabilirlik süresinin artırılması için karıştırılması etkili bir yöntem olarak görülmektedir. Bu çalışmada hem beyaz çimento içeren karışım hem de Portland çimento içeren karışım 5 dakika aralıklarla, 1 dakika süreyle karıştırılmış, sonuç olarak çalışabilirlik süresinin 60 dakikaya kadar arttırılabildiği belirlenmiştir.

3D yazıcı tekniğinde, betonunun karıştırma ekipmanları kullanılmadan, çalışabilirlik süresini ayarlamak için priz hızlandırıcı ya da priz geciktirici katkıları kullanılabilir. Bu çalışmada, çimento miktarının ağırlıkça %0,3’ü kadar priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkıların kullanımı incelenmiş ve çökme miktarındaki değişimler Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2. BPC 52,5 ve CEM I 42,5 R çimentolu karışımların zamanla değişen çökme değerleri



Şekil 3. Priz katkılarının çökmeye etkisi

Priz geciktirici katkılar çimentoya ağırlıkça %0,3 oranında katıldığında hem beyaz çimento hem de standart Portland çimentosu kullanılan karışımlarda 30 dakika süreyle aynı işlenebilirlik sağlanmıştır. Priz hızlandırıcı katkıların %0,3 oranında kullanımında, beyaz çimentolu beton 15 dakika, standart Portland çimentolu beton ise 30 dakika içerisinde pompalanamaz duruma gelmiştir.

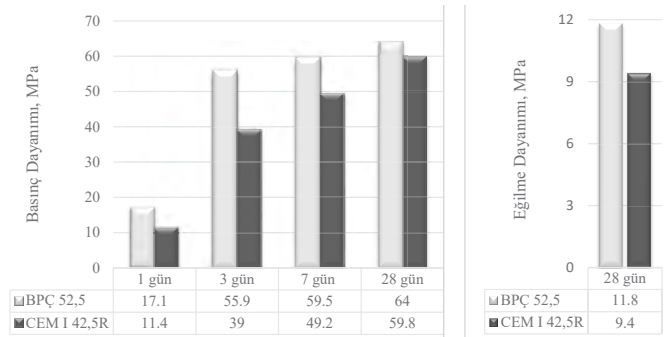
#### İnşa Edilebilirlik (Taşıtılabılırlik)

Geleneksel betonlar kalıba bir akışkan olarak yerleştirilir ve kendi kendini taşımalarına gerek yoktur, yani inşa edilebilirlik bir sorun oluşturmaz. Püskürtme betonlar ise bir istisnadır. Austin ve diğ. [29] tarafından 3D baskı betonunun inşa edilebilirliği, alt tabakalarında kayda değer bir deformasyonun olmadığı tabakaların sayısı olarak belirlenmiştir.

Yapılan bu deneysel çalışmada farklı çökme değerleri veren betonların taşıtılabılırliği görsel olarak incelenmiştir. Beyaz çimento içeren karışımın erken dayanımlarının yüksek olması nedeniyle 200 mm çökmeye kadar daha geniş çökme aralığında çalışırken, Portland çimento içeren karışımın daha geç dayanım kazanmasına bağlı olarak 170 mm çökmeye kadar taşıtılabılır olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, Portland çimento içeren karışıma priz hızlandırıcı katkı ilavesi ile priz süresi kısaltılmış, böylece 200 mm çökme değerinde 3D yazıcılar ile pompalanabilen ve kendi ağırlığını taşıyabilen betonlarda üretilebilmiştir (Şekil 4).

#### 3.3. Dayanım Özellikleri

Basınç deneyleri 3D yazıcı nozul ağzından alınan 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde ve eğilme deneyleri 100x100x500 mm boyutlarındaki prizma numuneler üzerinde yapılmıştır ve sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Basınç ve eğilme dayanım sonuçları

Basınç dayanımı deney sonuçları incelendiğinde beyaz çimentolu karışımın dayanım değerleri 28. günde 60 MPa değerini aşmaktadır. Portland çimentosu ile yapılan karışımların dayanım değerleri bu çimentonun dayanım sınıfının 42,5 olmasına bağlı olarak beyaz çimento ile üretilen karışımdan düşüktür. Yüksek dayanımlı betonların çimento içeriği minimum 400 kg/m<sup>3</sup> ve

BPC 52,5 kullanılan karışım  
(çökme: 200mm)CEM I 42,5R kullanılan karışım  
(çökme: 170mm)CEM I 42,5R kullanılan karışım  
(çökme: 200mm)

Şekil 4. Farklı çökme değerlerinde inşa edilebilirlik

28 günlük basınç dayanımları 50 MPa'ı aşmaktadır [30]. Böylece, bu çalışmada hem Portland çimentosu hem de beyaz çimentolu 3D yazıcı teknolojisiyle üretilen betonların 60-65 MPa mertebesindeki küp basınç dayanımları ile daha yüksek dayanımlı beton olarak değerlendirilebileceği anlaşılmaktadır.

Eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde basınç dayanım sonuçlarına benzer biçimde beyaz çimentonun eğilme dayanım değerleri Portland çimentosu içeren karışıma göre yüksek çıkmıştır. Betonların eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı değerinin 0,175 katı olarak düşünülebilir. Ancak bu oran su/çimento oranı, maksimum agrega boyutu, agrega türü, agrega özellikleri (tane şekli, yüzey özellikleri) ve kür süresine bağlı olarak değişiklik gösterebilir [31]. Bu çalışmada 3D yazıcılar için üretilen betonların eğilmede çekme dayanımının basınç dayanımına oranı Portland çimento içeren karışımda 0,157 ve beyaz çimento içeren karışımda 0,184 olarak belirlenmiştir.

### 3.4. Geçirimsizlik Özellikleri ve Donma-Çözölmeye Direnç

3D yazıcı nozul ağzından alınan 100x200 mm boyutlarındaki silindirlere kesilen her deney için 50x100 mm boyutlarındaki 4 adet disk numuneler 28 gün su küründe bekledikten sonra kılcal su emme, donma çözölmeye ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneylerine tabi tutulmuştur.

Kılcal su emme deneyleri ASTM C 1585'e göre yapılmıştır. Deney, numunelerin yan yüzeyleri geçirimsiz şekilde kapatılıp su yüksekliğinin sabit tutulduğu kaba konularak 8. gün sonunda numune tartımları yapılmak suretiyle gerçekleştirilmiştir. Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneyleri ise ASTM C 1202'ye göre yapılmış olup numunelerden geçen akım değerleri Coulomb olarak elde edilmiştir. Donma çözölmeye deneyleri ise EN 12390-9'a göre yapılmıştır. Bu deneyde numuneler 28 günlük çevrime tabi tutulmuş ve her 7 çevrim sonunda yüzeyden oluşan kopmalar tartılarak toplam 28 çevrim sonrasında yığışlı kütle kaybı değerleri hesaplanmıştır. Yapılan deneylere ait tüm sonuçlar Tablo 1'de verilmektedir.

**Tablo 1.** Geçirimsizlik ve donma-çözölmeye deney sonuçları

	Kılcal su emme derinliği (mm)	Donma-çözölmeye 28 çevrim sonrasında kopan yığışlı kütle (kg/m <sup>2</sup> )	Hızlı klor iyonu geçirimsizliği (Coulomb)
BPÇ 52,5 betonu	1,12	0,0	3028
CEM I 42,5 R betonu	1,30	0,1	3816

Kılcal su emme deney sonuçları incelendiğinde, çatlaklar ve kılcal boşluklardan ilerleyen su miktarının 8 gün sonrasında 1,1 mm- 1,3 mm değerleri arasında değiştiği görölmektedir. Beyaz çimento ile üretilen betonun kılcal su emme değerlerinin daha düşük olmasına bağlı olarak bu betonda standart Portland çimentolu betondan daha iyi bir içyapı geçirimsizliğinden bahsedilebilir.

Donma-çözölmeye deneyi sonucunda beyaz çimento ile üretilen betonda standart Portland çimentosu kullanılan betona göre daha düşük miktarda kütle kaybı gözlemlenmiştir. Her iki karışım içinde kütle kaybı değerleri 1,0 kg/m<sup>2</sup> değerinden düşük çıkmıştır. EN 1338, EN 1339 ve EN 1340 standartları EN 12390-9'a oldukça benzer bir donma çözölmeye çevrimi sonrasında 28 günlük kütle kaybının 1,0 kg/m<sup>2</sup> değerinden düşük olmasını betondan mamul ürünler için yeterli bir performans olarak değerlendirmektedir.

Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deney sonuçlarına göre, beyaz çimento kullanılan karışımda, Portland çimentosu kullanılan karışıma kıyasla geçirimsizlik daha düşük çıkmaktadır. Bu sonuç, beyaz çimento içeren karışımda daha boşluksuz bir iç yapıdan kaynaklanır. Hızlı klor iyonu geçirimsizliği deney sonuçları ASTM C 1202 Standardı'nda klorür iyonu geçirimsizliği sınıfları dikkate alınarak değerlendirildiğinde ise her iki karışımında 2000-4000 Coulomb arasında geçen akım değerleri ile orta sınıfta klor iyonu geçirimsizliğine sahip olduğu belirlenmiştir.

## 4. ENDÜSTRİYEL ÖLÇEKTE ÜRETİMLER

Çalışmanın ilk aşamasında 3D yazıcılar üzerine araştırmalar yapılmış, 3D beton yazıcısının bu çalışmaya özel tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çalışmalar süresince gereksinimlerden doğan süreç düzeltmeleri doğrultusunda 3D yazıcı düzeneğinde pompalama sistemi ve nozul üzerinde birçok değişiklik yapılmıştır. Yapılan önemli değişikliklerle, nozul ile beton pompasının senkronize çalışması sağlanmıştır. Bu geliştirmeler ile beton kıvamı ve işlenebilirliği korunmaktadır. Böylece pompa ve nozul içerisindeki olası tıkanmaların önüne geçilmiştir.

Çalışmalar sonucunda endüstriyel olarak 3D beton yazıcılığı üretilen ürünler Şekil 6'da görölmektedir. Endüstriyel uygulama aşamasında 300x250x200 cm çalışma alanına sahip 3D yazıcı ile 200x100x60 cm ölçülerinde bir ürün yaklaşık 40 dakika sürede üretilebilmektedir.



**Şekil 6.** İSTON'da geliştirilen 3D beton yazıcı kullanılarak üretilen ürünler

## 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

3D beton yazıcısı ve bu yazıcıyla en iyi uyumu sağlayabilen optimum betonun tasarlandığı çalışmalar, 3D beton yazıcıyla inşaat sektöründe yeni bir teknolojiyle üretimin mümkün olabileceğini göstermiştir. İSTON deneyimlerinde kullanılan 3D yazıcı ve geliştirilen beton tasarımıyla prefabrik üretimlerle şehir mobilyası ürünlerin ve modüler parçaların üretilebildiği görülmüştür.

Yazdırılabilir betonun geleneksel betonla sadece içyapı ve dayanım gelişimi gibi mekanik özellikleri ile değil aynı zamanda betonun belirtilen yöntemle üretimi durumunda taze haldeki davranışı bakımından da farklıdır. Karışım ilk önce pompalanabilirlik kabiliyetine sahip ve ekstrüzyon yapılabilen bir kıvamda ancak daha sonra alt katmanları ezmeden ve kendi ağırlığını hızlıca taşıyacak kadar dayanımlı olmalıdır. Bu araştırma sırasında, bu özelliklerin yerine getirilmesine çalışılmıştır. Ancak gerçekte yazdırılabilir betonun bu davranışı, betonun mekanik özellikleri kadar bilindiğini söylemek güçtür. Karışım tasarımı, mekanik özellikler ve 3D yazıcısıyla üretim sırasında sertleşen beton davranışı arasındaki ilişkiyi bulmak için deneysel araştırmalar devam etmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan mekanik deneyler, geçirimsizlik ve donma-çözülme deneyleri ile gerek inceliği daha fazla gerekse dayanım sınıfı daha yüksek olan 52,5 dayanım sınıfı beyaz çimento içeren betonun, hem dayanım hem de dayanıklılık açısından 42,5 dayanım sınıfı standart Portland çimentoya nazaran daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, geleneksel betonların bilinen mekanik ve dürabilite özellikleri dikkate alındığında, 3D yazıcılarla üretilen betonların dayanım ve dayanıklılık açısından mineral katkı içermeyen yüksek dayanımlı betonlara benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada genel olarak 3D yazıcılar ve bu yazıcılarda kullanılan betonların geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Ancak, 700-800 kg/m<sup>3</sup> mertebesinde bağlayıcı kullanılması durumunda hem erken yaştaki rötrenin azaltılması hem de çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kirecin [Ca(OH)<sub>2</sub>] bağlanması için 3D betonlarda Portland çimentolu karışımlarda silis dumanı ve beyaz çimentolu karışımlarda metakaolin kullanılması faydalı olacaktır. Bu şekilde üretilecek betonların geçirimsizlik özellikleri de iyileştirilerek performansı arttırılacak ve zaman içerisinde servis şartları altında dayanıklılığı geliştirilmiş olacaktır. Ayrıca, mineral katkıların kullanılması ile karışımdaki çimento miktarındaki azalma sonucu, 3D betonlar çevrenin korunmasında önemli ölçüde katkı sağlanacaktır.

Araştırmaların sürdürülmesiyle bu yeni teknolojinin, geliştirilmesi gereken bir diğer önemli kısmı da 3D yazıcıların mekanik tüm değişkenlerinin birbiriyle bütünleşmiş şekilde çalışmasının sağlanmasıdır. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda daha dinamik baskı stratejileri hedeflenmelidir. Bu, belirli kuvvetlerin gerekli olduğu yerlerde yazdırmayı daha hızlandırmayı ya da daha yavaşlatmayı, eğri şekillere veya açıklıklara ulaşmak için değişken katman boyutu anlamlarına gelebilir. İç yapıları veya keskin eğrileri basmak için çapını, basıncını ve hızını değiştirerek akış kontrolüne izin veren gelişmiş bir baskı kafası (nozül) gerekebilir. Aynı şekilde, bütün bir binanın tek seferde baskı stratejisi de 3D baskının bir inşaat yöntemi olarak, yazıcı otomasyon sürecini iyileştirme stratejisine dâhil edilebilir. Bu konuda büyük çabaların sarf edilmesi gerektiği açıktır.

3D yazıcının özelliklerine kıyasla beton özelliklerinin belirlenmesi kısmen daha kolay görülse de, betonun pompalanabilirlik ve taşıtılabilirlik açısından çalışılabildiği aralıkların dar olduğu, çalışabilirlik sürelerinin, malzeme miktarlarının, malzeme değişiminin ve hatta hava sıcaklıklarının betona büyük etkileri olabileceği düşünülmelidir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, 3D yazıcı teknolojisinin ülkemiz inşaat sektöründe ilk uygulaması durumundaki bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her aşamada desteklerini esirgemeyen İSTON AŞ Genel Müdürü Sn. Deniz DEMİR'e, bu yayının hazırlanması aşamasında katkılarından dolayı Sn. Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e teşekkürü bir borç bilirler.



KAYNAKLAR

- [1] Wolf, R.J.M. (2015), "3D Printing of Concrete Structures, Eindhoven University of Technology Department of the Built Environment", Graduation Thesis.
- [2] Lim, S.; Le, T.; Webster, J.; Buswell, R.; Austin, S.; Gibb, A.; Thorpe, T. (2009), "Fabricating Construction Components Using Layer Manufacturing Technology", In Proceedings of the Global Innovation in Construction Conference (GICC'09), Loughborough, UK, 13-16 September 2009.
- [3] Totalkustom, available online: <http://www.totalkustom.com/3d-castle-completed.html>.
- [4] Cnet, available online: <http://www.cnet.com/news/dubai-unveils-worlds-first-3d-printed-office-building>.
- [5] Mediaoffice, available online: <http://mediaoffice.ae/en/media-center/news/23/5/2016/3d-printed-officebuilding.aspx>.
- [6] 3ders, available online: <http://www.3ders.org/articles/20161214-spain-unveils-worlds-first-3d-printed-pedestrian-bridge-made-of-concrete.html>.
- [7] 3ders, available online: <http://www.3ders.org/articles/20170602-cybe-construction-completes-3d-printing-of-168-sq-m-rdrone-laboratory-in-dubai.html>.
- [8] De Ingenieur, available online: <https://www.deingenieur.nl/artikel/betonnen-fietsbrug-uit-de-printer>.
- [9] 3ders, available online: <http://www.3ders.org/articles/20170213-3d-printing-construction-company-apiscor-prints-37-m2-house-near-moscow-plans-global-expansion.html>.
- [10] Cementonline, available online: <https://www.cementonline.nl/proefstuk-eerste-3d-geprinte-autobrugsterker-dan-verwacht>.
- [11] 3ders, available online: <http://www.3ders.org/articles/20170907-3d-printed-concrete-office-hotel-coming-to-copenhagen.html>.
- [12] Tay, Y.W.D.; Panda, B.; Paul, S.C.; Mohamed, N.A.N.; Tan, M.J.; Leong, K.F. (2017), "3D printing trends in building and construction industry: A review", *Virtual Phys. Prototyp.* 12, 261-276.
- [13] Khoshnevis, B., Hwang, D., Yao, K., & Yeh, Z. (2006), "Mega-scale fabrication by contour crafting", *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, 1(3), 301-320.
- [14] Khoshnevis, B., & Zhang, J. (2012), "Extraterrestrial Constructing Using Contour Crafting".
- [15] Le, T., Austin, S., Lim, S., Buswell, R., Law, R., Gibb, A., et al. (2011), "Hardened properties of highperformance printing concrete", *Cement and Concrete Research*, 42, 558-566.
- [16] Yingchuang (2015), *Yingchuang.com*, retrieved february 2015, from yhbm.com.
- [17] *www.3dprinting.com*, (2014).
- [18] Anderson, S. (2015), "Concrete Plans: CyBe's Berry Hendriks Describes Plans to 3D Print with Mortar", retrieved january 2015, from 3Dprint.com.
- [19] Alec (2014, December), "Slovenian construction pioneers BetAbram share footage of their 3D house printers in action", retrieved february 2015, from 3ders.org.
- [20] Rael, R., & San Fratello, R. (2011), "Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing", *Integration through computation - Acadia 2011 Proceedings*.
- [21] Oxman, N., Keating, S., & Tsai, E. (2011), "Functionally Graded Rapid Prototyping, Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping", *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*.
- [22] IAAC (2014), *Minibuilders*, retrieved june 2014, from iaac.net.
- [23] Krassenstein, E. (2014, August), "First Entirely 3D Printed Estate is Coming to NY, Including a 3D Printed 2400 Sqft House, Pool & More", retrieved february 2015, from 3Dprint.com.
- [24] Saunders, S. (2017), "3D Printed Concrete Bridge in the Netherlands Officially Open to Cyclists, Eindhoven University of Technology (TU/e)", available online: <https://3dprint.com/191375/3d-printed-concrete-bridge-open>.
- [25] Kim K., Park S., Kim W, Jeong Y and Lee J. (2017), "Evaluation of Shear Strength of RC Beams with Multiple Interfaces Formed before Initial Setting Using 3D Printing Technology", *MDPI Materials* vol 10.
- [26] Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Gibb AGF, Thorpe T (2012), "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete", *Mater Struct* 45:1221-1232
- [27] Wong, G. S., Alexander, M. A., Haskins, R., Poole, T., Malone, P. G. & Wakeley, L. (2001), "Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report", *USAE Research and Development Center*.
- [28] Griesser, A. (2002), "Cement-Superplasticizer Interactions at Ambient Temperatures, Thesis of Doctor of Philosophy", *Swiss Federal Institute of Technology, Zürich*.
- [29] Austin S, Robins P, Goodier C I (2005), "Low-volume wet-process sprayed concrete: pumping and spraying", *Materials and Structures* 38:229-237.
- [30] Phan, T.L. (2008), "High strength concrete at high temperature- an overview" <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build02/PDF/b02171.pdf>.
- [31] Arıoğlu, E., Girgin, C., Arıoğlu, N. (Ocak 2002), "Betonda çekme/basınc dayanımı oranının irdelenmesi", *Hazır Beton dergisi*. Ocak-Şubat 2002, Sayfa 58-63.