



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

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

# 3B YAZICIYLA BASKILANAN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA KATMANLAR ARASI BAĞ DAYANIMININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF INTERLAYER BOND STRENGTH  
IN CEMENT-BASED MORTARS PRINTED WITH 3D  
PRINTER

**Yazarlar (Authors):** Tayfun Uygunoğlu<sup>ID</sup>, Feyza Çetingül<sup>ID\*</sup>

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Uygunoğlu T., Çetingül F., "3B Yazıcıyla Baskılanan Çimento Esaslı Harçlarda Katmanlar Arası Bağ Dayanımının İncelenmesi" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 7(3): 362-370, (2023).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1316578

Araştırma Makale/ Research Article

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

# 3B YAZICIYLA BASKILANAN ÇİMENTO ESASLI HARÇLARDA KATMANLAR ARASI BAĞ DAYANIMININ İNCELENMESİ

Tayfun Uygunoğlu<sup>a</sup>, Feyza Çetingül<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE.

\*Sorumlu Yazar: [feyzacetingul@gmail.com](mailto:feyzacetingul@gmail.com)

(Geliş/Received: 16.06.23; Düzeltme/Revised: 28.09.23; Kabul/Accepted: 05.11.23)

## ÖZ

Geleneksel yöntemlerle bina üretimi yıllardır kullanılmakta olan bir yöntemken, son yıllarda üç boyutlu yazıcılarla bina üretimi giderek daha popüler hale gelmektedir. Üç boyutlu yazıcılarla üretilen yapıların en önemli özelliklerinden biri, katmanlı üretim tekniğidir. Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ile 25 katmanlı olarak baskılanan bir yapının en alt katmandan en üst katmana kadar olan katmanlar arası bağ dayanımı incelenmiştir. Üst üste gelen katmanların ağırlıklarının katmanlar arası bağ bölgelerine etkisi ve yazdırılma aşamasında oluşacak herhangi bir kesintiden ötürü oluşabilecek soğuk derz riski farklı zamanlarda bekleme gerçekleştirilerek araştırılmıştır. Öncelikle taze harcın ekstrüde edilebilirlik ve akışkanlığa karşı gösterdiği direnç özellikleri arasındaki ilişki belirlenmiştir. Priz alma süresine bakıldığında yazdırılma işleminden 90 dk sonra priz başladığı ve 250 dk geçtikten sonra da priz işleminin sona erdiği görüldü. Katmanlar arası bağ dayanımlarına bakıldığında ilk yazdırılan yani alt katmanların arasındaki bağ dayanımının üst katmanlar arasındakine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Farklı zaman aralıklarında soğuk derz oluşturulan katmanların bağ dayanımı incelendiğinde her geçen zamanın katmanlar arası bağ dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bağ Dayanımı, Eklemeli İmalat, Soğuk Derz.

## INVESTIGATION OF INTERLAYER BOND STRENGTH IN CEMENT-BASED MORTARS PRINTED WITH 3D PRINTER

### ABSTRACT

While traditional methods have been used for building construction for years, the use of 3D printers for building production has become increasingly popular in recent years. One of the most important features of structures produced with 3D printers is the layered manufacturing technique. In this study, the interlayer bond strength of a structure printed with an additive manufacturing method in 25 layers, from the bottom layer to the top layer, was investigated. The influence of the weights of the overlapping layers on the interlayer bond regions and the risk of cold joints that may occur due to any interruptions during the printing stage were examined by conducting waiting periods at different times. Firstly, the relationship between the extrudability and resistance properties of the fresh mortar against fluidity was determined. Looking at the setting time, it was observed that the initial setting occurred 90 minutes after the printing process and the final setting occurred after 250 minutes. When examining the interlayer bond strengths, it was found that the bond strength between the first printed layers, i.e., the lower layers, was higher than that between the upper layers. The examination of interlayer bond strengths of layers with cold joints formed at different time intervals revealed that each passing time reduced the interlayer bond strength.

**Keywords:** Bond Strength, Additive Manufacturing, Cold Joint.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde inşaat sektörü, teknolojik gelişmeler sayesinde büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Geleneksel yöntemlerle bina üretimi yıllardır kullanılmakta olan bir yöntemken, son yıllarda üç boyutlu yazıcılarla bina üretimi giderek daha popüler hale gelmektedir (Lim vd., 2012). Geleneksel yöntemlerle bina üretimi ve üç boyutlu yazıcılarla bina üretimi arasında bazı temel farklılıklar vardır. Geleneksel yöntemlerle yapılan binaların inşa süresi oldukça uzun olabilirken, üç boyutlu yazıcılarla yapılan binalar çok daha kısa sürede inşa edilebilmektedir. Üç boyutlu yazıcılar sayesinde, binaların inşa süresi günler hatta saatlerle ölçülebilir (Roussel, 2018). Ayrıca, üç boyutlu yazıcılarla yapılan binalar, geleneksel yöntemlerle yapılamayan karmaşık geometrik yapıların üretilmesine izin verir (Yuan vd., 2019). Bu da mimarlara daha fazla tasarım özgürlüğü sağlar ve daha ilginç ve yaratıcı binaların yapılmasına olanak tanır.

Üç boyutlu yazıcılarla üretilen yapıların en önemli özelliklerinden biri, katmanlı üretim tekniğidir ve yazdırılan bu katmanların birbirleri arasındaki aderans kuvveti yapının dayanım ve dayanıklılık özelliğini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Bu bağ kuvveti, yapıların dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından kritik bir faktördür. Katmanlı üretim tekniğinde yapı malzemesi bir katman halinde üst üste yazdırılır ve bu şekilde bina üretimi gerçekleştirilir (Pan vd., 2022). Eklemeli imalat tekniğiyle yazdırılan yapıların, katmanlar arasında bağlantı noktaları zayıf olabilir. Bu bağlantı kuvveti, binanın diğer bölümlerine de yansır ve tüm binanın güvenliği için kritik bir faktördür (Liv vd. 2023).

Üç boyutlu yazıcılarla yapılan binalarda alt katmanlar arasındaki bağlantı kuvveti, geleneksel yöntemlerle yapılan binalarla aynı seviyede olmayabilir. Bu nedenle, üç boyutlu yazıcılarla yapılan binaların dayanıklılığı ve güvenliği için özel çözümler geliştirilmelidir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, üç boyutlu yazıcılarla yapılan yapıların tasarımı ve üretimi, geleneksel yöntemlere göre daha dikkatli bir şekilde planlanmalı ve yapı malzemelerinin kalitesi ve dayanıklılığına özellikle dikkat edilmelidir (Aramburu vd., 2023). Bu nedenle, üç boyutlu yazıcılarla bina üretimi yaparken,

katmanlar arasında güçlü bir bağlantı oluşturmak için çeşitli teknikler kullanılır.

Bu tekniklerden biri, her katmanın üstüne, alttaki katmanla birleşmesini sağlayacak bir bağlantı malzemesi eklemektir. Bu malzeme, özel bir formülasyona sahip olup, hem üst katmana hem de alt katmana yapışacak şekilde tasarlanmıştır (Chen vd., 2022). Bu sayede, katmanlar arasında daha güçlü bir bağlantı sağlanır ve yapıların dayanıklılığı artar. Başka bir teknik ise, katmanlar arasına takviye çubukları veya fiberler yerleştirmektir. Bu takviyeler, malzemenin alt katmanlara daha sıkı bir şekilde bağlanmasını ve yapıların daha sağlam olmasını sağlamaktadır. Bu teknik aynı zamanda, yapıların deprem veya diğer doğal afetlere karşı dayanıklılığını da artırır.

Sonuç olarak, üç boyutlu yazıcılarla yapılan binalarda alt katmanlar arası bağlantı kuvveti önemli bir konudur ve bu sorunun çözümü için özel tasarımlar ve güçlendirme yöntemleri kullanılabilir. Bu sayede, üç boyutlu yazıcılarla yapılan binaların dayanıklılığı ve güvenliği artırılabilir.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda Aramburu vd. 2022, üç boyutlu yazıcıların beton yapıların basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Araştırmacılar, farklı beton karışımlarının ve üç boyutlu yazıcı kullanımının beton yapıların basınç dayanımına nasıl etki ettiğini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, üç boyutlu yazıcı kullanarak üretilen beton örnekleri, geleneksel beton örnekleriyle karşılaştırmışlar ve basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Sonuç olarak, üç boyutlu yazıcı kullanımının beton yapıların basınç dayanımını etkilemediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, farklı beton karışımlarının basınç dayanımlarındaki farklılıklar da incelemişler ve belirli bir beton karışımının daha yüksek basınç dayanımı sağladığı bulmuşlardır. Bu çalışma, üç boyutlu yazıcı teknolojisinin beton yapıların basınç dayanımı üzerindeki etkisini anlamak için önemli bir katkı sağlamaktadır.

Singh vd. 2022, 3D yazıcı ile üretilen çelik lifli betonun mekanik ve makro yapısal özelliklerini farklı yükleme yönleri altında araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, farklı oranlarda çelik liflerle takviye edilmiş beton numuneleri üretmişler, örneklerin mukavemeti ve yapısal özellikleri çeşitli yükleme yönlendirmeleri

altında test edilmiştir. Sonuçta, çelik lif takviyeli betonun yüksek mukavemete sahip olduğunu ve yüklemeye bağlı olarak farklı özellikler sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, çelik liflerin beton numunelerinde çatlakların yayılmasını önlemede etkili olduğu bulmuşlardır. Bu çalışma, 3D yazıcı ile üretilen beton yapıların dayanıklılığına ve güvenliğine yönelik takviyeli beton kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Al-Qutaifi vd. 2018, yaptıkları çalışmada beton 3D baskı uygulamasında kullanılabilecek katmanlı jeopolimer yapıların mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Farklı jeopolimer karışımları kullanılarak katmanlı yapılar üretmişler ardından yapıların basınç ve eğilme dayanımlarını ölçmüşlerdir. Araştırma sonucunda, jeopolimer yapıların yüksek dayanıma ve dayanıklılığa sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, yapıların katmanlı yapısı, yüksek mukavemetli ve homojen bir yapı oluşturmada etkili olmuştur. Bu çalışma, beton 3D baskı uygulamaları için alternatif malzemelerin kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Weng vd. 2021, 3D beton baskı teknolojisinde ara katman bağlantı kuvvetinin artırılması için senkronize beton ve yapıştırıcı depolama sistemini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, özel bir tasarıma sahip bir 3D beton baskı sistemi kullanılmış ve ara katman bağlantı kuvveti artırmak için beton ve yapıştırıcıların senkronize şekilde depolanmasını sağlamışlardır. Deneysel çalışmaların sonucunda, senkronize depolama yönteminin ara katman bağlantı kuvvetini önemli ölçüde artırdığını ve baskı yapılarının dayanıklılığını artırdığını elde etmişlerdir. Bu çalışma, 3D beton baskı teknolojisinin geliştirilmesinde ara katman bağlantı kuvvetinin artırılması için yeni bir yöntem sunmaktadır.

Helsel vd. 2021, yaptıkları çalışmada idealize edilmiş beton eklemeli imalat ürünlerinin ara katman bağlarını karakterize etmek için tahribatsız testleri incelemişlerdir. Yüksek çözünürlüklü bir ultrasonik cihaz kullanılarak beton numuneleri taramışlar ve ara katman bağlantı kalitesi değerlendirmişlerdir. Deneyle sonuçta tahribatsız testlerin ara katman bağlantı kalitesinin belirlenmesinde etkili olduğunu ve bu yöntemin beton eklemeli imalat ürünlerinin kalitesinin

değerlendirilmesinde kullanılabileceği çıkarımında bulunmuşlardır. Bu çalışma, yıkıcı olmayan testlerin beton eklemeli imalat ürünlerinin kalitesinin kontrolünde kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Baduge vd. 2021 beton eklemeli imalatla üretilmiş harçların performansını artırmak için malzeme karışım tasarımı, işleme, ara katman bağlanması ve takviye yöntemlerini ele alan bir derleme çalışması yapmışlardır. 3D beton baskı teknolojisi ile ilgili önceki çalışmaların sonuçları incelemişler ve beton karışım tasarımı, işleme, ara katman bağlanması ve takviye yöntemlerinin performansı nasıl etkelediği değerlendirmişlerdir. Uygun beton karışım tasarımı, işleme, ara katman bağlanması ve takviye yöntemlerinin beton eklemeli imalatın performansını önemli ölçüde artırabileceğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışma, beton eklemeli imalatın performansının geliştirilmesinde kullanılabilecek farklı stratejileri özetlemektedir.

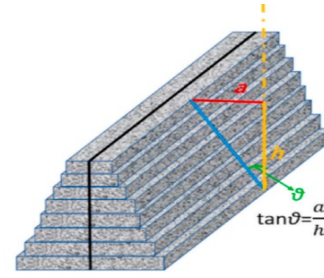
Kloft vd. 2020, Shotcrete 3D Printing (SC3DP) adlı bir beton eklemeli imalat tekniği kullanılarak üretilen beton elemanların ara katman bağ kuvveti üzerinde işlem parametrelerinin etkisini ele almışlardır. Yaptıkları çalışmada, farklı beton karışımları kullanılarak üretilen SC3DP örneklerinin ara katman bağlanma özellikleri incelemişler. İşlem parametreleri, malzeme akış hızı, nozul açısı ve nozul mesafesi gibi parametreler arasında değiştiği belirtilmiştir. Ara katman bağ kuvveti testleri, ASTM C1583 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, malzeme akış hızı, nozul açısı ve nozul mesafesi gibi işlem parametrelerinin ara katman bağ kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, uygun işlem parametrelerinin kullanımının, SC3DP teknolojisi ile üretilen beton elemanların ara katman bağ kuvvetini artırdığını ifade etmişlerdir. Bu çalışma, SC3DP teknolojisi kullanılarak üretilen beton elemanların ara katman bağ kuvveti performansını optimize etmek için farklı işlem parametrelerinin kullanımını değerlendirmiştir.

Huang vd. 2022, 3D baskılı beton tabakaların mekanik özelliklerini ve baskı parametrelerinin etkilerinin mekanizmasını inceleyen bir çalışma hazırlamışlardır. Farklı baskı parametreleri kullanılarak üretilen beton örneklerinin basınç

dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi gibi mekanik özelliklerini tespit etmişlerdir. Ayrıca, betonun mikro yapısı ve porozitesi gibi özellikler de incelenmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda, baskı parametrelerinin beton özelliklerine önemli bir etkisi olduğunu ve optimal baskı parametrelerinin kullanımının, beton tabakaların mekanik performansını artırabileceğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, bu çalışma betonun mikro yapısının ve porozitesinin, beton özelliklerindeki değişiklikler üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, 3D baskılı beton üretiminde baskı parametrelerinin optimize edilmesi ve betonun mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için bir referans sağlamaktadır.

Maier ve Lees 2022, işlevsel katmanlı betonun ara tabakalarının çatlama davranışını inceleyen bir çalışma hazırlamışlardır. Beton örneklerini, farklı katmanlar arasındaki yapışma özelliklerini ve ara yüzey çatlaklarındaki davranışı analiz etmek için test etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda, beton tabakalar arasındaki yapışmanın, beton örneklerinin mukavemetine önemli ölçüde etki ettiği ve ara tabakalardaki çatlakların yayılma davranışının farklı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, çalışmada, işlevsel katmanlı betonun üretiminde kullanılan malzemelerin ve prosesin, ara tabakaların yapışmasına ve çatlak yayılmasına etkisini de incelemişlerdir. Bu çalışma, işlevsel katmanlı betonun tasarımı ve üretiminde ara tabaka yapışması ve çatlak davranışının önemini vurgulamaktadır.

Liu vd. (2021), hidrokispropil metil selüloz ve silika dumanının 3D baskılı köpük betonun stabilitesi, reolojik özellikleri ve baskılabilirliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir ve yazdırılma özellikleri ile ilişkilendirmişlerdir. Çalışmada, 3D baskılı köpük betonun özelliklerini iyileştirmek için kullanılan hidrokispropil metil selüloz ve silika dumanının etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar Şekil 1’de  $\tan\theta$  açısı ne kadar küçük olursa yazdırılabilirliğin de o kadar iyi olacağını söylemişlerdir. Sonuç olarak da hidrokispropil metil selüloz ve silika dumanının köpük betonun stabilitesini artırdığını, reolojik özelliklerini iyileştirdiğini ve baskılabilirliğini artırdığını ifade etmişlerdir.



Şekil 1.  $\tan\theta$  açısının test edilmesi ve hesaplanması (Liu vd. 2021).

Genellikle literatürde eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilen yapıların basınç eğilme ve katmanlar arası bağ dayanımı incelenmiştir. Bağ dayanım bölgeleri farklı yöntemler kullanılarak iyileştirilmeleri esas alınmıştır. Bu çalışmada ise literatürdekilerden farklı olarak, eklemeli imalat yöntemi ile 25 katmanlı olarak baskılanan bir yapının en alt katmandan en üst katmana kadar olan katmanlar arası bağ dayanımı incelenmiştir. Üst üste gelen katmanların ağırlıklarının katmanlar arası bağ bölgelerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca yazdırma aşamasında katmanlar arasında oluşabilecek soğuk derz durumu incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

Eklemeli imalat için tasarlanan mikro-beton üretiminde su/çimento oranı 0,37 olarak sabit tutulmuştur. Beton üretiminde bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına uygun özgül ağırlığı 3.1 olan CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmış olup, kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. CEM I 42.5R Portland çimentosunun kimyasal analizleri

Kimyasal Analiz	CEM I 42,5 (%)
SiO <sub>2</sub>	20,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,05
CaO	62,08
MgO	2,55
Na <sub>2</sub> O	0,34
K <sub>2</sub> O	1,06
SO <sub>3</sub>	2,57
Kızdırma Kaybı	1,55

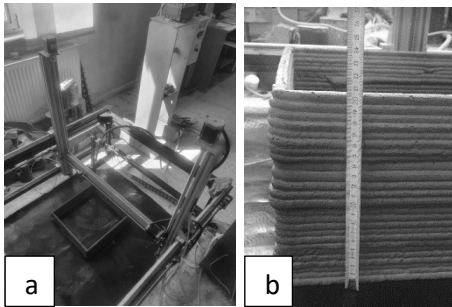
Agrega olarak en büyük tane boyutu 0,5 mm olan silis kumu ve 0-2 µm silis tozu olarak iki farklı tipte agregat kullanılmıştır. Agregaların özgül ağırlıkları TS EN 1097-6’ya göre

bulunmuş olup agregaların kuru yüzey doygun özgül ağırlığı  $2.64 \text{ g/cm}^3$  'dür. Karışım suyu olarak içme suyu, kimyasal Kimyasal katkı olarak Basf Türk fabrikasında üretilmiş olan MasterGlenium 51 kullanılmıştır. Yüksek oranda su azaltıcı ve sertleşmeyi hızlandırıcı özelliği olan bu katkı taze haldeki betonun işlenebilirliğini sağlamak amacıyla TS EN 934-2'ye uygun olarak kullanılmıştır.

## 2.2. Harç Üretimleri

Elemeli imalat yöntemiyle üretilen yapıların rötre özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla pistonla itilerek bir uçtan çıkartılma (RAM) yöntemiyle ekstrüzyona bağlı 3B baskı ile harçlar üretilmiş ve deneyler bu harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir.  $1 \text{ m}^3$  harç bileşimi hazırlayabilmek için bağlayıcı olarak  $750 \text{ kg/m}^3$  Portland çimentosu,  $450 \text{ kg/m}^3$  silis kumu ve bağlayıcının %37'si kadar su eklemesi yapılmalıdır.

Eklemeli imalat yöntemi ile baskılanacak betonların bileşenlerinde bağlayıcı olarak çimento, agrega olarak silis kumu ve silis tozu, su, su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Yazdırılabilir bir beton elde etmek için harcın akışkan olması gerekmektedir. Bunun yanında üst üste gelen katmanlar ezilme veya akma olmadan üzerine gelen yükleri taşımaktadır. Bunun için hazırlanan betonların yayılma çapları sabit tutularak karışım tasarımları gerçekleştirilmiştir. Yazdırılabilir beton kıvamına en uygun olan tasarımlar elde edilmiştir. Bileşenler planet tip mikser kullanılarak beton karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımları üç boyutlu yazıcıyı beslemek için ekstrüder cihazının haznesine doldurularak baskı işlemine hazır hale getirildi. Beton baskılama işlemine hazır hale geldiği zaman 3D yazıcı ile baskı işlemi gerçekleştirildi.

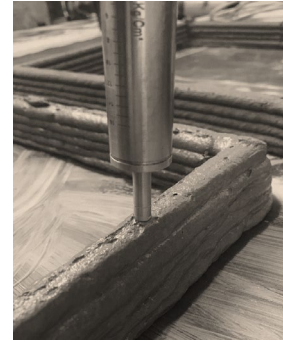


Şekil 2. a) 3D yazıcı ile harç baskılanma işlemi b) baskılanan kutu elemanın katman detayı ve yüksekliği

## 2.3. Yapılan Deneyler

Eklemeli imalat yönteminde geleneksel yöntemden farklı olarak kalıpsız bir döküm yapıldığından dolayı birbiri üzerine gelen katmanların yıkılma olmadan birbirini taşıyabilmeleri önemlidir. Bu gereksinimi karşılaması açısından akışkanlık özelliği tespiti için baskılanacak olan harç taze halde iken viskozite deneyi yapılmıştır. Viskozite deneyi için Brookfield DV-II model Viskozimetre cihazı kullanılmıştır. Ölçümler bingham reolojik modele göre yapılmıştır. Cihazda 0-100 dev/dk hızları ayarlanarak görünen viskozite ölçümleri alınmıştır. Bu değerler laboratuvar ortamı sıcaklığında ve V-74 nolu kanat şeklinde uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yazdırılan betonların priz süresini tespit edebilmek için cep tipi penetrasyon aleti kullanılmıştır (Şekil 3). İlk olarak mikro-beton hazırlandıktan sonra ekstrüzyon cihazının haznesine doldurulmuştur. Daha sonra ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiş ve 3D yazıcı harç ile beslenmiştir. Çimento bazlı beton katmanlar halinde yazdırılmıştır. ASTM C403 standardına uygun cep tipi penetrasyon aparatı ile yazdırılan en üstteki katman üzerinde priz başlangıç süreleri belirlenmiştir.



Şekil 3. 3D yazdırılan mikro-betonların priz sürelerinin belirlenmesi.

3D yazıcı için tasarlanacak taze çimento esaslı harç tasarımında gerekli işlenebilirlik aralıklarını belirlemek amacıyla baskılanabilirlik için kıvam deneyi yapılmıştır. Bu deney, 3D yazıcı kullanılarak katmanlar halinde tıkanma ve kopma olmadan yazdırılabilir, optimum ekstrüde edilebilirlik hızını ve harçların oranlarının tespiti için yapılan bir deneydir. Ekstrüde işlemi geniş çapa sahip bir hazneye doldurulan taze harcın 3D yazıcının ucu olan nozul kısmına doğru harcın itilmesini kapsar. Harç tasarımı hazırlanmış ve ekstrüzyon cihazının haznesine doldurulmuştur. 20 mm çapındaki çıkış ucundan ve farklı hız ayarlarında



ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda en ideal harç oranları tespit edilmiştir.

Katmanlar arası aderans dayanımının belirlenebilmesi için laboratuvar ortamında özel bir düzenek hazırlanmıştır (Şekil 4). Yazdırılan numuneler 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra aderans dayanımları incelenmiştir. Deneyde kullanılan yükleme presinin kapasitesi 20kN'dur ve yarmada çekme yöntemi ile aderans dayanımı sonuçları belirlenmiştir. Yazdırılan numunelerde en alttan başlayarak en üst katman aralığına kadar aderans dayanımları alınmıştır ve kırılma yükünün uygulanan gerçek alana bölünmesi denklem (1) ile hesaplanarak aritmetik ortalamaları alınmıştır.



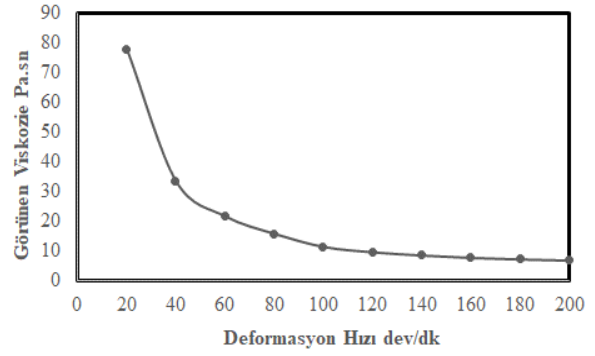
Şekil 4. Laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneği

$$T = \frac{2.P}{\pi.A} \quad (1)$$

Daha sonra taze harç yazdırılma aşamasında belirli katmanlar arasında farklı zaman aralıklarında soğuk derzler oluşturuldu. 0dk, 60dk, 120dk, 240dk ve 24 saatlik bekleme süreleri ile yazdırılan katmanlar arası aderans dayanımı deneyi uygulandı.

### 3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

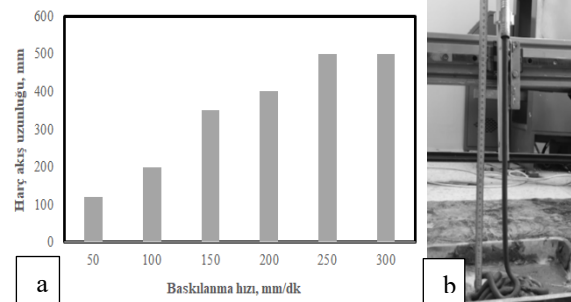
Baskılanmak için hazırlanan harç karışımının farklı deformasyon hızlarındaki görünen viskoziteleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Taze harç karışımının deformasyon hızına bağlı görünen viskozitesi

Deformasyon hızlarına bakıldığı zaman hız arttıkça değerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni deformasyon hız değerinin artmasıyla artan kayma gerilmelerinden kaynaklandığı söylenebilir.

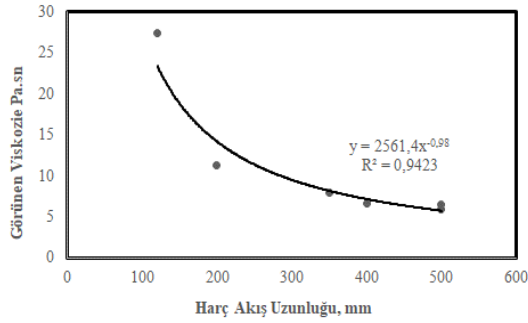
Ekstrüde edilebilirlik deneyi sonucunda yazdırılma işlemi için hazırlanan harçta 400 mm mesafeyi kopmadan akabildiği gözlemlenmiştir. Ekstrüde edilebilirlik deneyi çıkış ucunun yerden yüksekliği 400 mm olduğundan, harçların 400 mm kopmadan akması hedef değer olarak belirlenmiştir. Ekstrüzyon hız değerlerinin artması ile doğru orantılı olarak taze harcın kopmadan akma boyu da artmıştır. Yani düşük hızda ekstrüzyon edilen harç kesikli bir şekilde akmıştır. Harcın iletilmesi yavaş olduğu zaman akmaya başlayan taze harç birim ağırlığı ve yer çekimi etkisi belirli mesafelerde kopmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Taze harç tasarımında 250 mm/dk hız değeri ve üzerindeki değerlerde harcın kopmadan aktığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6. a) Harç karışımının farklı hızlarda ekstrüde edilebilirliği, b) 250 mm/dk hızında kopmadan ekstrüde edilen harç

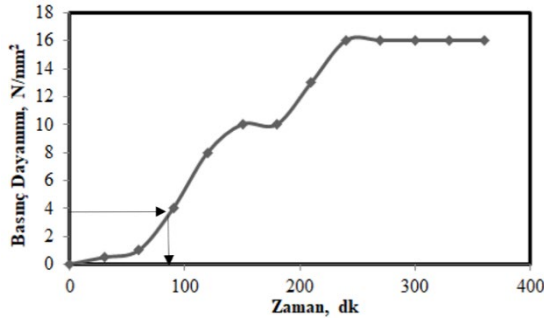
Görünen viskozite ve ekstrüde edilebilirlik deneylerinde aynı deformasyon hızlarındaki değerler alındığında iki özellik arasında oldukça anlamlı bir ilişki olduğu ( $R^2=0,94$ ) görülmektedir (Şekil 7). Bu sonuçlara göre

viskozitesi yüksek olan diğer bir ifade ile akışkanlığa karşı direnç gösteren harcın akış uzunluğu oldukça kısa olurken, viskozitenin azalmasıyla akış uzunluklarının da kopma olmadan arttığı görülmektedir. Hatta bu grafikten elde edilen denklem yardımıyla viskozitesi belli olan harcın yazdırılma aşamasında ne kadar akış uzunluğuna sahip olacağı elde edilebilir.



**Şekil 7.** Taze harcın akış uzunluğu ve akışkanlığa karşı gösterdiği direnç özellikleri arasındaki ilişki

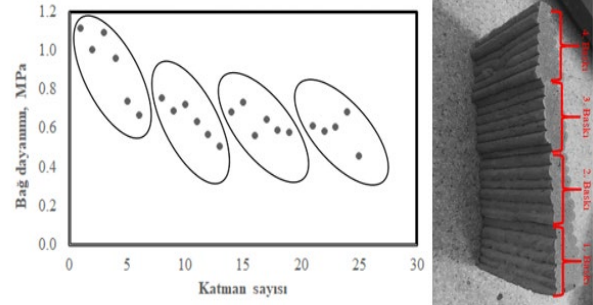
Penetrasyon deneyi sonucunda harç tasarımının priz alma süresi zamana bağlı olarak Şekil 8'de verilmiştir. Cep tipi penetrasyon ile priz alma süresini izlerken 4 N/mm<sup>2</sup> basınç dayanımına ulaşıldığı zamanda priz başladığı ve 16 N/mm<sup>2</sup> basınç değerine ulaşıldığında ise priz işleminin sona erdiğini söyleyebilmekteyiz.



**Şekil 8.** Yazdırılmış betonda zamana bağlı penetrasyon deneyi sonucu

Katmanlar arası bağ dayanımı deneyinde 90 günlük kür süresini tamamlamış 5 numunede 1. Baskı katmanlarından yani ilk yazdırılan katmandan başlanarak katmanlar arası bağ dayanımlarına bakılmıştır. İlk hazne ile baskılanan harçların basınç dayanımları, diğer 3 hazne ile baskılanan harçlara oranla %58 daha fazladır. Birbiri üzerine gelen katmanların alt katmanla olan bağ dayanımlarındaki artışın nedeni olarak, hem kendi ağırlığının hem de yerçekiminin etkisinden kaynaklandığı

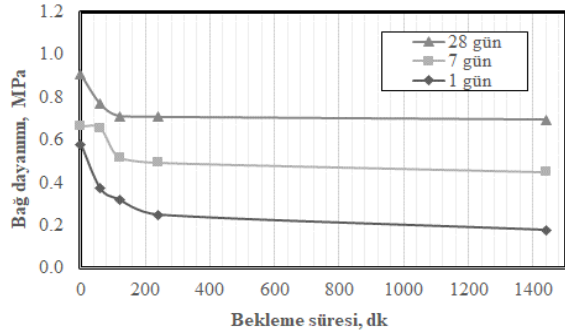
söylenbilir. Yine Şekil 9'daki grafiğe baktığımız zaman 1. Baskı işleminden sonraki baskılanan harçların katmanlar arası bağ dayanımlarının aynı aralıkta olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 9.** Çimento esaslı harçların 25 katmanlı baskılanan bir numunede katmanlar arası bağ dayanım grafiği

Çimento esaslı harçta beş farklı zaman aralığında baskılanan numunelerin katmanlar arası bağ dayanımı grafiği Şekil 10'da verilmiştir. 3D yazıcı ile harcın baskılanması sırasında herhangi bir nedenle oluşabilecek kesinti sonrası bir sonraki katmanın yazdırılma aşamasında oluşabilecek soğuk derz durumunu incelemek için sırasıyla 0, 60, 120, 240 ve 1440 dakika aralıklarla beklenerek mevcut bir katman üzerine yeni harç ile yazdırma işlemi gerçekleştirilmiş ve Şekil 10'da sunulmuştur. Baskılanan numunelere 1,7 ve 28 gün olmak üzere üç farklı kür zamanında dolaylı çekme yöntemi ile katmanlar arası bağ dayanımları belirlenmiştir. Bir günlük kür süresi için baskılamadaki bekleme zamanı dikkate alındığında beklemeden yapılan baskılama işlemine göre sırasıyla %33, %42, %58 ve %67 oranlarında azalma gözlemlenmiştir. Bu durum 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda test edilen numuneler içinde benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak her geçen zamanda yüzeylerin katılaşmaya başlaması ve özellikle penetrasyon deneyinden de görüldüğü gibi 60dk sonrası harçların priz almaya başlamasından dolayı katmanlar arası etkileşim azalmıştır. Kür sürelerine bakıldığı zamanda harçlar dayanım kazandıkça aderans dayanımlarının da doğru orantılı olarak arttığı söylenebilir.





**Şekil 10.** Farklı zaman ve kür sürelerindeki katmanlar arası bağ dayanımı değerleri

#### 4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sonuç olarak bu çalışmada laboratuvar ortamında 3D yazıcı kullanarak çimento esaslı harçlar baskılanmış ve beton numuneler üretilmiştir. Daha sonra üretilen numunelerde katmanlar arası bağ dayanımları incelenmiştir.

- Görülen viskoziteye bakıldığı zaman deformasyon hızı arttıkça değer azaldığı gözlemlenmiştir. Viskozitesi yüksek olan diğer bir ifade ile akışkanlığa karşı direnç gösteren harcın akış uzunluğu oldukça kısa olurken, viskozitenin azalmasıyla akış uzunluklarının da kopma olmadan arttığı görülmektedir.
- Ekstrüde edilebilirlik deneyi sonucunda taze harç 250 mm/dk ve üzerindeki hızlarda 400 mm mesafeyi kopmadan akmıştır.
- Penetrasyon deneyi sonucunda harç tasarımının ilk priz almaya başladığı zaman 90dk sonra gerçekleşmiştir.
- Katmanlar arası bağ dayanımlarına bakıldığında ilk yazdırılan yani alt katmanların arasındaki bağ dayanımının üst katmanlar arasındakine göre daha fazla olduğu görülmüştür.
- Farklı zaman aralıklarında soğuk derz oluşturulan katmanların bağ dayanımı incelendiğinde her geçen zamanın katmanlar arası bağ dayanımını düşürdüğü gözlemlendi. Kür sürelerine bakıldığı zaman ise harçlar dayanım kazandıkça aderans dayanımlarının da doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, eklemeli imalat yöntemi ile çimento esaslı harçlarda yazdırma işlemi gerçekleştirilirken mümkün olduğunca zaman kaybetmeden yazdırma işleminin tamamlanması

gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Şayet kesintiye uğrama gibi bir zorunluluk ortaya çıkacak olursa priz başlamadan yazdırma işlemi devam ettirilebilecekken, priz süresi sonrasında bağ dayanımı önemli derecede zayıfladığından aderans artırıcı önlemler alınması tavsiye edilmektedir.

#### KAYNAKLAR

1. Aramburu A., Calderon-Uriszar-Aldaca I., Puente I., "3D printing effect on the compressive strength of concrete structures", *Construction and Building Materials*, Vol. 354, Issue 129108, 2022.
2. Singh A., Liu Q., Xiao J., Lyu Q., "Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction", *Construction and Building Materials*, Vol. 323, Issue 126616, 2022.
3. Al-Qutaifi S., Nazari A., Bagheri A., "Mechanical properties of layered geopolymer structures applicable in concrete 3D-printing", *Construction and Building Materials*, Vol. 176, Pages 690-699, 2018.
4. Weng Y., Li M., Wong T.N., Tan M.J., "Synchronized concrete and bonding agent deposition system for interlayer bond strength enhancement in 3D concrete printing", *Automation in Construction*, Vol. 123, Issue 103546, 2021.
5. Michelle A. Helsel, John S. Popovics, Peter B. Stynoski, Eric Kreiger, Non-destructive testing to characterize interlayer bonds of idealized concrete additive manufacturing products, *NDT & E International*, Vol. 121, Issue 102443, 2021.
6. Baduge S.K., Navaratnam S., Abu-Zidan Y., McCormack T., Nguyen K., Mendis P., Zhang G., Aye L., "Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing", interlayer bonding, and reinforcing methods, *Structures*, Vol. 29, Pages 1597-1609, 2021.
7. Kloft H., Krauss H., Hack N., Herrmann E., Neudecker S., Varady P.A., Lowke D., "Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP)", *Cement and Concrete Research*, Vol. 134, Issue 106078, 2020.
8. Huang X., Yang W., Song F., Zou J., "Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters", *Construction and Building Materials*, Vol. 335, Issue 127496, 2022.

9. Maier M., Lees J., “Interlayer fracture behaviour of functionally layered concrete”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 271, Issue 108672, 2022.
10. Liu C., Wang X., Chen Y., Zhang C., Ma L., Deng Z., Chen C., Zhang Y., Pan J., Banthia N., “Influence of hydroxypropyl methylcellulose and silica fume on stability, rheological properties, and printability of 3D printing foam concrete”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 122, Issue 104158, 2021.
11. Roussel N., “Rheological requirements for printable concretes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, Pages 76-85, 2018.
12. Yuan Q., Li Z., Zhou D., Huang T., Huang H., Jiao D., Shi C., “A feasible method for measuring the buildability of fresh 3D printing mortar”, *Construction and Building Materials*, Vol. 227, Issue 116600, 2019.
13. Pan T., Guo R., Jiang Y., Ji X., “How do the contact surface forces affect the interlayer bond strength of 3D printed mortar?”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 133, Issue 104675, 2022.
14. Li Q., Gao X., Su A., Lu X., “Interlayer adhesion strength of 3D-printed cement-based materials exposed to varying curing conditions”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 74, Issue 106825, 2023.
15. Aramburu A., Calderon-Uriszar-Aldaca I., Puente I., “Wet joint performance of 3D printed concrete beam segments under flexural loading”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 73, Issue 106728, 2023.
16. Lim S., Buswell R.A., Le T.T., Austin S.A., Gibb A.G.F., Thorpe T., “Developments in construction-scale additive manufacturing processes”, *Automation in Construction*, Vol. 21, Pages 262-268, 2012.
17. Chen Y., Chang Z., He S., Çopuroğlu O., Šavija B., Schlangen E., “Effect of curing methods during a long time gap between two printing sessions on the interlayer bonding of 3D printed cementitious materials”, *Construction and Building Materials*, Vol. 332, Issue 127394, 2022.