



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**SELÜLOZİK KATKILARIN**  
**SÜRDÜRÜLEBİLİR 3D BETON ÜRETİMİNDE**  
**KULLANIMININ İNCELENMESİ**

**Ayşe KAROĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2023**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Ayşe KAROĞLU tarafından hazırlanan “Selülozik Katkıların Sürdürülebilir 3D Beton Üretiminde Kullanımının İncelenmesi” adlı tez çalışması 20/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

#### Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

#### Üye

Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK

### İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN  
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 123M159 nolu proje ile desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Ayşe KAROĞLU

20.06.2023

**ÖZET****YÜKSEK LİSANS****SELÜLOZİK KATKILARIN SÜRDÜRÜLEBİLİR 3D BETON ÜRETİMİNDE  
KULLANIMININ İNCELENMESİ****Ayşe KAROĞLU****Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN****2023, 74 sayfa****Jüri****Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN  
Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL  
Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK**

3D beton baskı teknolojisi, inşaat sektörünün karşı karşıya kaldığı yüksek maliyetler, düşük iş gücü verimliliği, yüksek iş kazası oranları, işçilik kusurları, yüksek enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları gibi sorunlara çözüm sunmaktadır. Bu tez çalışması ile, 3D baskı için kullanılacak harçların taze hal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tez çalışmasında, özellikle Türkiye’de bol bulunan, geri dönüşümü sağlanmadığı taktirde çevre kirliliğine ve canlı ölümlerine sebep olan *Cladophora* cinsi yeşil algden elde edilen selüloz nanolifler, ticari olarak temin edilen selüloz nanokristal ve halihazırda bir tür viskozite düzenleyici katkı olan welan sakızı içeren harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan harçlar üzerinde yayılma tablası, viskozimetre taze hal mukavemeti, basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Çimento pastalarının viskozite, akma gerilmesi ve tiksotropi değerleri Bingham modeli kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre selüloz nanolif katkısı, referans numunesine kıyasla akma gerilmesini yaklaşık 6 kat ve tiksotropik özelliği yaklaşık 48 kat arttırmıştır. Taze hal dayanımı açısından en iyi sonucu selülozik nanolif katkısı göstermiştir ve 50 N yük taşıyabilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımı açısından en iyi performansı selüloz nanokristal katkısı göstermiş ve eğilme dayanımını %6, basınç dayanımını %10 oranında arttırmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** 3D beton baskı, akma gerilmesi, *Cladophora* sp., selüloz nanokristal, selüloz nanolif, viskozite

**ABSTRACT****MS THESIS****INVESTIGATION OF THE USE OF CELLULOSIC ADDITIVES IN  
SUSTAINABLE 3D CONCRETE PRODUCTION****Ayşe KAROĞLU****Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Civil Engineering****Advisor: Prof. Ülkü Sultan KESKİN****2023, 74 sayfa****Jury  
Prof. Ülkü Sultan KESKİN  
Assoc Prof. Sadık Alper YILDIZEL  
Assoc Prof. Oğuzhan ÖZTÜRK**

3D concrete printing technology offers solutions to problems such as high costs, low labor productivity, high occupational accident rates, workmanship defects, high energy consumption and greenhouse gas emissions faced by the construction industry. With this thesis, it is aimed to improve the fresh state and mechanical properties of mortars to be used for 3D printing. Within the scope of this purpose, cellulose nanofibers obtained from the green alga *Cladophora*, which is abundant especially in Turkey and causes environmental pollution and animal deaths when not recycled, cellulose nanocrystals obtained from pine tree and welan gum, a viscosity regulator additive, were used. Slump flow, viscometer, green strength, compression and bending tests were carried out on the prepared mortars. Viscosity, yield stress and thixotropy values were obtained using the Bingham model. According to the results obtained, the cellulose nanofiber additive increased the yield stress by about 6 times and the thixotropic property by about 48 times compared to the reference sample. Cellulosic nanofiber additive showed the best result in terms of fresh state strength and could carry a load of 50 N. In terms of bending and compressive strength, cellulose nanocrystal additive showed the best performance and increased the bending strength by 6% and compressive strength by 10%.

**Keywords:** 3D concrete printing, *Cladophora* sp., cellulose nanocrystal, cellulose nanofiber, viscosity, yield stress.

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamda ve hayatımın tüm diğer alanlarında bana yol gösteren, değerli katkılarını ve desteklerini benden esirgemeyen danışmanım, kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez ve diğer çalışmalarım süresince benden her türlü yardımı esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Murat SAYDAN ve Arş. Gör. Furkan TÜRK'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 123M159 no'lu proje kapsamında tamamlanması nedeniyle TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen ve her daim yanımda olan kıymetli aileme sonsuz şükran ve saygılarımı sunarım.

Ayşe Karoğlu  
KONYA-2023

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>1.GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. 3 Boyutlu Baskı.....	3
1.1.1. Kontur işçiliği .....	4
1.1.2. Beton baskı.....	5
1.1.3. D-shape .....	7
1.2. 3D Baskı ile Üretilmiş Yapı Örnekleri .....	7
1.3. 3D Betonun Avantajları .....	10
1.4. 3D Betonun Dezavantajları.....	10
1.5. 3D Baskı Betonu Taze Haldeki Özellikleri .....	11
1.5.1. Pompalanabilirlik.....	12
1.5.2. Ekstrüde edilebilirlik.....	12
1.5.3. İnşa edilebilirlik .....	13
1.5.4 Açık zaman (open time).....	13
1.5.5. Katmanlar arası bağ dayanımı .....	13
1.6. 3D Baskı Harçlarının Reolojik Özellikleri .....	14
1.6.1. Akma gerilmesi.....	14
1.6.2. Akış modelleri.....	15
1.6.3. Tiksotropi.....	16
1.7. Reoloji Düzenleyiciler .....	17
1.7.1. Selüloz nanomalzemeler .....	17
<b>2.KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>19</b>
<b>3.MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>26</b>
3.1. Materyal .....	26
3.1.1. Çimento.....	26
3.1.2. Uçucu kül .....	26
3.1.3. Silis dumanı .....	27
3.1.4. Karışım suyu .....	27
3.1.5. Agrega.....	28
3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı .....	28
3.1.7. Selüloz nanolif .....	28
3.1.8. Selüloz nanokristal.....	29
3.1.9. Welan sakızı.....	29
3.2. Yöntem.....	30

3.2.1. Cladophora sp'den selüloz nanolif üretimi .....	30
3.2.2. Karışımların hazırlanması .....	30
3.2.3. Taze harç üzerinde yapılan deneyler .....	32
3.2.4. Sertleşmiş harç üzerinde yapılan deneyler.....	35
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>39</b>
4.1. Viskozimetre Ölçümleri.....	39
4.2. Yayılma Tablası .....	43
4.3. Taze Hal Dayanımı .....	44
4.4. Eğilme ve Basınç Deneyleri .....	47
4.5. Mikroyapı Analizi Sonuçları .....	50
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>54</b>
5.1. Sonuçlar .....	54
5.2. Öneriler .....	55
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>56</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$\tau_0$  :Akma gerilmesi  
 $\tau$  :Kesme gerilmesi  
 $\gamma$  :Kesme hızı  
 $\mu$  :Plastik viskozite  
nm :nanometre  
 $\mu\text{m}$  :mikrometre

### Kısaltmalar

3D: 3 Boyutlu  
3DCP: 3 Boyutlu Beton Baskı  
CC: Kontur İşçiliği  
CNF: Selüloz Nanolif  
CNC: Selüloz Nanokristal  
CSA: Kalsiyum Sülfoalüminat  
DOH: Hidratasyon Derecesi  
MCC: Mikrokristal Selüloz  
NRF: Nötron Radyografi Tesisi  
SEM:Taramalı Elektron Mikroskobu  
WG: Welan Sakızı  
UHPC: Ultra Yüksek Performanslı Beton

## 1.GİRİŞ

Giderek artan dünya nüfusu ile insanların temel gereksinimi olan barınma ihtiyacı artmaktadır. Özellikle hızlı kentleşmenin yaşandığı bölgelerde konut talebinin karşılanabilmesi temel sorunlardan birisidir (Usanmaz, 2021). Dahası son yıllarda Covid-19 pandemisi ve artan maliyetler sebebiyle sekteye uğrayan inşaat sektörü bu talebi karşılama konusunda yetersiz kalmakta ve konut açığı oluşmaktadır. Yıllardır dikkate değer bir değişime uğramadan süregelen inşaat sektörünün, Endüstri 4.0, dijitalleşme, bulut bilişim, nesnelerin interneti, yapay zekâ ve makine öğrenmesi gibi teknolojilere adaptasyonu zor olmaktadır. Ancak bu teknolojiler inşaat sektörüne entegre edilmelidir.

Geleneksel olarak üretilen betonarme yapılarda, önce donatı imalatı daha sonra çimento esaslı malzemelerin yerleştirilmesi ve dayanım kazanma sürecinde destek sağlaması amacıyla kalıpların kurulumu gerçekleştirilmektedir. Kurulan kalıplara beton yerleştirilmekte ve her eleman için farklılık gösteren kalıp alma süresi tamamlandıktan sonra kalıplar sökülmemektedir. Kalıpların montajı ve kullanılması, işçilik ve malzeme maliyetini artırır, inşa süresini uzatır. Kalıp maliyeti, toplam inşaat maliyetinin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır ve toplam inşaat süresinin yaklaşık %50'sini teşkil etmektedir.

Üretimin temeli insan emeğine dayandığından, üretim aşamalarının tümü doğrudan işçilik kalitesiyle ilişkilidir. Dolayısıyla, yapı elemanlarının dayanım ve durabilite performansı da işçilik kalitesine bağlı olmaktadır. Bu durum ayrıca, güvenlik problemlerini de beraberinde getirmektedir. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığının, Tehlike Sınıfları Yönetmeliği'ne göre "Çok Tehlikeli İşler" sınıfında yer alan inşaat sektörü; iş kazalarının en sık yaşandığı sektörlerden birisidir. İnşaat işçileri, diğer sektörlerde çalışan işçilerle kıyaslandığında yaklaşık 5 kat daha fazla kazaya uğrama riski taşımaktadırlar (Anonim, 2009). İnşaat sektörünün; özellikle eğitim seviyesi düşük işçilerin, düşük ücretle çalıştığı ve geçici istihdam biçimiyle yürüyen, taşeronluk sisteminin yaygın olduğu bir sektör olduğu bilinmektedir. Taşeronluk sisteminin yaygın olması çalışma ortamında koordinasyon eksikliğine sebep olarak iş sahalarını daha tehlikeli bir yer haline getirmektedir (Duman ve Etiler, 2013). Ayrıca; iş sahalarının geniş, dağınık ve farklı çalışma alanlarına sahip olması sebebiyle denetlenmesi ve takibi zor olmaktadır. Ayrıca, açık havada çalışılması sebebiyle hava koşullarından da oldukça etkilenmektedir (Ercan, 2010). İş güvenliği konusunda bilinçsiz olunması, kurallara uyulmaması, uzun saatler çalışılması gibi sebepler de iş kazalarının yaşanma sıklığını arttırmaktadır (Baradan, 2006).

Kalite ve güvenlik sorunlarının yanı sıra; inşaat sektörü sera gazı salınımı ve enerji tüketimi açısından yüksek maliyetlere neden olması ile de büyük bir dönüşüme ihtiyaç duymaktadır. İnşaat sektörü, küresel ölçekte enerji tüketiminde ve sera gazı emisyonlarında en büyük paya sahip sektörlerin başında gelmektedir (Allouhi ve ark., 2015). Küresel karbondioksit emisyonlarının ve enerji tüketiminin yaklaşık %30'unu oluşturan inşaat sektörü, diğer sektörlere kıyasla çok daha fazla ham madde tüketmektedir (Liu vd., 2021; Nassiri vd., 2021; Ruuska & Häkkinen, 2014). Beton karışımlarının yaklaşık %15'ini oluşturan çimento, fosil yakıtlardan sonra en yüksek sera gazı salınımına sebep olan malzemedir ve küresel karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %7'sinden çimento endüstrisi sorumludur (Du Plessis, 2002; Meyer, 2009; Pade & Guimaraes, 2007; Rodrigues & Joekes, 2011; Turner & Collins, 2013). Ayrıca, kalıp kullanımının atıklara sebep olduğu (Hager vd., 2016; Reiter vd., 2018; Tay vd., 2017), enerji tüketimini ve CO<sub>2</sub> salınımını arttırdığı için betonun sürdürülebilirliğini azalttığı bilinmektedir.

Özellikle kalite problemlerinin önüne geçmek amacıyla yenilikçi ve sürdürülebilir, iş gücünü azaltmaya yönelik çalışmaların odağında bulunan dikkat çeken bir üretim yöntemi olan 3 boyutlu basılabilir beton (3DCP), bahsedilen tüm sorunlara çözüm sağlayabilecek nitelikte görülmektedir (Li vd., 2020).

Bu tez çalışmasında 3D baskıda kullanılacak harçların reolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda doğada atık olarak bulunan ve suların yüzeyinde birikerek su kirliliğine sebep olan, yeşil bir alg türü *Cladophora sp.*'den elde edilen selüloz nanolif kullanılacaktır. *Cladophora sp.*, hava sıcaklıklarının artmasıyla birlikte su seviyelerinin düştüğü bölgelerde suların yüzeyini kaplayarak su tabanına güneş ışığı ve oksijen girmesini engellemektedir. Su yüzeyinde aşırı çoğalmaya başlayan alg, suda yeterli besin kalmadığında yüksek sıcaklığın etkisiyle bozulmaktadır. Dahası alglerin bakteriler tarafından ayrışma süreci aşırı oksijen tüketimine neden olur. Doğal olarak yeterli oksijenin kalmadığı ve güneş ışığın ulaşmadığı sularda diğer su canlılarının ölümleri meydana gelmektedir (Mihriyan, 2011).

Bu tez çalışması ile amaçlanan doğada atık olarak bulunan, çevre kirliliğine ve canlı ölümlerine sebebiyet *Cladophora sp.*'den sürdürülebilir bir harç/beton katkısı elde etmek ve bu katkı ile 3D baskı harçlarının özelliklerini iyileştirmektir. Dahası *Cladophora sp.*'den elde edilen selüloz nanolif ve çam ağacından elde edilmiş olan ticari olarak temin edilen selülozik nanokristal ve halihazırda bir tür viskozite düzenleyici katkı olarak

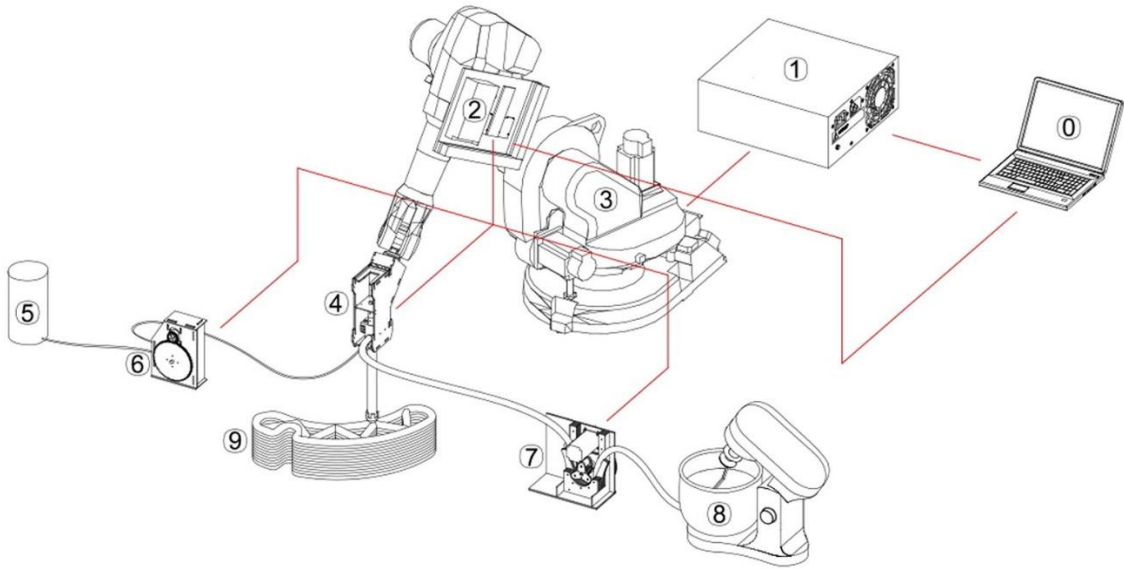
kullanılan welan sakızı içeren harçların yayılma çapı, viskozite, akma gerilmesi ve tiksotropik özelliği, 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı, taze haldeki dayanımı ölçülecek ve mikroyapı görüntüleri yorumlanacaktır. Ayrıca katkıları birbirleri ile kıyaslanacaktır.

### 1.1. 3 Boyutlu Baskı

Üç boyutlu baskı (3D baskı), 3 boyutlu olarak sanal ortamda tasarlanmış bir nesnenin, üç boyutlu yazıcı adı verilen makinelerle çeşitli malzemeler kullanılarak üretilme işlemidir. Şu anda, 3D baskı sağlık, havacılık, gıda, uzay, eğitim gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Shahrubudin vd., 2019). Her geçen gün kullanım alanı genişleyen ve yaygınlaşan 3D baskının, inşaat sektöründe kullanımı diğer sektörlerle kıyasla daha sınırlı kalmıştır. Yapı sektöründe kullanımının yaygınlaşması üzerine birçok çalışma yapılmaktadır.

3D beton baskı, bir 3D yazıcı ile inşaat için kullanılabilen özel bir beton türüdür. 3D baskı için geleneksel beton dökümünde kullanılan kalıp kurma ve vibrasyon gibi uygulamalara gerek duyulmamaktadır. 3D baskılı beton, püskürtme beton ve kendiliğinden yerleşen betonun avantajlarını birleştirmektedir. 3D beton baskı (3DCP), sanal ortamda tasarlanan yapı elemanlarının birkaç farklı baskı teknolojilerinden biri kullanılarak dijital olarak üretilme sürecidir. 3D beton baskı insan müdahalesi ve kalıp işçiliği gerektirmeyen, 7 gün 24 saat otomatik üretimi ve geometrik olarak karmaşık yapıların imalatını mümkün kılan bir üretim şeklidir. 90'lı yılların başında Amerika'nın Kaliforniya eyaletinde Khoshnevis'in kontur işçiliği (Contour Crafting) adlı, yapıları daha az işçilik ve insan gücü ile daha hızlı ve efektif şekilde oluşturmayı sağlayan bir teknolojiyi tanıtmaya çalışmıştır (Khoshnevis, 2004).

Tipik bir 3D yazıcı ve dağıtım sistemi Şekil 1.1'de gösterilmektedir. 3D teknolojisinin ilk adımı, 3 boyutludan 2 boyutlu dilimleme yazılımıyla bir bina yolu tasarlamaktır. Bu yazılım nesnenin 3 boyutlu şeklini, belirli bir kalınlıkta düz ince katmanlara dilimler ve ardından her katmanın yolunu tasarlar. Tüm bu yollar, bir kontur çizgisi ve bir dolgu modelinden oluşmaktadır. Bu işlemin ana prensibi, nozülün (baskı ağzı) önceden belirlenmiş bir yol boyunca hareket ederek taze haldeki betonu ekstrüde etmesidir (Gosselin vd., 2016; J. Zhang vd., 2019).



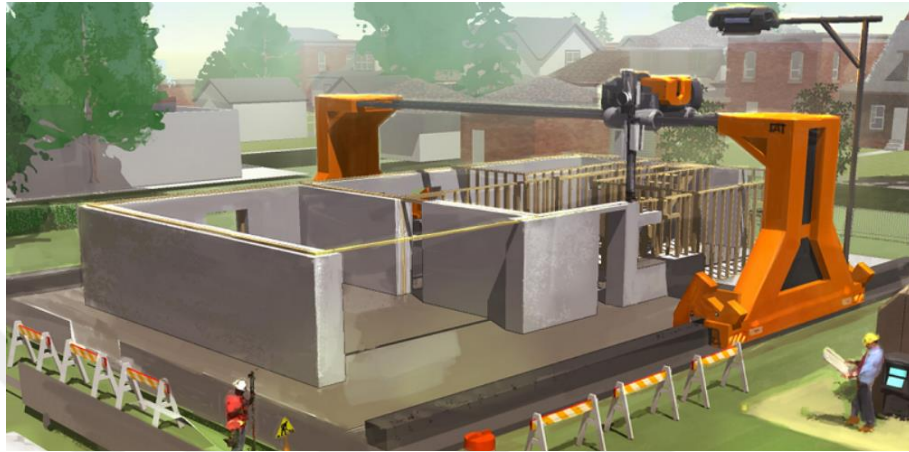
**Şekil 1.1.** 3D baskı sistemi şematik diyagramı 0.Komut sistemi; 1.Robot kontrolörü; 2. Yazdırma denetleyicisi; 3. Robotik kol; 4. Yazıcı kafası; 5. Priz hızlandırıcı madde; 6. Hızlandırıcı madde için peristaltik pompa; 7. Ön karışım için peristaltik pompa; 8. Premiks karıştırıcı; 9. 3D baskı ile yazdırılmış nesne (Gosselin ve ark., 2016)

3D baskı, malzemenin katman katman eklenerek oluşturulması (eklemeli/katmanlı imalat) esasına dayanması sebebiyle katmanlı imalat (additive manufacturing) olarak da adlandırılmaktadır. Şu anda inşaat ve mimari alanında üç büyük ölçekli eklemeli imalat süreci vardır: Kontur işçiliği (Contour Crafting), beton baskı (Concrete Printing) ve D-Shape. Üçünün de önemli boyutta bileşenlerin başarılı bir şekilde üretildiği kanıtlanmıştır ve inşaat ve/veya mimari uygulamalar için uygundur (Lim ve ark., 2012). Üç işlemin tümü, eklemeli olarak inşa edildikleri için benzerdir. Ancak; işlemler, farklı uygulamalar ve malzemeler için geliştirilmiştir. Bu durum da her birinin farklı avantajlara sahip olmasını sağlamaktadır.

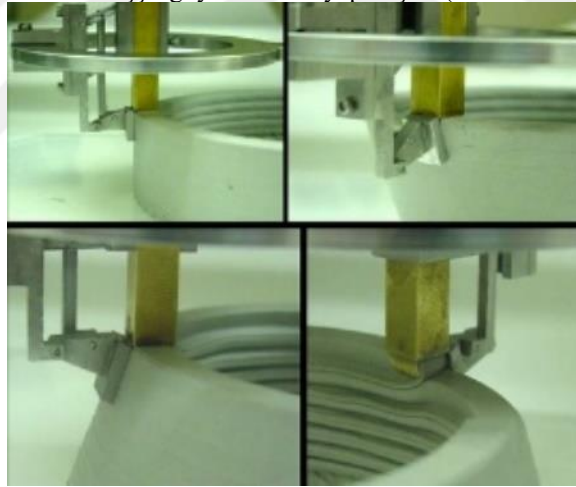
### 1.1.1. Kontur işçiliği

Kontur işçiliği (CC), yapıların otomatik inşası için Khoshnevis tarafından önerilen katmanlı bir imalat teknolojisidir. İlk kez Khoshnevis tarafından 1988 yılında (Austin & Khoshnevis, 1989) kullanılmıştır. Kontur işçiliği yöntemi, pürüzsüz yüzey kaplamalı büyük ölçekli bir 3D model oluşturmak için yapı malzemesinin biriktirilmesini içerir. Şekil 1.2'de görüldüğü üzere robotik kolu yönlendirmek için bir yapı görevi görececek olan bina zemininin etrafına raylar kurulur. Betonü katman katman ekstrüde etmek için ileri geri hareket eder. Nozül, yapının duvarları boyunca hareket ettikçe malzeme ekstrüde

edilir. Pürüzsüz ve düzgün yüzeylerin üretilmesini sağlamak için yatay ve dikey olarak hareket edebilen Şekil 1.3'te görülen bilgisayar kontrollü mala kullanılarak malalanır. CC teknolojisinin başlıca avantajları şunlardır: üstün yüzey kalitesi ve büyük ölçüde geliştirilmiş hızlı üretim. CC'nin diğer önemli avantajı kurulum için diğer robotik yöntemlerle entegre olabilmesidir.



Şekil 1.2. Kontur işçiliği yöntemi ile yapı inşası (Krassenstein, 2015)



Şekil 1.3. Kontur işçiliği (Khoshnevis & Bekey, 2003)

### 1.1.2. Beton baskı

Kontur işçiliğinde olduğu gibi, beton baskı da çimento harcının katman katman bir işlemle ekstrüzyonunu içerir. Baskı ağzı, önceden programlanmış bir yol boyunca hareket eder ve çimentolu malzemenin sürekli olarak ekstrüzyonunu yapar. Süreç, Şekil 1.4'te görüldüğü gibi kontur işçiliğinde kullanılan malalar olmadan geliştirilmiştir.

Kontur işçiliği yöntemi ile karşılaştırıldığında beton baskı yönteminin karmaşık geometrilerde daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (G. Ma & Wang, 2018).



Şekil 1.4. Beton baskı işlemi (Anonymus, 2019)



### 1.1.3. D-shape

Enrico Dini tarafından geliştirilmiş olan D-shape işleminde, diğer yöntemlerde kullanılan çimento benzeri macun yerine toz ve yapıştırıcı katmanları kullanılır. Bir nozül, önceden programlanmış bir yol boyunca hareket ederek, içine katı bir katalizör karıştırılmış bir sıvı yapışkan bileşiği bir kum yatağı üzerinde ekstrüde eder. Bağlayıcı ajan, katalizörle reaksiyona girer ve katılaşma süreci başlar. Bu sırada kalan kum yapıyı desteklemeye yarar. Daha sonra başka bir kum tabakası eklenir ve tüm işlem tekrarlanır. Yapı malzemesi ve bağlayıcı madde olarak kum ve magnezyum oksiklorür çimentosu (Sorel çimentosu olarak da bilinir) kullanılmaktadır (Nematollahi vd, 2017). Bu işlemde kum benzeri herhangi bir toz malzeme kullanılabilir ve nesneye yapışmamış kalan kum başka bir yerde yeniden kullanılabilirdiğinden çok az atık üretir (Perkins ve Skitmore, 2015). Ancak, toz bazlı teknik her katmanı nispeten yavaş bir baskı hızında oluşturur ve bu nedenle saha dışı ve küçük ölçekli imalatlar için daha uygundur (Li vd, 2020). Şekil 1.5'te kum yatağı üzerine ekstrüde edilmiş bağlayıcı görülmektedir.



Şekil 1.5. D Shape tekniği ile kolon üretimi (Al Jassmi vd., 2018)

### 1.2. 3D Baskı ile Üretilmiş Yapı Örnekleri

Gün geçtikçe yaygınlaşan 3D beton baskı teknolojisi, dünyanın çeşitli bölgelerinde kullanılmaya başlanmıştır ve birçok şirketin ilgi odağı haline gelmiştir. Dünya çapında 3D betonun uygulamalarına bazı örnekler verilmiştir:



Robotik, yazılım ve yapı malzemeleri dahil olmak üzere inşaat teknolojileri üzerinde çalışan bir şirket olan ICON, bugüne kadarki en büyük 3D baskılı konut projelerinden biri olan Icon's Genesis Collection projesi için rezervasyonlara başladı. Şekil 1.6'da görüldüğü üzere proje için çalışmalara başlanmıştır.



**Şekil 1.6.** ICON Vulcan inşaat sistemleri filosu, Genesis koleksiyonu için duvar sistemlerini basmaktadır (Bauguess, 2022)

Dünyanın önde gelen kalıp ve iskele sistemleri üreticilerinden ve tedarikçilerinden biri olan Peri, Şekil 1.7'de görülen, Almanya'da Avrupa'nın en büyük 3D baskı ile üretilmiş yapısı olan apartmanı inşa etti. Toplam yaşam alanı yaklaşık 380 m<sup>2</sup> (4.090 m<sup>2</sup>) olan üç katta beş daire bulunan bir konuttur. Dairelerin biri hariç hepsi kiralanmıştır. Sadece bir daire si gezip görmek isteyenlere gösterilmek üzere kullanılmaktadır.



**Şekil 1.7.** Avrupa'nın en büyük 3D baskılı apartmanı (Anonymus, 2022)

Şekil 1.8’de görülen şu anda dünyanın tek yüzen 3D baskılı evi, Scoolpt adlı robotik bir kol kullanılarak basıldı. Kullanılan malzeme, plastisiteyi iyileştirmek ve kurumayı hızlandırmak için nano-polipropilen lifler ve maddelerle zenginleştirilmiş bir beton karışımıydı. 43 m<sup>2</sup>’lik bu yaşam alanı bir yatak odası, banyo ve açık mutfaktan oluşmaktadır.



Şekil 1.8. Yüzen 3D baskılı ev (Anonymus, 2021)

Yalnızca konut değil çeşitli yapılar da 3D baskı ile üretilebilmektedir. Şekil 1.9’da görülen dünyanın en uzun 3D baskılı beton yaya köprüsü, Şangay’da Wisdom körfezi göleti üzerinde inşa edilmiştir. Tsinghua Üniversitesi tarafından tasarlanan köprü 26,3 m uzunluğuna sahiptir.



Şekil 1.9. 3D baskı ile üretilmiş yaya köprüsü, Şangay (Walsh, 2019)

### 1.3. 3D Betonun Avantajları

Gelişen teknolojinin yapı sektörüne entegre olması sonucu ortaya çıkan 3D beton yazıcılar, sektörün insan gücüne bağımlılığını azaltmaktadır. Bu sayede çalışma saatleri sınırlı kalmamakta ve 7/24 üretim yapabilmektedirler. Bu sayede inşa süresini oldukça kısaltabilmektedirler. İnsan gücüne bağımlı kalınmamasının sağladığı bir diğer avantaj ise, işçilik kusurlarının minimum düzeyde olduğu yapılardır. İmalatın büyük kısmının makineler tarafından yapılması iş kazalarının önüne geçerek iş sağlığı ve güvenliği problemlerini en aza indirmektedir (Nematollahi vd., 2017).

Mevcut inşaat sektörünün sürdürülebilirlik konusunda ciddi problemleri vardır. Tüm kalıpların kullanım ömrünü tamamladığında atık haline gelmesi göz önüne alındığında, sektör dünya çapında genel olarak artan atık üretimine ve CO<sub>2</sub> salınımına katkıda bulunur (Hager vd., 2016; Reiter vd., 2018; Tay vd., 2019). 3D baskı yönteminde, kalıp kullanımına gerek duyulmaması kalıpların maddi ve çevresel maliyetlerini ortadan kaldırmaktadır (Lloret vd., 2015; Manikandan vd., 2020; Perrot vd., 2016). Beton, yapıların toplam maliyetlerinin %35-%60'ını oluşturmaktadır. 3 boyutlu dijital üretim, malzemeyi yalnızca ihtiyaç duyulan yere yerleştirerek daha az beton kullanımı sağlar. Bu sayede daha verimli yapısal tasarım ile, daha sürdürülebilir inşaat yapımını sağlamaktadır (Wangler vd., 2016).

3D baskı teknolojisi mimari tasarımda büyük bir özgürlük sağlamaktadır. Maliyet artışı olmadan istenen geometrilerde yapıların inşasının mümkün kılmaktadır (Buswell vd., 2007; Gosselin vd., 2016; Perrot vd., 2016).

### 1.4. 3D Betonun Dezavantajları

20. yüzyılın başından itibaren otomasyon, inşaat sektörü dışındaki hemen hemen tüm üretim alanlarında büyümüş ve gelişmiştir. Ancak, inşaat endüstrisinde yaygınlaşması birçok sebeple oldukça yavaş olmuştur. Bu sebeplerden en önemlisi; yapılar farklı alıcılar için farklı koşullarda, farklı malzemelerle ve farklı alanlarda inşa edilmektedirler ve hepsi kendi başına birer prototiptir. Farklı olmaları sebebiyle standardize edilmesi veya bilgisayarlaşmaya uygun hale getirilmesi zordur ve kolayca seri üretime geçilememiştir (Perkins & Skitmore, 2015). Günümüzde artık daha büyük yapılar için kullanıma uygun hale gelmiş olsa da daha önceki mevcut otomatik üretim teknolojilerinin yapı inşası için yeterli büyüklükte olmaması da inşaat sektöründe

otomasyonun inşaat sektöründeki gelişiminin önünde büyük bir engel olmuştur. Geleneksel inşaat tekniklerinde, yerinde dökülen betonun desteklenmesi için kalıp kullanılırken, 3D baskıda malzeme kalıp kullanılmadan katman katman ekstrüde edilir. Bu sebeple malzeme ekstrüzyondan sonra şeklini korumalı ve sonraki katmanların inşasına imkan sağlamalıdır. Ekstrüzyondan önce ise, malzemenin iletim hattında tıkanıklığa sebebiyet vermemesi için yeterince akışkan olması gerekmektedir. Basılabilir karışım için birbiri ile çelişen bu iki özellik inşaat ölçeğinde 3D baskının gelişimini sınırlandırmıştır (Li ve ark., 2020; Panda ve Tan, 2018). Baskı işlemi sırasında geleneksel titreşimli sıkıştırmanın olmaması, basılı bileşenlerin anizotropik özellikte olmasına yol açabilmektedir. Bu nedenlerle baskı malzemelerinin hem taze hem de sertleştirilmiş özellikleri, basılı bileşenlerin kalitesi için kritik öneme sahiptir.

### **1.5. 3D Baskı Betonun Taze Haldeki Özellikleri**

3D beton baskı süreci; karıştırma, pompalama, ekstrüzyon ve inşa olmak üzere dört adımdan oluşur (Muthukrishnan ve ark., 2021). Bu adımlar taze betonun farklı reolojik özelliklere sahip olmasını gerektirmektedir. Pompalanabilirlik, ekstrüde edilebilirlik, inşa edilebilirlik ve çalışma süresi (open time), karışımın reolojik performansını oluşturan akma gerilimi, plastik viskozite ve kesme dayanımı gibi çeşitli reolojik parametrelere bağlıdır.

3D betonlarda, kalıp kullanılmaması sebebiyle basılan çimentolu malzemelerin kendi ağırlığını ve üzerine inşa edilecek katmanların ağırlığını deforme olmaksızın ya da minimum deformasyonla taşıması gerekmektedir (Kazemian vd., 2017; Panda & Tan, 2018; Paul, van Zijl, vd., 2018). Buna karşın malzemenin pompalama ve ekstrüzyon sisteminde tıkanmaya sebep olmaması için yeterince akışkan olması gerekir. Akışkanlık ve ekstrüde edilebilirlik, pompalama ve ekstrüzyon sırasında malzeme akış davranışını değerlendirmek için kullanılan iki parametredir. Bu iki özelliğin aynı olduğu düşünülse de akışkanlık malzemenin iletim sisteminde düzgün bir şekilde hareket etme yeteneği; ekstrüde edilebilirlik ise, daha çok taze malzemenin nozülde istenilen kalınlık ve genişlikte sürekli bir filament olarak çıkma kapasitesine odaklanmalıdır. Malzemelerin akış davranışı zaman zaman işlenebilirlik özelliği olarak tanımlansa da bu tanım uygun değildir. Çünkü malzemeler işlenebilirliklerini henüz kaybetmemişken bile iletim hattında tıkanıklığa sebep olabilmekte ve düzgün bir filament şeklinde basılabilmeye yeteneğini kaybedebilmektedir (Le vd., 2012).

Tüm taze özellikler ve dört temel adım aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.

### **1.5.1. Pompalanabilirlik**

Pompa, malzemeleri karıştırma ünitesinden nozüle taşır ve malzeme burada daha sonra ekstrüde edilir. Süreksizlik oluşmadan baskı yapılabilmesi için malzemenin baskı ağzına hızlı teslimatı 3D baskı sisteminin önemli bir parçasıdır. Kaynaklarda akışkanlık olarak da adlandırılan pompalanabilirlik özelliği malzemelerin mikserden baskı ağzına sorunsuz bir şekilde taşınmasını ifade etmektedir (Li ve ark., 2020; Paul ve ark., 2018; Roussel, 2018). Pompalanabilirlik, karışımların reolojik özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Pompalama işlemi sırasında karışımların düşük viskozite sergilemesi istenir. Karışımların pompalanabilirliği ayrıca agrega tane boyutu dağılımı, su/çimento oranı ve ince malzeme oranından da etkilenmektedir (Saruhan vd., 2022).

### **1.5.2. Ekstrüde edilebilirlik**

Ekstrüzyon, sabit bir kesit profiline sahip uzun nesnelere üretmek için kullanılan bir üretim süreci olarak tanımlanmaktadır (El Cheikh vd., 2017). Ekstrüde edilebilirlik, 3D baskıda yazıcının nozulundan herhangi bir kesinti/tıkanma olmaksızın gerekli boyutsal uygunlukla sürekli olarak ekstrüzyon yapma ve iyi baskı kalitesine sahip katmanlar oluşturma yeteneği olarak tanımlanmaktadır (Le vd., 2012; G. Ma & Wang, 2018; Rahul vd., 2019). İyi baskı kalitesi ile, ekstrüde edilen elemanların boşluklar ve süreksizlik gibi kusurlardan arınmış olduğu kastedilmektedir. Ekstrüde edilebilirlik açısından, ekstrüzyon hızı, malzemenin akış hızı, baskı ağzının şekli ve boyutları, kullanılacak agreganın maksimum tane çapı gibi parametreler oldukça önemlidir. Ekstrüde edilen malzemenin akış hızı ile ekstrüzyon hızı ile senkronize edilmezse, ekstrüde edilen filamentlerde süreksizlik oluşabilmektedir, baskı ağzının boyutları kullanılan agrega çapının en az 4-6 katı olmalıdır (El Cheikh ve ark., 2017; Le ve ark., 2012; Roussel, 2018; Saruhan ve ark., 2022).

### 1.5.3. İnşa edilebilirlik

Yazdırılabilir malzemelerin performansını değerlendirmek için bir başka kritik parametre olan inşa edilebilirlik, malzemenin ekstrüde edilmiş şeklini koruma kabiliyetini ve basılmış malzemenin yük altında deformasyona karşı direncini ifade etmektedir (Lim vd., 2012). İnşa edilebilirlik, filament katmanlarının dikey olarak istiflenmesidir. Taze malzemeler kendi ağırlığını ve üst katmanlardan gelen ağırlığı deforme olmadan taşıyabilmek için yeterli akma gerilimine sahip olmalıdır (Malaeb ve ark., 2019; Perrot ve ark., 2016). Aksi takdirde, basılan malzemenin yüksek geometrik doğruluğu elde edilemez ve basılan yapılar çökebilir.

### 1.5.4 Açık zaman (open time)

Açık süre, kuru karışım ve suyun ilk temasından itibaren malzemenin yazdırılabilir olduğu (pompalama sisteminde akabilir ve baskı ağzından ekstrüde edilebilir) süre olarak tanımlanmaktadır (Li vd, 2020; Le vd, 2012; Paul vd, 2018). Bu kriter betonun baskı mekanizması açısından ciddi önem taşımaktadır. 3D beton baskıda geleneksel yöntemde olduğu gibi tek seferde döküm yapılmadığı için ilk filamentin basımından sonuncuya kadar bazı özellikler zamanla değişmektedir. Bu nedenle, beton karışımının zamanla işlenebilirlik değişiminin daha iyi bir temsili, açık sürenin ölçülmesiyle açıklanmaktadır. Açık kalma süresinin malzemelerin priz alma süresi ile aynı olmadığına dikkat edilmelidir. Panda ve Tan (2018), yaptıkları çalışmada yazdırılabilir malzemelerin açıkta kalma süresinin her zaman malzemelerin priz alma süresinden daha kısa olduğuna dikkat çekmiştir.

### 1.5.5. Katmanlar arası bağ dayanımı

3DPC'de, filamentler arasındaki bağ dayanımı, basılı elemanın mekanik performansını ve anizotropisini büyük ölçüde etkilediğinden bu parametrenin incelenmesi gerekmektedir. Ekstrüzyon yolunun uzunluğu ve malzemenin yerleştirileceği hız, hem bileşenin üretim süresini hem de katmanlar arası bağ dayanımını etkilemektedir ve soğuk derze sebep olan temel faktörlerdir. Soğuk derzler, birbiri ardına dökülen beton katmanları arasında ortaya çıkar. Bir katmanın üretilmesi için maksimum



süreyi tanımlayan kritik bir dinlenme süresi (çoğunlukla açık zaman) aşılırsa oluşabilmektedir (Wangler vd., 2016). Ekstrüde edilmiş katmanlar arasındaki arayüz dayanımı yüksek oranda katmanların basımları arasındaki süreye bağlıdır. Birçok araştırmada, filamentlerin baskıları arasındaki sürenin artışıyla bağ dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir (Paul, Tay, vd., 2018; Wolfs vd., 2019). Bu durum soğuk derz oluşumu ile açıklanabilmektedir. Bu azalmanın olası sebepleri azalan tabaka yapışmasına ve daha yeni ve daha eski tabakaların üniform olmayan büzülmesine bağlanmaktadır (Le vd., 2012).

### **1.6. 3D Baskı Harçlarının Reolojik Özellikleri**

Rheos (akış) kelimesi kökeninden gelen reoloji, sıvıların akış özelliklerini incelemektedir. Pompalanabilirlik, ekstrüde edilebilirlik, inşa edilebilirlik ve katmanlar arası yapışma ile ilgili olduklarından, beton malzemenin akma gerilmesi, viskozitesi ve tiksotropisi gibi reolojik parametreleri oldukça önemlidir.

#### **1.6.1. Akma gerilmesi**

Çimentolu malzemeler taze haldeyken, akmadan sınırlı miktarda gerilmeye karşı koyabilmektedir. Akma gerilimi, etkileşim halindeki çimento parçacıkları ağının yapısı ve gücü tarafından belirlenmektedir (Roussel ve ark., 2010). Sisteme uygulanan kuvvet, etkileşim halindeki parçacıkların arasındaki bağ tarafından desteklenebilecek olan maksimum gerilmeyi aştığında akış başlamaktadır. Bu kritik değer akma gerilmesi olarak adlandırılmaktadır ve betonun işlenebilirliği ile taze hal dayanımını doğrudan etkilemektedir. Taze halde betonlar bu akma gerilmesinin altında, viskoelastik davranışa sergilemektedir; akma gerilmesi aşıldığında ise viskoz bir sıvı gibi davranmaktadır (Ferraris ve ark., 2004; Roussel, 2006). Statik akma gerilimi, malzemenin dinlenme durumundayken akışı başlatmak için gereken maksimum gerilmeyi ifade eder. Akma gerilmesinin altında, malzeme elastik davranış sergiler ve akmaz (Zhang ve ark., 2021). Statik akma gerilimi, CSH çekirdeklenmesinden etkilenen çimento partikülleri arasındaki koloidal etkileşimler ve rijit bağlar ağıyla ilişkilidir. Dinamik kayma gerilmesi, hareket halinde olan bir akışkanın akış durumunu sürdürmek için gereken minimum akma gerilmesidir (Koehler ve Fowler, 2004; Zhang ve ark., 2021) . Çimentolu sistemlerde

dinlenme süresinin artmasıyla birlikte statik akma gerilmesinin artması sonucunda statik akma gerilmesi dinamik akma gerilmesinden daha büyük bir değere sahip olmaktadır.

### 1.6.2. Akış modelleri

Kararlı akış davranışları genellikle bir Bingham veya Herschel-Bulkley modeli ile açıklanmaktadır.

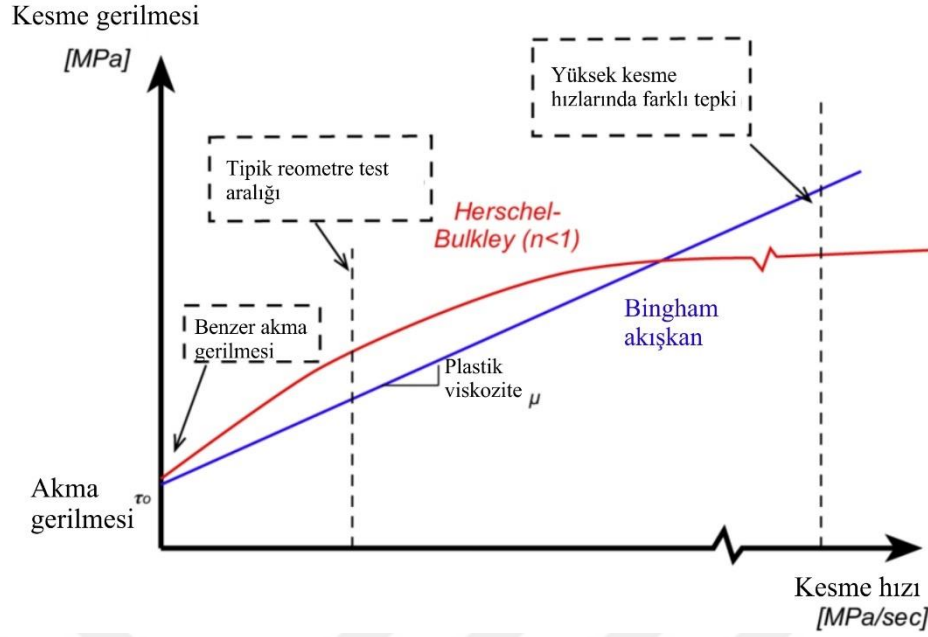
$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (1.1)$$

Burada  $\tau$  (Pa) kesme gerilmesi,  $\tau_0$  (Pa) akma gerilmesi,  $\mu$  (Pa.s) plastik viskoziteyi,  $\gamma$  ( $s^{-1}$ ) kesme hızını göstermektedir. Plastik viskozite, malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir ve Bingham modelindeki  $(\tau - \gamma)$  doğrusunun eğimi olarak ifade edilebilmektedir. Birçok durumda, çimento hamuru, harç ve betonun akış davranışı Bingham modeline uymaktadır fakat, akmayı başlatmak için gereken minimum kayma gerilmesi olan eşik kayma gerilmesinin, negatif olduğu durumlarda Bingham modelinin bu malzeme davranışını açıklamak için uygun olmadığı anlaşılmaktadır. Sıvılar her zaman doğrusal bir akış davranışı göstermeyebilirler bu durumda yine en yaygın kullanılan akış modellerinden biri olan "Herschel- Bulkley" modeli uygulanmaktadır.

$$\tau = \tau_0 + K \gamma^n \quad (1.2)$$

Burada,  $\tau$  kayma gerilmesini (Pa),  $\tau_0$  eşik kayma gerilmesini (Pa),  $\gamma$  kayma hızını ( $s^{-1}$ ),  $K$  katsayısı (Pa.sn) ve  $n$  akış indeksini göstermektedir. Akış indeksinin 1'e eşit olduğu durumda denklem Bingham modeline dönüşürken,  $n > 1$  kayma kalınlaşması,  $n < 1$  olduğunda ise kayma incelmesi davranışı sergilemektedir (Şekil 1.10). Kayma incelmesi davranışında, kayma hızı arttıkça görünür viskozitesinde azalma, kayma kalınlaşması davranışında ise kayma hızı arttıkça görünür viskozitede artma gözlemlenmektedir (Jiao vd., 2021; Yahia, 2011).





Şekil 1.10 Akış modelleri (Jolin ve ark., 2015)

### 1.6.3. Tiksotropi

Çimentolu malzemelerin pek çoğunda, dinlenme halinde, statik akma gerilmesi sürekli olarak artmaktadır ancak malzemeye güçlü bir şekilde kesme gerilmesi uygulanması veya karıştırılmasıyla birlikte malzeme referans duruma geri getirebilmektedir yani sistem dinlenmeye bırakıldığında viskozitesi artmakta kesme hızı uygulandığında ise viskozitesi azalmaktadır. Bu tersine çevrilebilir durum genellikle gözlemlenmektedir (Roussel vd., 2012). Bu tersine çevrilebilir davranış, hidrasyon reaksiyonunun uyku periyodu sırasında çimento tanelerinin temas noktalarında, CSH oluşumundan kaynaklanmaktadır (Panda vd., 2019; Perrot vd., 2016).

3D beton baskıda inşa edilebilirlik için yüksek akma gerilimi gerekliken, pompalanabilirlik ve ekstrüde edilebilirlik için düşük viskozite gereklidir. Baskı malzemesi iletim hattında ilerlerken yani pompalama ve ekstrüzyon işlemleri sırasında bir kesme gerilmesine maruz kalmaktadır, ekstrüde edildikten sonra ise dinlenme durumuna geçmektedir. Bu sebeple yüksek tiksotropik özellik gösteren malzemelerin 3D baskıda kullanılması pompalanabilirlik ve ekstrüde edilebilirliği kolaylaştırırken, ekstrüde edildikten sonra da şekil stabilitesinin sağlamaktadır.

Tiksotropi, kayma gerilimi-kayma hızı grafiğinin artan ve azalan eğrileri arasındaki alan (histerezis döngüsü) olarak ölçülebilmektedir (Assaad ve ark., 2003; Roussel, 2006; Saruhan ve ark., 2022).

## 1.7. Reoloji Düzenleyiciler

Betonun reolojisi, su/çimento oranı, çimento tane şekli ve boyutu, çimento bileşimi, karıştırma koşulları, su azaltıcı maddeler, viskozite düzenleyici ajanlar gibi faktörlerden etkilenmektedir. Reoloji, uygun akışkanlık ve işlenebilirlik için yüksek performanslı beton için en önemli faktörlerden biri olarak kabul edilir. Beton için akma gerilimi, farklı katkı maddelerinin üniform bileşimini korumak, akma ve ayrışmayı önlemek için kritik öneme sahiptir.

### 1.7.1. Selüloz nanomalzemeler

Selüloz nano malzemeler, en bol doğal polimerler olmaları, sürdürülebilirlikleri, biyolojik olarak parçalanabilirlikleri, nano ölçekli boyutları, geniş yüzey alanları, yüzey kimyasının kolayca değiştirilebilmeleri nedeniyle büyük ilgi görmeye başlamıştır (Brinchi ve ark., 2013; Klemm ve ark., 2018; Sun ve ark., 2016). Selüloz nanomalzemeler, süzülme ağları ve kimyasal etkileşimler (Van der Waals kuvvetleri, hidrojen bağı, elektrostatik çekim/itme ve hidrofobik çekim) oluşumu ile viskoz süspansiyonlar oluşturmaya yardımcı olmaktadır. Yüksek yüzey alanları nedeniyle bileşenler arasındaki teması ve reaktiviteyi artırır, yüksek performanslı ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin oluşturulmasını kolaylaştırır.

Nanoselülozun sınıflandırılması, selüloz nanokristaller (CNC'ler) ve selüloz nanolifler (CNF'ler) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Selülozik malzemelerin özellikleri büyük ölçüde selülozik kaynaklara ve işleme koşullarına bağlıdır. CNC'lerin ve CNF'lerin kimyasal özellikleri benzerlik gösterse de fiziksel özellikleri farklıdır. Çünkü CNC'ler genellikle selüloz liflerinden kimyasal asit hidroliz işlemiyle elde edilirken, CNF'ler liflerden mekanik bir işlemle çıkarılır (Nagarajan ve ark., 2021). CNC'ler, ağaç lifi gibi selüloz liflerinden elde edilmektedirler. Selülozun düzensiz veya amorf selülozik bölgelerin çıkarılması ve kristal bölgelerin tutulmasıyla sonuçlanan bir asit muamelesinden sonra hidrolize edilir ve daha sonra çubuk benzeri nanokristaller elde edilir. Selülozik kristalli formları mikrokristalin selüloz içerirken, lifli formları selüloz nano-fibrilleri içermektedir. Selüloz nanolifler, düşük ısıl genişleme, yüksek en/boy oranı, güçlendirme etkisi, iyi mekanik ve optik özellikler, fibril benzeri morfoloji (en/ boy oranları genellikle 50'den büyük), esnek, yarı kristalli, nano boyutlu ve genellikle

uzunlamasına bölünmeler sergilemektedir (Czaikoski ve ark., 2020). CNF'ler ortalama 0.1-2 $\mu$ m CNC'ler ise 100-250 nm uzunluğuna sahiptir.

Selüloz nanomalzemeler yüksek saflığa ve dayanıklılığa sahiptir ve büyük yüzey alanı ağırlık oranı ve aşırı hidrofilik doğası nedeniyle olağanüstü su tutma özelliği gösterir (Klemm ve ark., 2018).



## 2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kazemian ve ark., (2017) yaptıkları çalışma ile beton karışımlarını değerlendirmek için baskı kalitesi, şekil stabilitesi ve inşa edilebilirlik gibi parametreler belirlemişlerdir. Dört farklı karışım hazırlanmıştır. Bu çalışmadaki tüm karışımların su/bağlayıcı oranları 0.43 ve bağlayıcı dozajı  $600 \text{ kg/m}^3$  seçilmiştir. Tüm karışımlarda ortak olarak tip II Portland çimentosu, maksimum agrega boyutu 2,36 mm olan kum, su ve yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Bunlara ek olarak ilk karışımda (PPM) viskozite düzenleyici katkı maddesi, ikinci karışımda (SFPM) silis dumanı, üçüncü karışımda (FRPM) büzülmeyi önlemek amacıyla polipropilen elyaf takviyesi ve viskozite düzenleyici katkı, dördüncü karışımda (NCPM) ise saflaştırılmış bir atapuljit kili kullanılmıştır.  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ 'lik küp numunelere 28 günün sonunda basınç dayanım testi uygulanmış ve en yüksek basınç dayanımını ikinci karışım (SFPM) sağlamıştır. Şekil stabilitesi açısından en iyi sonucu atapuljit kili içeren karışımı vermiştir. Farklı içeriklerdeki karışımların incelenmesinin sonucunda silis dumanı ve yüksek oranda saflaştırılmış atapuljit kili ilavesinin, katmanların şekil stabilitesinde iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır. Polipropilen lif ilavesinin de şekil stabilitesinde hafif bir artış sağladığı gözlemlenmiştir. Karışımların pompalanabilirlik özelliğinin ilk sertleşme süresinden çok önce olabileceğini ve sertleşme süresinin çalışılabilirlik süresi için alternatif bir gösterge olarak kullanılamayacağını öne sürmüşlerdir.

Özalp ve ark., (2018) yaptıkları çalışma kapsamında 3D beton baskı için iki farklı karışım tasarımı yapmışlar ve bunlara ilişkin deney sonuçlarını sunmuşlardır. Agrega olarak 0-1,5 mm aralığında çapa sahip silis kumu, bağlayıcı olarak ise CEM I 42,5 R normal Portland çimentosu ve Beyaz Portland Çimentosu (BPC) 52,5 kullanılmıştır. 3D betonun karışım oranları; çimento: su: kum: kimyasal katkı = 1: 0,30: 1,5: 0,02 şeklinde seçilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı miktarı, çimento ağırlığına oranla %1,5- %2 arasında değişmektedir. Betonda oluşabilecek rötne ve çatlakların önüne geçmek için polipropilen mikro fiberler her karışımda  $600 \text{ gr/m}^3$  olmak üzere kullanılmıştır. Bu çalışmada su/çimento ve süperakışkanlaştırıcı/çimento oranları 3 boyutlu betonunun reolojik özellikleri ve işlenebilirliği açısından incelenmiştir. Su/çimento oranı 0,30 olan ve ağırlıkça %1 oranında süperakışkanlaştırıcı katkı içeren karışım basılamamıştır. Aynı miktarda süperakışkanlaştırıcı içeren karışımın su/çimento oranı 0,40'a yükseltildiğindeyse katmanlar kendini taşıyamadığından 3 katmandan fazla baskı yapılamamıştır. Su/çimento oranı 0,30 olan karışımın süperakışkanlaştırıcı miktarı

arttırılarak çimentoya ağırlıkça %2 oranında kullanılması sonucu betonun rahatlıkla basılabildiği ve kendi ağırlığını taşıyabildiği görülmüştür.

Le T. ve ark., (2012) yaptıkları bu çalışmada taze baskı betonunun en kritik özelliklerinin; işlenebilirlik, çalışılabilirlik süresi (open time), pompalanabilirlik ve inşa edilebilirlik olduğunu ileri sürmüşlerdir. Aynı su/bağlayıcı oranlarına sahip ancak karışımdaki kum ve bağlayıcı oranları değişen beş farklı karışım ile baskı yapmışlardır. Karışımlar çimento olarak CEM tip I 52.5, maksimum tane çapı 2 mm olan kum, uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak oluşturulmuştur. Ayrıca optimum özelliklere sahip karışımı elde edebilmek amacıyla karışımlara farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcı, priz geciktirici ve plastik haldeki büzülme ve deformasyonu azaltmak için ortalama 12 mm uzunluğunda 0.18 mm çapında polipropilen mikro lifler eklenmiştir. Pompalanabilirlik testleri sonucunda su/bağlayıcı oranı 0,26 olan ve ağırlıkça %70 çimento, %20 uçucu kül ve %10 silis dumanı, %1 süper akışkanlaştırıcı ve %0,5 priz geciktirici içeren karışımın baskı için en uygun karışım olduğuna karar verilmiştir. Bu karışım ayrıca süresi 100 dakikalık bir çalışma süresi sunmuştur. 100 mm'lik küp numunelerle yapılan basınç dayanımı testi sonucunda 28 günlük dayanımı 110 MPa olarak ölçülmüştür.

Zhang ve ark., (2018) yaptıkları çalışmada, taze 3D baskı betonunun inşa edilebilirliği, reolojik davranışı, işlenebilirliği, taze haldeki mukavemeti, açık kalma süresi ve hidrasyon ısısını test etmişlerdir. İnşa edilebilirliği belirlemek için inşa edilebilen maksimum katman yüksekliğini ölçmüşlerdir. Tikotropi, viskozite ve akma gerilimi reolojik parametrelerini, bir Brookfield reometresi kullanarak ölçmüşlerdir. 0, 15, 30 dakika dinlenme süresine sahip karışımlardan ölçüm almışlar ve ortak histerezis döngüsünü kullanarak sonuçları belirlemişlerdir. Taze 3B baskı betonu için izotermal kalorimetre eğrilerinin, hidrasyon hızı ile yapısal yeniden inşa etme hızı arasında karşılıklı bir ilişki olup olmadığı araştırmışlardır. Betonun taze haldeki dayanımı, tiksotropik özelliği, akma gerilimi ve inşa edilebilirliği arasında yakın bir ilişki olduğunu gözlemlemişlerdir. Nanokil ve silis dumanı ilavesinin betonun tiksotropisini, ham mukavemetini ve inşa edilebilirliğini geliştirdiğini gözlemlemişlerdir. Ancak, nanokilin daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Long ve ark., (2019) yaptıkları çalışma ile 3 boyutlu dijital baskı betonunun gereksinimlerini karşılayabilecek mikrokristal selüloz (MCC) içeren sürdürülebilir harçlar geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Bunların işlenebilirliği, reolojik davranışı, inşa edilebilirliği ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Toplamda yedi farklı karışım hazırlamışlardır. Karışımlarda Tip I normal Portland çimentosu, silis dumanı, uçucu kül,

ve maksimum 1 mm çapında kum kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0.35 olan ve selülozik mikrokristal içeriği, bağlayıcı ağırlığına göre ağırlıkça %0, 0.5, 1 ve 1.5 oranlarında olan dört karışım hazırlamışlardır. Bunlara ek olarak mikrokristal selüloz içermeyen su/bağlayıcı oranları 0.27, 0.30, 0.33 olan üç karışım daha hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, ağırlıkça %1 MCC içeren harçların plastik viskozitesinin ve akma gerilmesinin MCC içermeyen harçlara kıyasla daha yüksek olduğu ortaya konulmuştur. Ağırlıkça %1 mikrokristal selüloz içeren harçların inşa edilebilirliğinin daha iyi olduğu ve baskı işleminde katmanlar arasında büyük çatlakların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca %1 MCC'li harçların 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarının MCC içermeyen harçlara kıyasla belirgin şekilde daha fazla olduğu gösterilmiştir. 3 boyutlu baskı ile inşa edilen bir konutun yaşam döngüsü analizi (LCA) modellemesi yapılarak CO<sub>2</sub> emisyonu ölçülmüştür. Sonuçlar, eşdeğer mekanik dayanımlarda ağırlıkça %1 MCC kullanılması durumunda CO<sub>2</sub> emisyonlarının %6,82 oranında azaltılabildiğini göstermiştir.

Shakor ve ark., (2020) yaptıkları çalışmada cam elyafı ilave edilmiş ve edilmemiş çeşitli harç karışımları hazırlamışlar ve bu karışımları farklı hızlarda basmışlardır. Karışımlarda ortak olarak Tip 1 Portland çimentosu, çapı 150-425 µm olan ince Sidney kumu, süper plastikleştirici katkı maddesi, priz hızlandırıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri kullanılmıştır. Karışımlardan birine çimento ağırlığına oranla %1 cam elyafı eklenmiştir. Farklı katman sayılarına (1, 2, 4 ve 6 katman) sahip basılı yapıların mekanik performanslarını belirlemek amacıyla bazı testler yapılmıştır. Geleneksel betonun 3 boyutlu baskı ile üretilen betondan daha yüksek basınç dayanımı sağladığı sonucuna varmışlardır. 3 boyutlu baskı ile elde edilen numunelerin katman sayısı arttıkça dayanımlarının azaldığını gözlemlemişlerdir. 3 boyutlu basılan betonların kendi aralarında karşılaştırması yapıldığında ise cam elyaf takviyeli olanların basınç dayanımları cam elyaf takviyesi içermeyenlere oranla daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca cam elyafların hangi yönlerde yerleştiğini belirlemek amacıyla bir lazer tarama mikroskopu ile inceleme yapmışlar ve elyafların %80'inin yönünün baskı ağzının yönü ile aynı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ghantous ve ark., (2022) yaptıkları çalışmada, selüloz nanokristaller (CNC'ler) içeren baskılı çimento hamuru numunelerinin kurumasını değerlendirmek için nötron radyografisini kullanmışlardır. Bu çalışmadaki tüm karışımlarda su/çimento oranı 0,26'dır ve Tip 1 Portland çimentosu, yüksek oranda su azaltıcı bir katkı ve viskozite değiştirici katkı kullanılmıştır. Ayrıca iki farklı yöntemle elde edilen CNC kullanılmıştır. CNC1, 1 saat süreyle 45°C'de sülfürik asit hidrolizi kullanılarak odun hamurundan

özümlemiştir. CNC2, asetat dereceli çözünen kağıt hamurundan oksidatif yöntemle (geçiş metali katalizli oksidasyon) elde edilmiştir. Referans, CNC1 ve CNC2 olmak üzere üç karışım hazırlanmış ve her karışımdan iki numune basılmıştır: bunlardan biri doğrudan kurutma koşullarına maruz bırakılırken diğeri kapatılarak muhafaza edilmiştir. 3D baskılı kompozitlerinin su kaybı, nötron radyografisi tesisinde (NRF) nötron radyografisi kullanılarak incelenmiştir. Aşağıdaki kuruma sürelerinden sonra her bir 3D baskılı kompozitin birkaç radyografisi çekilmiştir: 0, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 72, 96 ve 168 saat. 168 saat sonra, hem kapalı hem de açık numuneler, sabit bir kütleye ulaşana kadar 105°C'de fırında kurutmaya tabi tutulmuştur. Her kuruma süresi için, bir saniye pozlama süresi ile üç radyograf alınmıştır. Kurutma süresinin sonunda numunenin hidrasyon derecesini belirlemek için hidrasyon ürünlerindeki buharlaşmayan su hacmi belirlenmiştir. Sonuç olarak 3D baskılı örneklerin kurumaya maruz bırakılmasının hidrasyon derecesini sınırladığı ve gözenekliliği arttırdığı sonucuna varılmıştır. Kuruma hızının, numunelerin yüzey alanı/hacim oranındaki artışla önemli ölçüde arttığını bildirilmiştir. Ek olarak, numunelerin hidrasyon derecesi, numune kalınlığının karekökü ile ilişkili (yani, yüzey alanı/hacim'in tersi) olduğu sonucuna varılmıştır. Numunenin hidrasyon derecesi, yüzey alanı/hacim'deki artışla birlikte azalmıştır. Basılı elemanda kurumayı en aza indirmek, hidrasyonu artırmak ve gözenekliliği azaltmak için uygun kürleme prosedürleri dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Reales ve ark., (2019) yaptıkları çalışmada 3D baskı için tasarlanmış nanosilika, mikrosilika, metakaolin ve nanokil içeren Portland çimentolu macunlar hazırlamışlardır. 0, 23, 45, 68 ve 90 dakika dinlenme sürelerine sahip karışımların reolojik ölçümleri reometre cihazı kullanılarak yapılmıştır. İdeal bir 3D baskı işleminin parametrelerini (katman yüksekliği, bir katmanı ekstrüde etme süresi ve yatay hız) belirleyen tiksotropik oluşum oranını elde etmek için reolojik sonuçlar kullanılmıştır. Nanosilikanın taze hal özellikleri üzerindeki etkilerinin sonuçları, yaygın olarak kullanılan diğer üç puzolanik nano ve mikro parçacıklardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Nanosilikanın, malzemenin yapısal oluşumuyla ilgili tüm parametreleri artırabilen, çimento hamuru için etkili bir koyulaştırıcı olduğu sonucuna varılmıştır. İncelenen tüm puzolanik parçacıklar, farklı mekanizmalar yoluyla hem ilk akma gerilimini hem de çimento hamurunun tiksotropik oluşum oranını artırma yeteneğine sahip olduğu gözlemlenmiştir ancak soğuk derzlerin oluşumunu önlemek için ekstrüde katmanlar arasındaki maksimum süre ile ilişkili maksimum ve minimum yatay hızın getirdiği sınırlamalar nedeniyle, katman yüksekliğindeki potansiyel kazancın yalnızca %5'e kadar bir 3D baskı işleminde etkili

bir şekilde kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Nanosilika parçacıklarının çimento hamuru için çalışılan diğer parçacıklara göre daha etkili kalınlaştırıcılar olmasına rağmen, etkilerinin maksimum ve minimum baskı hızları ile sınırlandırıldığı sonucuna varılmıştır.

Sun ve ark., (2022) yaptıkları çalışma ile, ultra yüksek performanslı betonun (UHPC'nin) matris reolojisini, çelik lif dağılımını ve mekanik özelliklerini optimize etmek için karışımlara konsantrasyon aralığı %0,05 ila %0,25 arasında değişen selüloz nano lif (CNF) süspansiyonu eklemiştir. Test sonuçları, CNF içeren UHPC'nin gerilme mukavemetinde %11-23'lük bir artış olduğunu göstermiştir. Test sonuçları, CNF'nin, UHPC'nin plastik viskozitesini ve akma gerilimini önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir. CNF konsantrasyonundaki artışla birlikte UHPC'nin eğilme mukavemeti ve tokluğu önce artmış, sonra azalmıştır. UHPC'nin doğrudan çekme hatası modu, CNF'ler eklendikten sonra tek çatlama çoklu çatlama değişmiştir. Mikroskopik sonuçlar, CNF süspansiyonunun eklenmesinin UHPC'nin iç yapısının kompaktlığını iyileştirdiğini ve CNF'lerin matrisin mikro çatlaklarını köprülediğini ve doldurduğunu göstermiştir. CNF'li UHPC'nin, numunelerin dibine yerleşen çelik elyaf sayısındaki azalmaya atfedilen daha düzgün çelik elyaf dağılımı elde ettiğini göstermektedir. CNF süspansiyonlarının eklenmesi, numunelerin dibine çöken çelik liflerin sayısını etkili bir şekilde azaltmıştır. Taramalı elektron mikroskopu analizleri, CNF'ler tarafından nano ölçekli takviyenin UHPC'nin mekanik özelliklerini iyileştirmeye yardımcı olduğunu göstermiştir.

Nassiri ve ark., (2021) yaptıkları çalışmada, asit hidrolizinden elde edilen selüloz nanokristaller (CNC'ler) ile mekanik olarak fibrile edilmiş selüloz nano lifler (CNF'ler) ilave edilmiş çimento hamurunun reolojisi, priz süreleri ve basınç dayanımını karşılaştırmıştır. Her iki selülozik malzeme de, kontrol örneğine göre basınç dayanımında benzer (%17-18) bir artış göstermiştir. CNF'ler için ağırlıkça %0,065 ve CNC için ağırlıkça %0,4'lük bir konsantrasyonda maksimum dayanıma ulaşılmıştır; bu miktarlardan sonra mukavemet düşüş göstermiştir. Bu çalışma, CNF jellerinin, dolaşık nanolif ağı nedeniyle çimento hamurunun viskozitesini arttırdığını göstermektedir. Bunun aksine, daha kısa ve daha hareketli CNC'lerin viskoziteyi CNF'ler kadar artırmadığı gözlemlenmiştir. CNC'ler priz geciktirici olarak çalışmış, ancak CNF'ler priz sürelerinde gecikme etkisinin yaklaşık yarısını göstermiştir.

Ma ve ark., (2020) bu çalışmada, 3D baskının dezavantajlarından biri olan baskı süresi aralığını uzatmak ve minimum etkiyle gecikmelerden/duruşlardan sonra inşaat baskısının yeniden başlamasını sağlamayı amaçlamışlardır. Bu amaç için kalsiyum sülföalüminat (CSA) çimentosu ve selüloz lifleri (CF) birleştirerek katmanlar arası



yapışmayı geliştirmek üzere 3DCP için bir katkı harcı geliştirmişlerdir. Daha iyi basılabilirlik elde etmek ve yüksek basınç dayanımına ulaşabilmek için, karışımlarda yüksek belitli kalsiyum sülfoalüminat (HB-CSA) çimentosu ve 52.5 Portland çimentosu kullanılmıştır. Ek olarak silika dumanı, malzemenin kendi kendini destekleme davranışlarını iyileştirmek için açısız silis kumu, malzeme yoğunluğunu artırmak ve mikro gözenekleri doldurmak için silika tozu kullanılmıştır. Reolojik özellikleri optimize etmek için az miktarda kil ve yüksek verimli süper akışkanlaştırıcı karışımlara dahil edilmiştir. Farklı oranlarda PÇ, CSA ve CF içeren katkı harçları hazırlanmıştır. Bu harçlar basılı elemanların birleşim bölgelerine uygulanarak katmanlar arası çekme kuvveti incelenmiştir. 3DCP'de zayıf ara katman bağını ele almak, baskıdaki 60 dakika zaman aralığına kadar kesintilerin etkilerini neredeyse tamamen azaltmakta ve oldukça iyi bir performans gösterdiği bildirilmiştir.

Cengiz ve ark., (2017) su ekosistemlerinde dünya çapında aşırı alg patlamasına ve sonucunda da ötrofikasyonuna neden olan *Cladophora sp* alginden selüloz nanolifler elde etmişlerdir. Elde ettikleri selüloz nanolifi ve ticari selülozu, Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spektroskopisi, Termogravimetrik Analiz (TGA), Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), X-ışını difraktometrisi (XRD) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yöntemleri ile karakterize etmişlerdir. Daha sonra her iki lifli çimento hamurlarına farklı oranlarda ekleyerek betonun eğilme mukavemeti üzerindeki güçlendirme etkilerini incelemişlerdir. *Cladophora sp* alginden elde edilen selüloz nanolif ilavesi ile beton numunelerin eğilme gerilmesi 2,7 kat arttığını gözlemlemişlerdir. Öte yandan ticari selüloz katkısı betonun dayanımını düşürmüş ve beton eğilme gerilmesi üzerinde olumsuz etki yapmıştır. Ticari selülozun en-boy oranının düşük olması ve çimento hamurunun ticari selüloz lifleriyle düzgün bir şekilde bağlanamaması sebebiyle lifler betonun bütünlüğünü bozmuştur. Ayrıca, ticari selülozun suda çözünmezliği, beton numunelerin düşük eğilme geriliminden sorumludur. Suda çözünebilen ve çimento hamuru içinde homojen bir şekilde dağılabilen selüloz nanoliften farklı olarak, çözünmeyen ticari selüloz çimento hamuru içinde homojen bir şekilde dağılmamıştır. Yaptıkları bu çalışma ile doğada bol miktarda bulunan lifli alg *Cladophora sp*'nin betonu güçlendirebilecek bir malzeme olduğunu ortaya koymuşlardır.

Türk ve ark., (2022), su kütlelerini kirleten ve ekosistemi tehdit eden bir biyo-atık olan *Cladophora sp.*'den elde edilen selüloz nanolifler ve Welan sakızı (WG) olarak bilinen geleneksel bir viskozite değiştirici ajanın kendiliğinden yerleşen harçların plastik viskozitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında hazırlanan harç ve

çimento hamuru numuneleri üzerinde mini çökme, mini V hunisi, viskozite testleri, basınç-eğilme dayanımı testleri ve FE-SEM analizleri yapmışlardır. Sonuçlar, selüloz nanolifin, plastik viskozitede %93'e, akma gerilmesinde on kata varan artış sağladığını göstermiştir. WG katkılı numunelerde ise akma gerilmesinde yedi kata, plastik viskozitede ise %37'ye varan artışlar tespit edilmiştir. Ayrıca mekanik testler sonucunda WG katkılı numunelerde basınç dayanımında %15'e, eğilme dayanımında %7'ye varan artışlar gözlenmiştir. CCF katkılı numunelerde basınç dayanımında %4'e varan düşüşler gözlenirken, eğilme dayanımında %12'ye varan artış tespit etmişlerdir.



### 3.MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Çimento

Bu çalışmada, Konya Çimento tarafından üretilen, TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, kullanılan CEM I 42,5 R Portland çimentosunun kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimento kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşen	Miktar (%)
SiO <sub>2</sub>	20,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,74
CaO	61,87
MgO	1,09
SO <sub>3</sub>	3,38
K <sub>2</sub> O	0,79
Na <sub>2</sub> O	0,28
C <sub>3</sub> S	42
C <sub>2</sub> S	40
C <sub>4</sub> AF	11
C <sub>3</sub> A	7

##### 3.1.2. Uçucu kül

Kömüre dayalı termik santrallerin yan ürünü olan uçucu kül en yaygın olarak kullanılan çimento ikame malzemelerinden biridir. Uçucu kül, kristal, camsı ve az miktarda yanmamış karbondan oluşan, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> açısından zengin, oda sıcaklığında su ve Ca(OH)<sub>2</sub> ile karıştırıldığında reaktif olan bir tür puzolanik malzemedir. Fiziksel olarak, düşük özgül ağırlık (2,0–2,2 g/cm<sup>3</sup>), yüksek spesifik yüzey alanına sahiptir. Uçucu külün karışımların akma gerilmesi ve plastik viskozitesini artırdığı literatürdeki bazı çalışmalar tarafından kanıtlanmıştır (Park vd., 2005; Rahman vd., 2014).

Oldukça yüksek karbon ayak izine sahip olan çimento kullanımını azaltarak daha düşük CO<sub>2</sub> emisyonuna sahip daha sürdürülebilir karışımlar üretebilmek için puzolanik özellik gösteren endüstriyel atıkların kullanılması, aynı zamanda bu ürünlerin depolama maliyetlerini de düşürerek daha ekonomik, ekolojik bir yaklaşım sağlamaktadır (Mehta

ve Monteiro, 2014). Bu sebeplerle Kütahya Seyit Ömer termik santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül karışımlara dahil edilmiştir. Karışımlarda kullanılan uçucu külün kimyasal bileşenleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Uçucu kül kimyasal bileşenleri

Oksitler % ağırlıkça									
SiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	NiO	TiO <sub>2</sub>
50,80	5,00	1,67	0,53	2,75	13,60	17,40	6,70	0,35	0,68

### 3.1.3. Silis dumanı

Silis dumanı, elektrikli ark fırınlarında Ferrosiliko krom (FeSiCr) üretiminden açığa çıkan bir yan üründür.

Silis dumanı ilavesinin çimento hamurunun flokülasyon oranını, harcın akma gerilimini ve viskozitesini artırdığını ve çimento bazlı kompozit malzemelerin doldurma oranını, dolayısıyla 3D baskılı betonun 14 günlük basınç dayanımını etkili bir şekilde iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Long ve ark., 2021). Bölüm 3.1.2’de açıklanan sebepler silis dumanı için de geçerli olduğundan bu tez çalışması kapsamında üretilecek olan harçlara silis dumanı dahil edilmiştir.

Antalya ilinin Kepez ilçesinde bulunan ve ETİ Elektrometalurji A.Ş. bünyesinde üretim yapan tesisten temin edilen ve özgül ağırlığı 2,42 g/cm<sup>3</sup> olan silis dumanının kimyasal bileşimi Çizelge 3.3’te sunulmuştur.

**Çizelge 3.3.** Silis dumanı kimyasal bileşenleri

Oksitler % ağırlıkça									
SiO <sub>2</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	CO <sub>2</sub>
81,10	6,80	3,41	2,71	2,46	0,65	0,55	0,58	0,59	1,15

### 3.1.4. Karışım suyu

Çalışmadaki karışım suyu bileşeni içme suyu kalitesindedir ve TS EN 1008’e uygundur. Konya ili Selçuklu ilçesine ait şebeke suyu kullanılmıştır.

### 3.1.5. Agreg

Deneysel çalışmalarda, Konya ili Karapınar ilçesindeki kumullardan temin edilen ince agrega kullanılmıştır. İnce agreganın su emme kapasitesi ve özgül ağırlık tayini, piknometre yöntemine göre rastgele alınan numuneler üzerinde yapılmıştır. Kullanılan agreganın özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi sırasıyla 2.49 ve % 0.25 olarak bulunmuştur. Maksimum dane çapı 1.19 mm olarak seçilmiştir.

### 3.1.6. Süperakışkanlaştırıcı

Yüksek oranda su azaltma kapasitesine sahip, TS EN 934-2 standartına uygun olan Sika Viscocrete PC-15 süper akışkanlaştırıcı katkı karışımlara dahil edilmiştir.

### 3.1.7. Selüloz nanolif

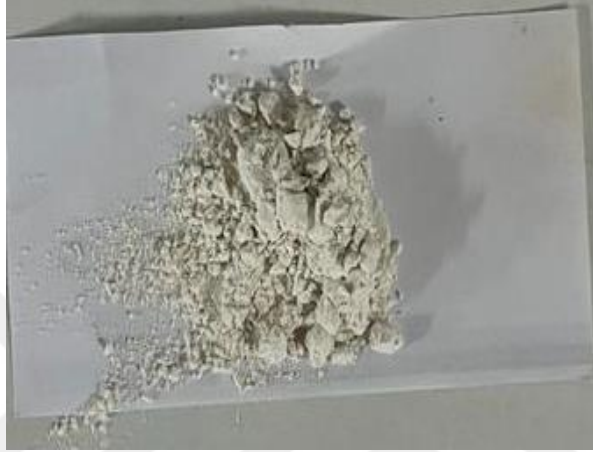
Bu çalışmada kullanılan *Cladophora* sp yeşil algleri Aksaray Ulurmak'dan toplanmıştır. Bölüm 3.2.1'de detayları anlatılan hidroklorik asit hidrolizi yöntemi ile elde edilmiştir ve Şekil 3.1'de görülen son halini almıştır. Kurutulan nanolifler karışımlara dahil edilmeden önce üzerine bir miktar karışım suyu eklenerek 1 saat boyunca ultrasonik homojenizatör ile karıştırılmış homojen hale getirilmiştir.



Şekil 3.1. Selüloz nanolif

### 3.1.8. Selüloz nanokristal

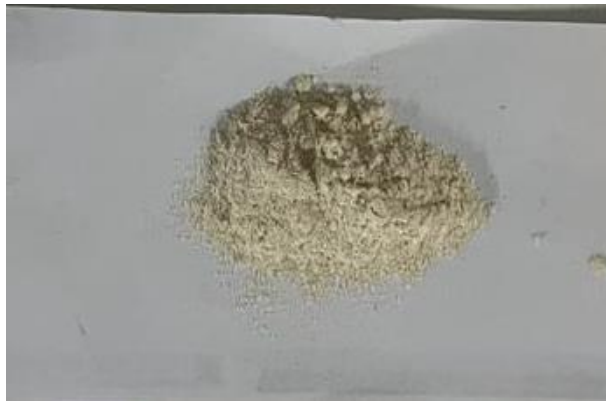
Yapılan çalışmalar Nanografi firmasından temin edilmiş olan bitkisel kaynaklı, beyaz renkte, 10-20 nm genişliğe, 300-900 nm uzunluğa sahip, yoğunluğu  $1.49 \text{ g/cm}^3$  kristalliği %92 oranında olan selüloz nanokristal kullanılmıştır. Selüloz nanokristalin görüntüsü Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Selüloz nanokristal

### 3.1.9. Welan sakızı

Bu çalışmada, ticari bir tür viskozite düzenleyici katkı olarak kabul edilen, *Alcaligenes* bakterilerinin fermantasyonu sonucu elde edilen, mikrobiyal bir polisakkarit türü olan Welan sakızı karışımlara dahil edilmiştir (León-Martínez vd., 2014). Şekil 3.3’te görüldüğü gibi ince toz halde (parçacık boyutu %95<75  $\mu\text{m}$ ), özgül ağırlığı  $1,45 \text{ gr/cm}^3$  olan bir maddedir.



Şekil 3.3. Welan sakızı

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. *Cladophora sp*'den selüloz nanolif üretimi

*Cladophora sp* numuneleri, toprak ve istenmeyen materyallerin uzaklaştırılması amacıyla 70 °C'lik saf su içerisinde 1 saat tutulmuştur. Sonrasında örnekler oda sıcaklığında 1M HCl çözeltisinde 1 saat karıştırılmış ve saf su ile süzölmüştür böylelikle minerallerden arındırılmıştır. Mineralleri uzaklaştırılan örnekler bir geri akış sisteminde 1M NaOH çözeltisinde 100 °C'de 8 saat boyunca karıştırılmış ve saf su ile pH derecesi nötrleninceye kadar süzölmüş ve proteinlerinden arındırılmıştır. Son olarak örnekler %5'lik etil alkol çözeltisinde 1 saat karıştırılarak yapıdaki pigmentlerin ve olası diğer partiküllerin uzaklaştırılması sağlanmıştır. İstenmeyen tüm yapılarından uzaklaştırılmış ve selüloz olarak saflaştırılmış örneklerden selüloz nanolifler elde etmek amacıyla örnekler sonikatör içerisinde 1 saat ses dalgasına maruz bırakılmıştır. Daha sonra örnekler tekrar saf su ile yıkanmış ve 50 °C'de 24 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan selüloz nanolifler çalışmada kullanılacak miktara göre tartılıp bir miktar karışım suyu ile ultrasonik homojenizatörde 1 saat boyunca karıştırılarak kullanıma hazır hale gelmiştir (Türk, 2021).

### 3.2.2. Karışımların hazırlanması

3DPC'nin taze karışımının aynı anda pompalanabilirlik, ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirliğe sahip olması gerektiğinden, karışım tasarımı geleneksel betondan daha karmaşık olmaktadır. 3DPC için uygun hammadde seçimi ve karışım oranlarının optimizasyonu konusunda bugüne kadar birçok farklı çalışma yapılmıştır ve bu çalışmalarda Portland çimentosu (Ghantous ve ark., 2022; Kazemian ve ark., 2017), sülföalüminat çimentosu (Khalil ve ark., 2017), kompozit çimentolar (Chen ve ark., 2020) ve jeopolimerler (Panda ve ark., 2017) dahil olmak üzere farklı bağlayıcı türleri kullanılmıştır. En yaygın olarak uygulanan ek çimentolu malzemeler ise uçucu kül, öğütölmüş yüksek fırın cürufu ve silis dumanıdır. Ek çimentolu malzemelerin, nano dolgu maddelerinin, inşa edilebilirliği artırmada etkili olduğu kanıtlanmıştır (Ma ve Wang, 2018). Bu sebeple bu tez çalışması kapsamında hazırlanan karışımlara uçucu kül ve silis dumanı dahil edilmiştir.

Daha iyi pompalanabilirlik için, karışım yüksek pompalama basınçları altında ayrışmaya karşı koyabilmelidir ayrıca ekstrüde edildikten sonra şekil stabilitesini sağlamalıdır bu nedenle çoğu 3DPC bileşimi, yüksek bir bağlayıcı içeriği ve nispeten küçük agrega boyutu ile karakterize edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında literatürde bildirilen yazdırılabilir karışımların oranları bir başlangıç noktası olarak kullanılmıştır. Bağlayıcı dozajı  $800 \text{ kg/m}^3$ , su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak seçildi, bağlayıcı olarak Portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı kullanıldı. Yapılan ön deneyler sonucunda bağlayıcı ağırlığınca %0,01-0,03-0,05-0,075-0,1 oranlarında selüloz nanolif, selüloz nanokristal ve welan sakızı katkısı kullanımına karar verilmiştir. Karışım oranları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Karışım oranları

Karışım	Çimento ( $\text{kg/m}^3$ )	Uçucu Kül ( $\text{kg/m}^3$ )	Silis Dumanı ( $\text{kg/m}^3$ )	Kum ( $\text{kg/m}^3$ )	Su ( $\text{kg/m}^3$ )	Akışkanlaştırıcı ( $\text{kg/m}^3$ )	VDK (%)
Referans	560	160	80	840	280	8	0
CNF 1	560	160	80	840	280	8	0,01
CNF 2	560	160	80	840	280	8	0,03
CNF 3	560	160	80	840	280	8	0,05
CNF 4	560	160	80	840	280	8	0,075
CNF 5	560	160	80	840	280	8	0,1
CNC 1	560	160	80	840	280	8	0,01
CNC 2	560	160	80	840	280	8	0,03
CNC 3	560	160	80	840	280	8	0,05
CNC 4	560	160	80	840	280	8	0,075
CNC 5	560	160	80	840	280	8	0,1
WG 1	560	160	80	840	280	8	0,01
WG2	560	160	80	840	280	8	0,03
WG 3	560	160	80	840	280	8	0,05
WG 4	560	160	80	840	280	8	0,075
WG 5	560	160	80	840	280	8	0,1

İlk olarak bağlayıcı sistemini oluşturan çimento, uçucu kül ve silis dumanı tartıldıktan sonra çimento mikseri ile 1 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım suyunun bir miktarı ayrılarak içerisine kullanılacak olan katkı (selüloz nanolif, selüloz nanokristal veya welan sakızı) eklenerek Şekil 3.4'te görüldüğü gibi ultrasonik homojenizatörde 1 saat boyunca karıştırılmıştır.





**Şekil 3.4.** Ultrasonik homojenizatörle katkının homojen hale getirilmesi

Karışım suyunun kalan kısmına ise süperakışkanlaştırıcı katkı eklenmiştir. Bağlayıcıların 1 dakika kuru olarak karıştırılmasından sonra üzerine karışım suyu eklenmiş ve 60 saniye boyunca karıştırılmıştır. Sonrasında 30 saniye boyunca karışıma yavaş yavaş kum eklenmiştir. Daha sonra mikser durdurulup bir spatula yardımıyla kabın tüm kenarları ve tabanı da dahil olmak üzere sıyrılarak 60 saniye karıştırılmıştır sonraki 60 saniye boyunca harç hızlı devirde tekrar karıştırılmıştır.

### 3.2.3. Taze harç üzerinde yapılan deneyler

3D baskı için kullanılacak karışımların taze haldeki pompalanabilirlik, ekstrüde edilebilirlik ve inşa edilebilirlik özelliklerini ölçmek için standart test yöntemleri henüz geliştirilmemiştir. Mevcut araştırmalar bunları belirleyebilmek için farklı test yöntemleri önermişlerdir.

#### 3.2.3.1 Viskozimetre ölçümleri

Çizelge 3.4'te verilen karışım oranlarına sahip çimento pastalarının viskozite ölçümleri Brookfield DV2T model viskozimetre cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.5). Hazırlanan çimento hamurları 30 saniye boyunca  $30 \text{ s}^{-1}$ 'de ön kesme işlemine tabi tutulmuştur. Bu ön kesme, reolojik analiz sırasında her karışımın aynı ilk kesme durumuna sahip olmasını sağlamak amacıyla uygulanmıştır. Ön kesme işleminden sonra karışımın dengelenmesi için 30 saniye beklendi. Daha sonra 90 saniye içerisinde kayma

hızı  $5 \text{ s}^{-1}$  ile  $65 \text{ s}^{-1}$  aralığında ( $5 \text{ s}^{-1}$  aralıklarla) önce artırılıp sonra azaltılmıştır. Her kayma hızına karşılık gelen akma gerilimi, ölçüm sırasında kaydedilmiştir. Akma gerilimi ve plastik viskozitenin belirlenmesi için Bingham modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Brookfield DV2T model viskozimetre cihazı

### 3.2.3.2. Yayılma tablası

Bu tez çalışmasında saha dostu bir test yöntemi olması ve literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılıp harcın yazdırılabilir sınırlar arasında kalıp kalmadığının kıyasının yapılabilmesi nedeniyle ASTM C1437-20 standardına uygun şekilde yayılma tablası testi gerçekleştirilmiştir.

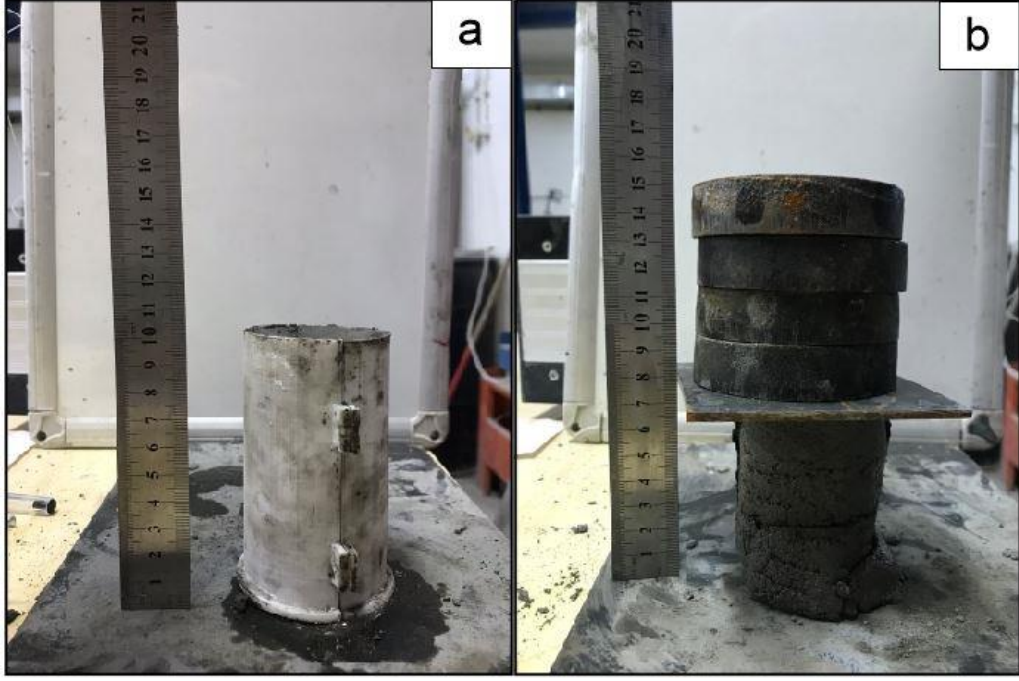
Harç karışımı Şekil 3.6'da görülen pirinçten yapılmış, taban çapı 100 mm, üst çapı 70mm ve yüksekliği 60mm olan koninin içine yerleştirildikten sonra koni yukarı doğru çekilmiştir sonrasında tabla, tablanın altındaki kol vasıtası ile 25 kez düşürülmüştür. Tablanın üzerine yayılan malzemenin birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülerek aritmetik ortalaması alınarak karışımların yayılma çapları belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Yayılma tablası

### 3.2.3.3. Taze hal dayanımı deneyi (green strength)

Çimentolu 3D baskı malzemelerinin inşa edilebilirliğinin, taze haldeki dayanımla önemli ölçüde ilişkili olduğu bilinmektedir (Zhang ve ark., 2018). Karıştırma işleminden sonra, Şekil 3.7’de görülen 50×100 mm’lik iki parçadan oluşan bir silindir kalıp taze betonla dolduruldu ve inşa edilen katmanın üzerine yeni bir katman inşa edilinceye kadar geçen süre göz önüne alınarak karışım kalıba konulduktan sonra 10 dakika dinlenmesine karar verildi (Du ve ark., 2023; Ma ve Wang, 2018). 10 dakika sonra kalıp parçaları ayrılarak çıkarıldı ve silindir açıkça deforme olana veya çökene kadar kademeli olarak üzerine ağırlık yüklendi. Daha sonra taşıyabileceği maksimum yük belirlendi. Malzeme davranışının sıkıştırma yüklemesi altında incelenmesi, malzemenin deformasyona direnç gösterme yeteneğinin tahmin edilmesini sağlamaktadır bu nedenle 3DCP’de inşa edilebilirliği belirlemek için malzemenin serbest tek eksenli yüklemesi önceki literatürde de kullanılmıştır (Ting ve ark., 2022; Wolfs ve ark., 2019)



Şekil 3.7. Taze hal dayanımı testi a) numunenin kalıba yerleştirilmesi b) numunenin üzerine yük yüklenmesi

### 3.2.4. Sertleşmiş harç üzerinde yapılan deneyler

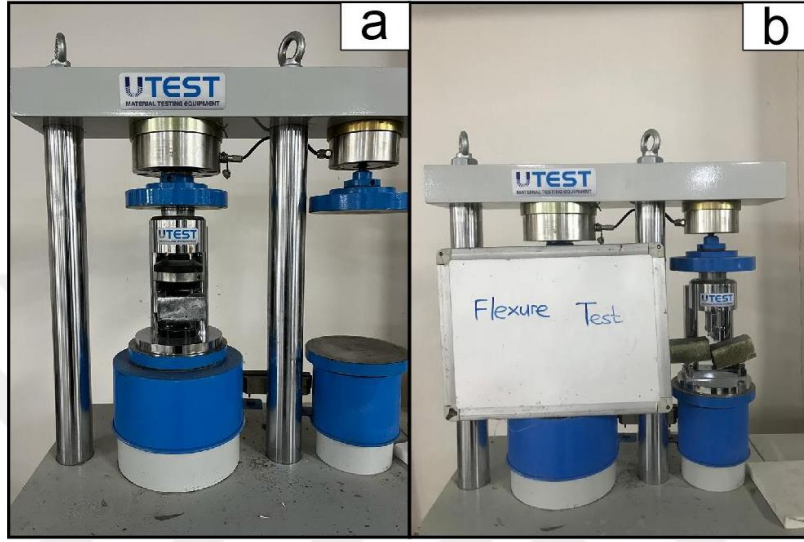
#### 3.2.4.1. Eğilme ve basınç deneyleri

Sertleşmiş harçların mekanik özelliklerini belirlemek için, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi harç karışımları 40x40x160 mm boyutlarında yağlanmış kalıplara alınmış 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir.



Şekil 3.8. Harçların kalıplara yerleştirilmesi

24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler kirece doygun su içerisinde oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. 28 gün sonunda kür suyundan çıkarılan numuneler kurulandıktan sonra TS EN 196-1'e göre önce eğilme (Şekil 3.9a) daha sonra basınç deneyine (Şekil 3.9b) tabi tutulmuştur.

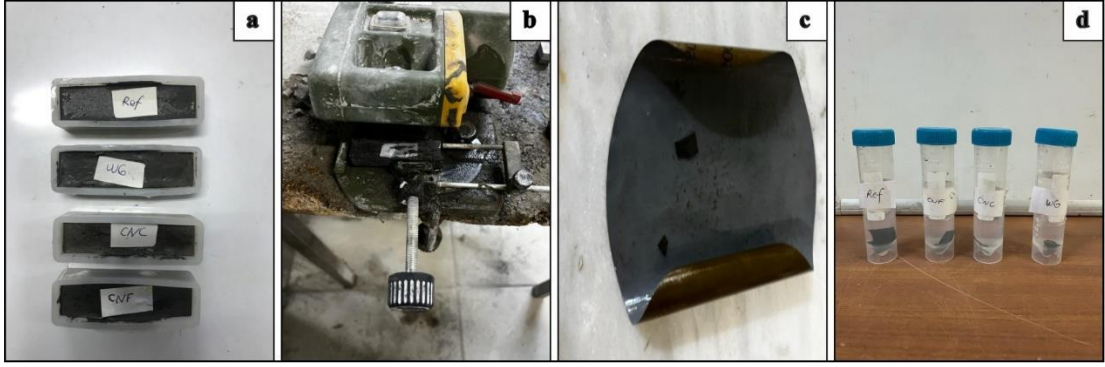


Şekil 3.9. Sertleşmiş harçlar üzerinde yapılan (a) basınç (b) eğilme deneyleri

### 3.2.4.2. Mikroyapı analizi

Bu tez çalışması kapsamında, öncelikle Şekil 3.10a'da görülen küçük silikon kalıplara dökülen numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiştir. 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılan numuneler kür odasına alınmış ve oda sıcaklığında kirece doygun su içerisinde kürlenmeye bırakılmıştır. 28 günün sonunda kalıptan çıkarılan numunelerden Şekil 3.10b'de görülen elmas diskli kesme cihazı ile küçük ve ince parçalar elde edilmiştir. Daha sonra kesilen numuneler Şekil 3.10c'de görülen 1200 kum zımpara ile inceltilmiştir ve yüzeyi pürüzsüz hale getirilmiştir. Numunelerin boşluklarında bulunan suyu çıkarmak ve hidrasyonu durdurmak amacıyla solvent değiştirme yöntemi uygulanmıştır ve numuneler Şekil 3.10d'de görüldüğü üzere izopropil alkol içerisinde 72 saat boyunca bekletilmiştir.





**Şekil 3.10.** Mikroyapı numunelerinin hazırlanması işlemleri a) mikroyapı numunelerinin kalıba dökülmesi b) kesme cihazı ile uygun boyutlarda parça kesme c) numune yüzeyini zımparalama d) numunelerin alkol içerisinde bekletilmesi

İzopropil alkolden çıkarılan numunelerden alkolün tamamen uzaklaştırılması için numuneler Şekil 3.11’de gösterilen vakum düzeneğinde 72 saat süre ile tutulmuştur.



**Şekil 3.11** Vakum düzeneği

Son olarak numuneler Şekil 3.12’de görüldüğü gibi ayrı ayrı plastik torbalara konulup vakumlanmıştır. Numunelerin FESEM görüntüleri GeminiSEM 500 cihazı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Vakumlanmış mikroyapı numuneleri

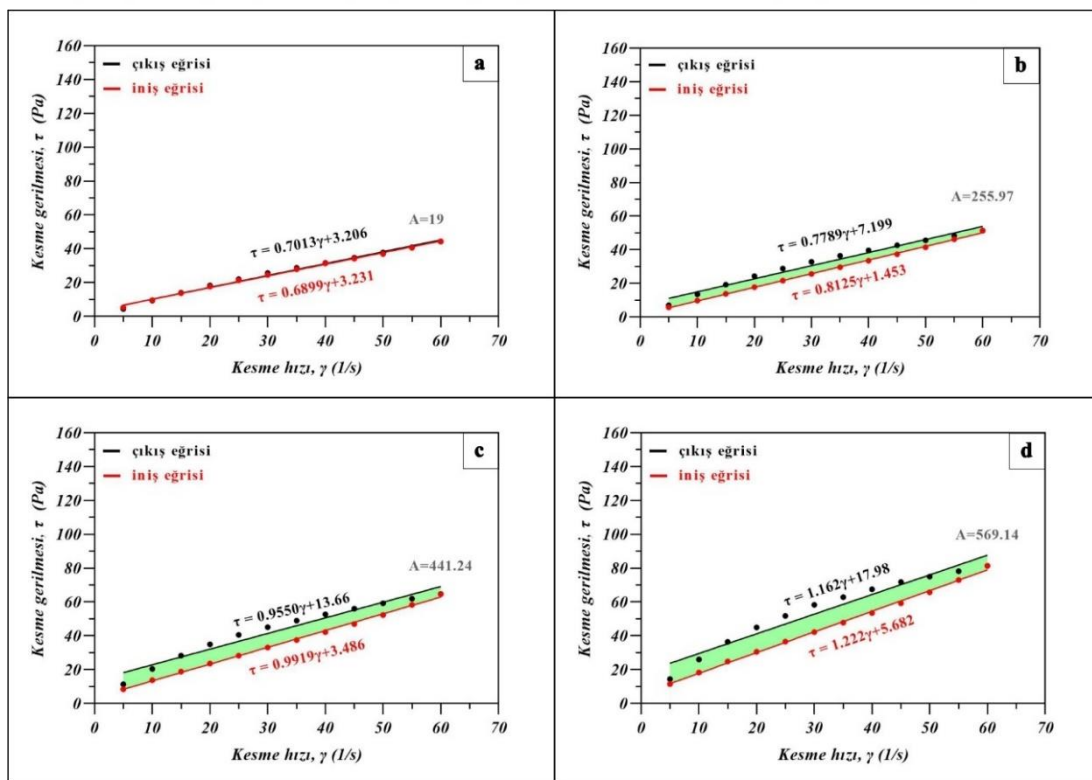


## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Viskozimetre Ölçümleri

Bu çalışma kapsamında yapılan viskozite ölçümlerinde kullanılan Brookfield DV2T model viskozimetre cihazı ile en fazla %0.05 katkı içeren karışımların ölçümü yapılabilmektedir, daha yüksek oranlarda katkı içeren çimento pastalarının viskozite ve akma gerilmeleri, pervane probu dönüşü için gerekli tork ekipmanının tork limitini aştığı için ölçüm alınamamıştır. Çimento pastalarına uygulanan ölçüm sonucunda Bingham modeli kullanılarak, karışımların plastik viskozitesi, akma gerilmesi ve tiksotropik alanı (5'ten 60 s<sup>-1</sup>'e kadar olan aralık için) hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler ve hesaplamalar sonucunda kullanılan tüm katkıların referans karışımına kıyasla plastik viskoziteyi, akma gerilmesini ve tiksotropik özelliği arttırdığı gözlemlenmiştir.

Welan sakızı katkılı çimento pastaları üzerinde yapılan viskozimetre ölçümleri sonucunda elde edilen histerezis döngüleri Şekil 4.1'de verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, katkı oranının artmasıyla plastik viskozitenin, akma gerilmesinin ve tiksotropinin arttığı belirlenmiştir.



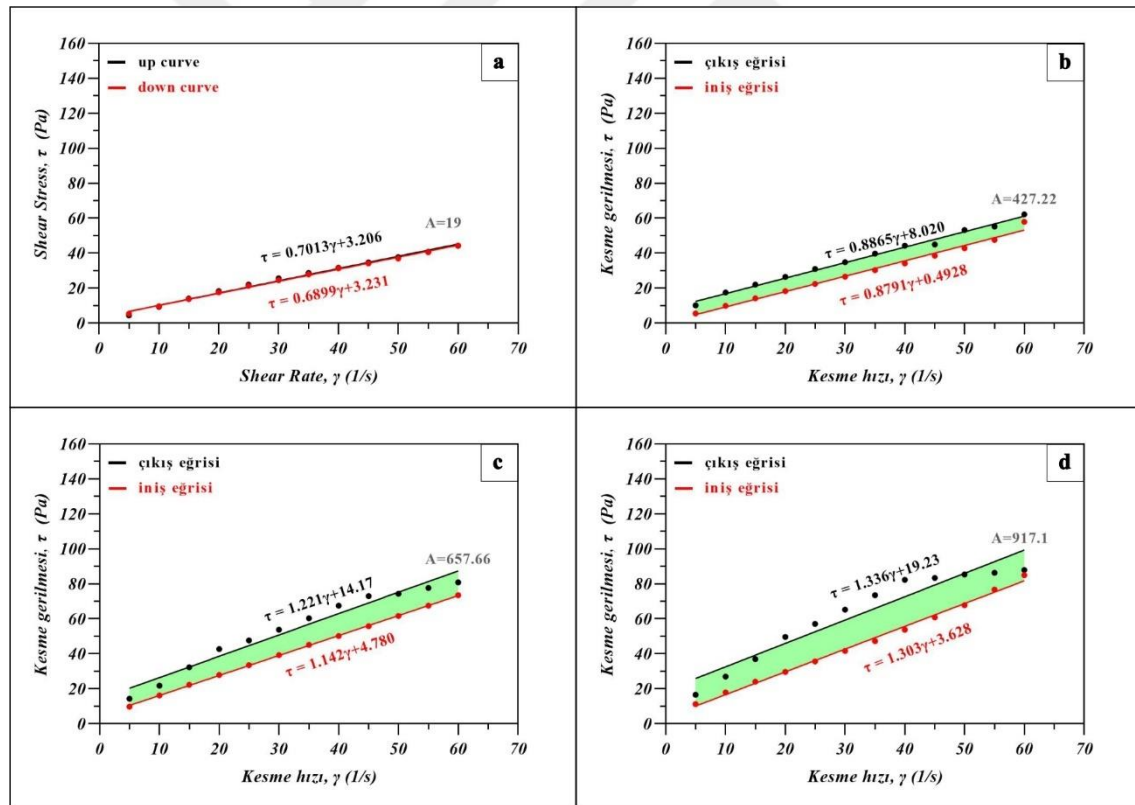
Şekil 4.1. Welan sakızı katkılı çimento hamurlarının histerezis döngüleri a) referans b) %0.01 WG c) %0.03 WG d) %0.05 WG



Tiksotropik özelliğin, viskozitenin ve akma gerilmesinin WG kullanılarak geliştirilmesi, aşağıdaki fiziksel etkiden kaynaklanmaktadır:

- (1) WG, karışım suyunun bir kısmını sabitleyebilir (Khayat, 1998)
- (2) WG'nin anyonik bir karakteri vardır ve çimento partikülleri üzerine adsorbe olabilir (Palacios & Flatt, 2016)
- (3) WG'deki uzun polimer zincirleri, WG'nin konsantrasyonu yüksek olduğunda düşük bir kesme hızında birbirleriyle karışabilir ve görece güçlü bir ağ oluşturabilir (Ghio, 1993) bu nedenle, uzun polimer zincirlerinin birbirine dolanmasıyla oluşan ağ, tiksotropinin yükselmesinin kaynağı olabilir (Khayat & Mikanovic, 2012; Teng vd., 2020).

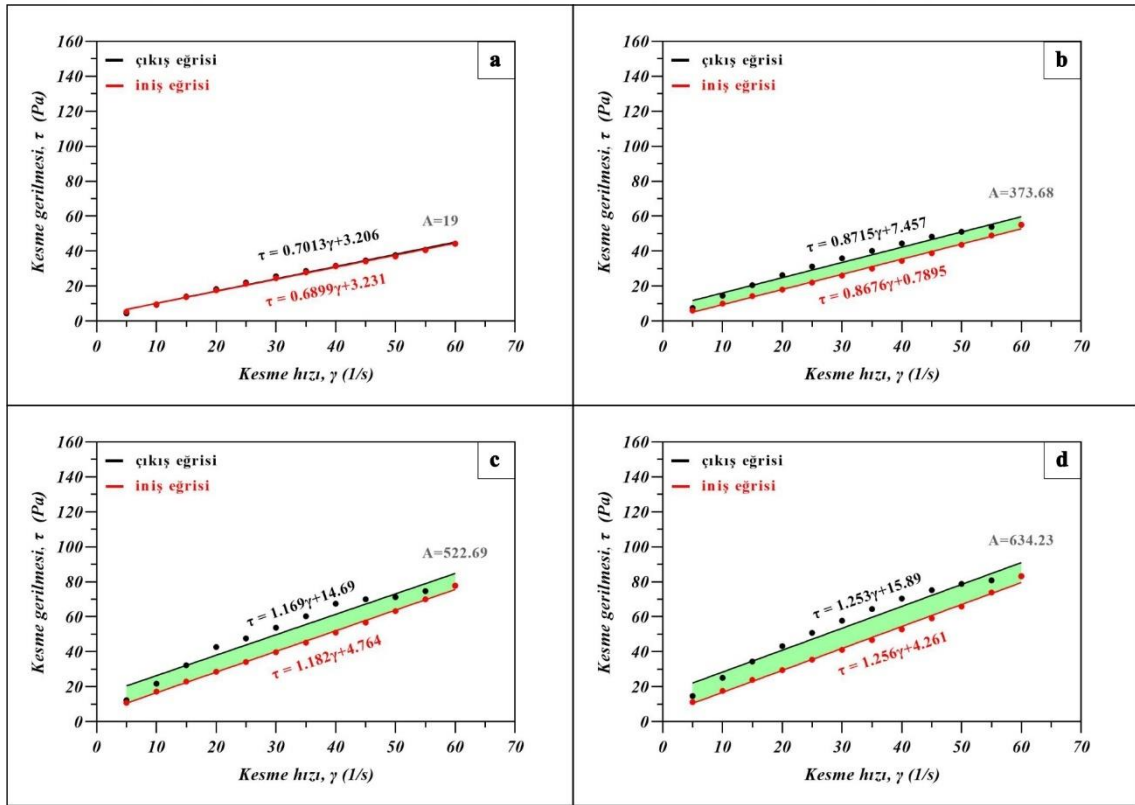
Selüloz nanolif katkılı çimento pastaları viskozimetre ölçümleri sonucunda elde edilen histerezis döngüleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Selüloz nanolif katkılı çimento hamurlarının histerezis döngüleri b) %0.01 CNF c) %0.03 CNF d) %0.05 CNF

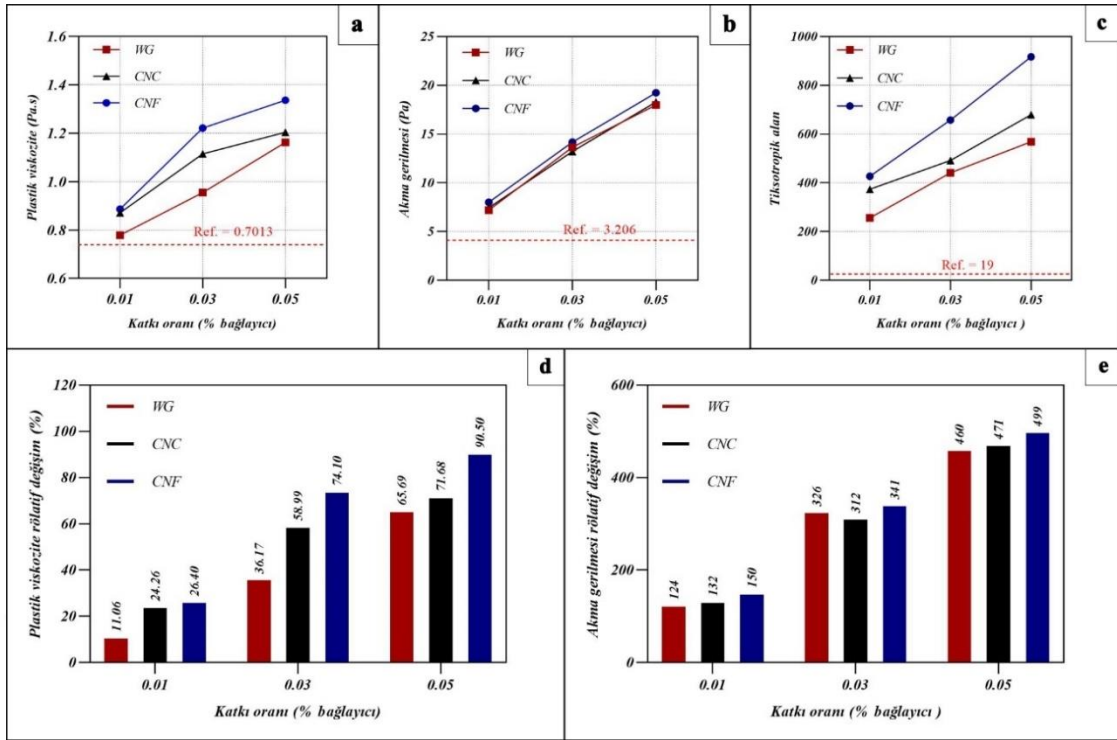
Son derece uzun lifler ve lifler arası güçlü etkileşimler nedeniyle, CNF topaklanmış mikro yapılar oluşturarak yüksek oranda dolaşma eğilimi göstermektedir.

CNF topraklarının oluşumu ve kesme kaynaklı oryantasyon, CNF süspansiyonlarının reolojik davranışlarını hem hareketsiz durumda hem de kesme koşulları altında yönetmektedir. Uzun ve dolaşık halde bulunan selülozik nanofibrillerin oluşturduğu ağ yapılarını kırmak veya hizalamak için daha büyük kuvvetler gerektiğinden, karışımın akma gerilmesi ve viskozitesi artar (Cao ve ark., 2016). Kesme uygulandıktan sonra, jel yapısı deforme olur ve uzun menzilli fiziksel dolaşıklıklar kırılarak daha az viskoz bir dağılım sağlar. Daha sonra, bir dinlenme periyodu sırasında yapı tekrar oluşur ve dolaşık durumuna geri döner. Tikotropideki artışın bu döngü olduğu bilinmektedir yani tikotropik özellik selülozik fibrillerin uzunluğu ve fibrillerin dolaşıklığı ile ilişkilendirilmektedir (Czaikoski ve ark., 2020).



Şekil 4.3. Selülozik nanokristal katkılı harçların histerezis döngüleri b) %0.01 CNC c) %0.03 CNC d) %0.05 CNC

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere artan CNC konsantrasyonları ile, reolojik ölçümler sırasında kırılması veya hizalanması gereken ve daha yüksek kesme gerilimi ile sonuçlanan aglomeratlar veya ağ yapıları oluşmaktadır bunun sonucu olarak CNC çimento kompozitlerinin akma gerilimini arttırmıştır (Cao ve ark., 2016).



Şekil 4.4. Çimento pastalarının a) plastik viskozite değerleri b) akma gerilmesi değerleri c) tiksotropi değerleri d) plastik viskozite değişim yüzdeleri e) referans numunesine kıyasla akma gerilmesindeki değişim yüzdeleri

Katkıların çimento pastaları üzerinde yarattıkları akma dayanımı ve plastik viskozite değişimleri Şekil 4.4'te özetlenmiştir. Bingham grafiklerinden elde edilen değerler ile oluşturulan şekiller incelendiğinde açıkça görülmektedir ki katkı türlerinden bağımsız olarak, katkı kullanımı hem plastik viskoziteyi hem de akma gerilmesini arttırmaktadır.

1) CNF, referans numunesine kıyasla plastik viskoziteyi %90.5, akma gerilmesini ise %499 oranında arttırmıştır.

2) CNC, referans numunesine kıyasla plastik viskoziteyi %71.68, akma gerilmesini ise %471 oranında arttırmıştır.

3) WG, referans numunesine kıyasla plastik viskoziteyi %65.69, akma gerilmesini ise %460 arttırmıştır.

Çimento hamurlarının katkı oranlarındaki artışa bağlı olarak akma gerilmelerinin artması katkı malzemelerinin hidrofilik yapılarından ve aşırı tutma kapasiteleri sayesinde karışım suyunu tutmalarından kaynaklanabilmektedir (Liang ve ark., 2022; Muhammad Salman ve ark., 2021).

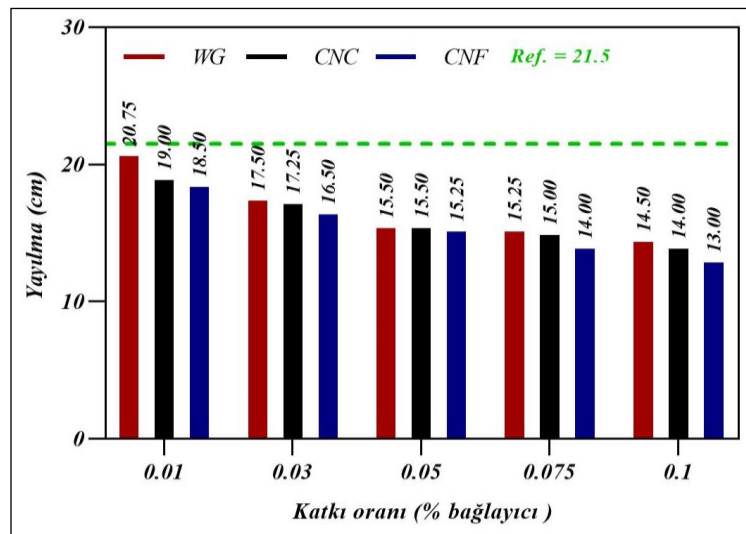
Katkılar arasında en etkili olanın CNF olduğu sonuçlardan açıkça görülmektedir. Bu durumun sebebi yukarıda açıklandığı gibi CNF'nin uzun fibrillerden oluşması ve bu sebeple dolaşık bir ağ yapısı oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

CNC'ler, CNF'ye kıyasla en-boy oranları nedeniyle süspansiyonda kesme yönü boyunca hizalanmaya daha yatkındırlar. CNC'ler diğer nanoselülozlara kıyasla reolojiyi tekrarlanabilir şekilde kontrol etmede veya emülsiyonları stabilize etmede daha iyiyken, jel ve kompozit uygulamalarda yetersizdirler (CNF'lere benzer sonuçlar elde etmek için daha fazla kullanmak gerekir). CNC'ler, diğer nanoselülozlardan çok daha yüksek konsantrasyonlarda kullanıldıklarında bir jel oluştururlar, çünkü bunlar birbirine dolanmak için gereken uzunluk ve esnekliğe sahip değildir (De France ve ark., 2017) ve kompozitleri güçlendirmek için süzülme eşiği, daha yüksek en-boy oranlı parçacıklardan önemli ölçüde daha yüksektir (Klemm vd., 2018; Moon vd., 2011). Bu sebeple CNC'ler plastik viskozite, akma gerilmesi ve tiksotropi üzerinde CNF'ler kadar yüksek oranda artışa sebep olamamıştır.

Dinlenme durumunda, selüloz nanomalzemeler kısa sürede ilk yapılarının çoğunu geri kazanır (yani, iyi tiksotropik performans gösterir), kararlı durum viskozitesinin ve viskoelastik özelliklerin hızlı bir şekilde geri kazanılmasına olanak tanır. Bu akış özellikleri, CNM'lerin geniş bir uygulama yelpazesinde etkili reolojik değiştiriciler olarak hizmet etmesine izin verir.

## 4.2. Yayılma Tablası

Yayılma tablası çapları ölçüm sonuçları Şekil 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.5. Harçların yayılma çapları

Kullanılan tüm katkılar referans numunesine kıyasla yayılma çapında değişikliğe sebep olmuştur. Viskozite ve akma gerilmesi ile yayılma çapı arasında doğrusal bir ilişki olduğu bilinmektedir (Bouziani ve Benmounah, 2013). Yayılma tablası deneyi sonuçları da bu ilişkiyi doğrulamaktadır. Katkılar maksimum oran olan %0.1 oranında kullanıldığında referans numunesine kıyasla yayılma çapını

- 1) WG, %32.5 oranında azaltmıştır.
- 2) CNC, %34.8 oranında azaltmıştır.
- 3) CNF, %39.5 oranında azaltmıştır.

Yayılma çapı üzerinde en etkili olan katkı CNF katkısıdır. Bunun sebebi bölüm 4.1’de açıklanan viskozite ve akma gerilmesi üzerindeki güçlendirici etkisi ile aynıdır.

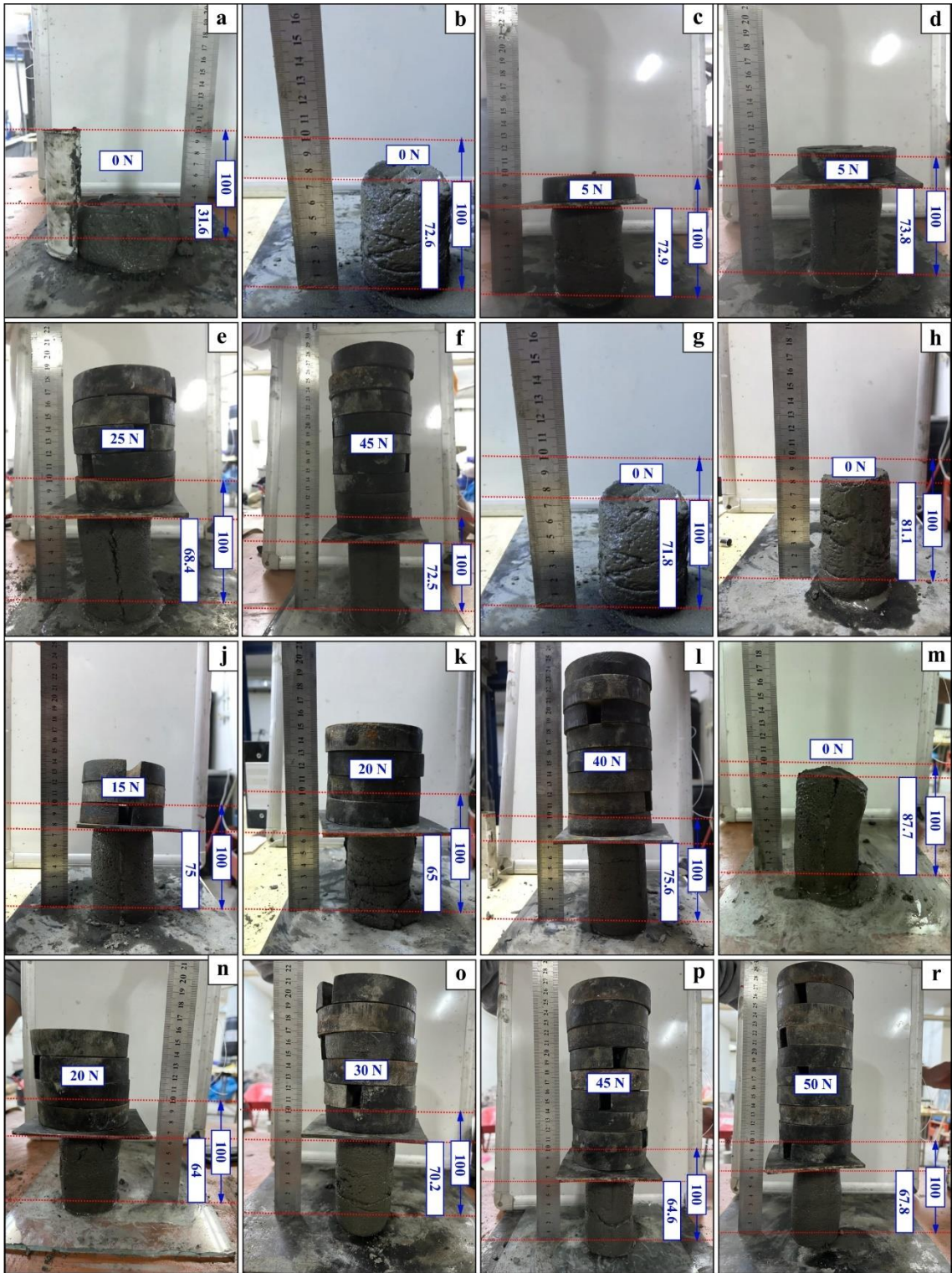
Katkı miktarları arttıkça yayılma çapı azalmıştır, bu sonuçlar viskozimetre ölçümleri sonuçları ile örtüşmektedir. Karışımların akma gerilmeleri ve plastik viskoziteleri arttıkça yayılma çapları küçülmektedir.

3D baskıda kullanılacak harçlar için geliştirilmiş bir standart henüz bulunmamaktadır. Ancak literatürdeki bazı çalışmalar yaptıkları yazdırılabilirlik testleri sonucunda basılabilir harçlar için bir yayılma çapı aralığı belirlemiştir. Bu aralığa yazdırılabilir bölge (printability region) denmektedir. Tay ve ark., (2019) yaptıkları çalışma sonucunda 15 ile 19 cm arasında yayılma çapına sahip olan karışımların pürüzsüz bir yüzey ve yüksek inşa edilebilirlik sağladığını belirlemişlerdir. Bu çalışma kapsamında hazırlanan harçların büyük bir kısmının yayılma çapı bu yazdırılabilir aralıkta kalmaktadır.

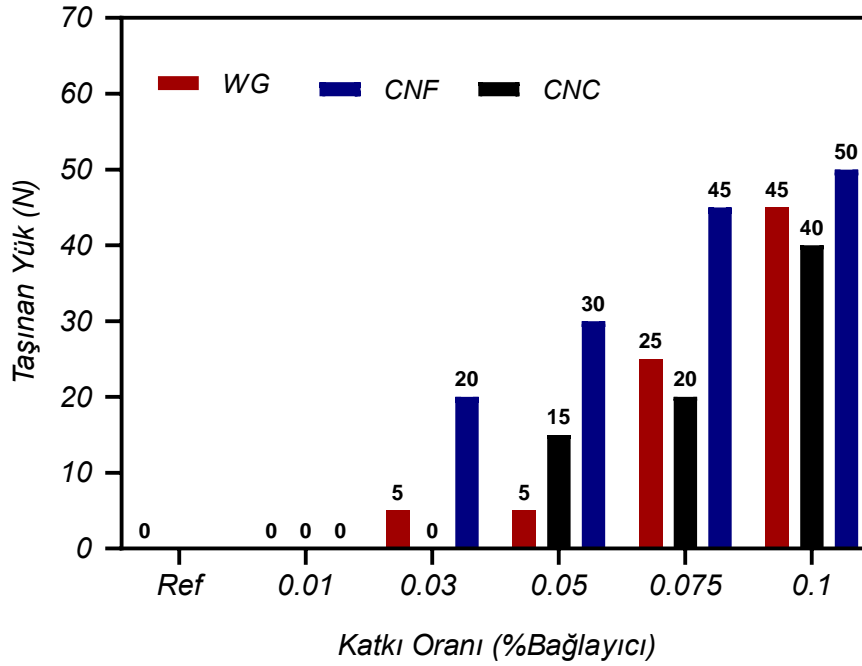
### **4.3. Taze Hal Dayanımı**

Baskı işlemi sırasında betonun taze hali nedeniyle, malzemenin sonraki katmanların yükünden kaynaklanan deformasyona karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Taze beton basınç dayanımı testi, taze durumdaki basınç gerilmelerinden kaynaklanan deformasyona karşı beton direncinin karakterizasyonu için kullanılır. Betonun basınçta deformasyona karşı direnci, ilk katmanın üstteki katmanların ağırlığını tutma yeteneğini, dolayısıyla betonun 3DCP’de inşa edilebilirliğini gösterir. Bu çalışma kapsamında yapılan taze hal dayanımı testi sonuçları Şekil 4.6 ve 4.7’de sunulmuştur.





Şekil 4.6. Şekil stabilitesi testi yükleme görüntüleri a)referans b) WG1 c) WG2 d) WG3 e) WG4 f) WG5 g)CNC1 h) CNC2 j) CNC3 k) CNC4 l) CNC5 m) CNF1 n) CNF2 o) CNF3 p) CNF4 r)CNF5



Şekil 4.7. Harçların taze halde taşıyabildikleri yük miktarı

Harcın ham mukavemeti, yapının yeniden inşası (tikotropi), akma gerilimi ve inşa edilebilirliği arasında yakın bir ilişki vardır (Zhang ve ark, 2018). Beklendiği gibi daha yüksek oranda katkı içeren numunelerin yani daha yüksek akma gerilimine ve tiksotropiye sahip numunelerin (Şekil 4.1-4.4), daha düşük akma gerilimine ve tiksotropiye sahip numunelerle karşılaştırıldığında, aynı deformasyon yüzdesine ulaşmadan önce daha yüksek bir yüke dayanabildiği görülmüştür. Statik akma gerilimi ne kadar hızlı artarsa, harcın hareketsiz haldeki yapısal oluşumu o kadar hızlı olur.

1) Katkı türünden bağımsız olarak tüm katkıların miktarı arttıkça taze hal mukavemeti artmıştır.

2) Referans karışımı ve %0.01 oranında katkı içeren numuneler üzerine yük yüklenmeden büyük oranda deforme olmuşlardır.

3) Taze hal mukavemeti üzerinde en etkili olan katkının CNF olduğu açıkça görülmektedir. Bunun sebebi CNF içeren harçların akma gerilmeleri ve tiksotropisinin diğer karışımlara kıyasla daha yüksek olmasıdır.

4) Yüksek viskozite düzenleyici katkı konsantrasyonlarının hidrofobik etkileşimlerinin, daha yüksek gerilmeyi tolere edebilen büyük boyutlu kümeler oluşturabilmesinin sonucu olarak katkı miktarı ile birlikte taze hal dayanımı artmıştır.

5) Literatürde, adsorbe edilmemiş viskozite düzenleyici katkının, parçacıklar arası mesafenin artmasına ve viskozitenin azalmasına yol açan itici kuvvetlerinin yağlama etkisini azaltmasına dolayısıyla taze hal dayanımını arttırmasının kaynağı olabileceği öne sürülmüştür (Bessaies-Bey ve ark, 2022).

Sonuçlar, önerilen malzeme parametrelerinin betonun deformasyon direncini ve inşa edilebilirliğini iyileştirmede etkili olduğunu göstermiş ve geçmiş literatürü doğrulamıştır.

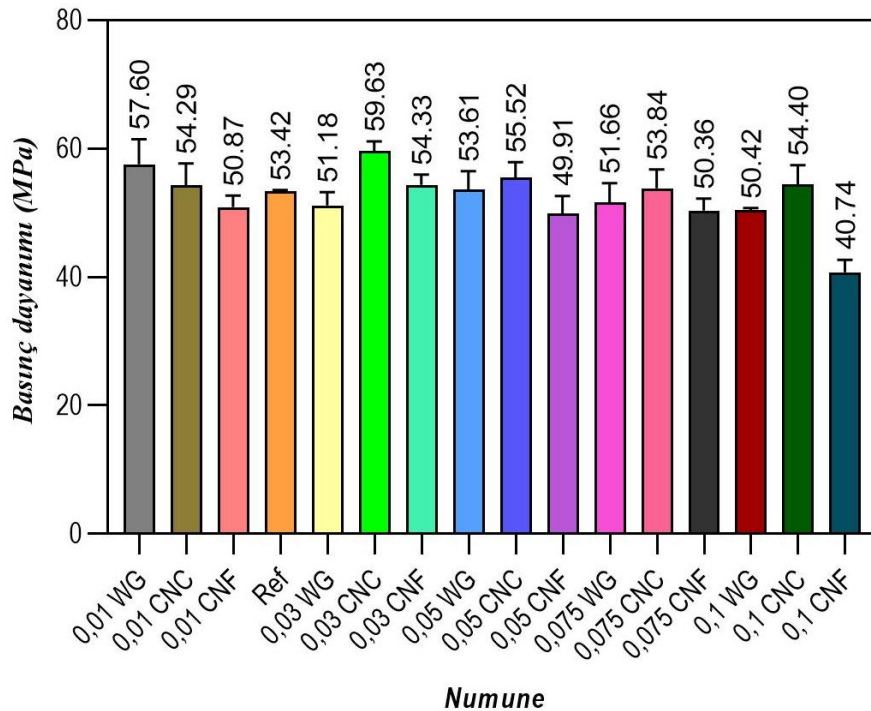
#### 4.4. Eğilme ve Basınç Deneyleri

Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.8’de sunulduğu gibidir. Bu sonuçlara göre,

1) WG, %0.01 oranında basınç dayanımını arttırmıştır ve %0.05 oranı aşılıncaya kadar basınç dayanımını korumuştur. Fakat %0,05 oranının aşılması durumunda basınç dayanımında düşüşe sebep olmuştur.

2) CNC, %0,03 oranında basınç dayanımını arttırmış diğer tüm oranlarda basınç dayanımını korumuştur.

3)CNF, %0.03 oranında basınç dayanımını arttırmıştır. Fakat kullanıldığı diğer oranlarda basınç dayanımında düşüşe sebep olmuştur.





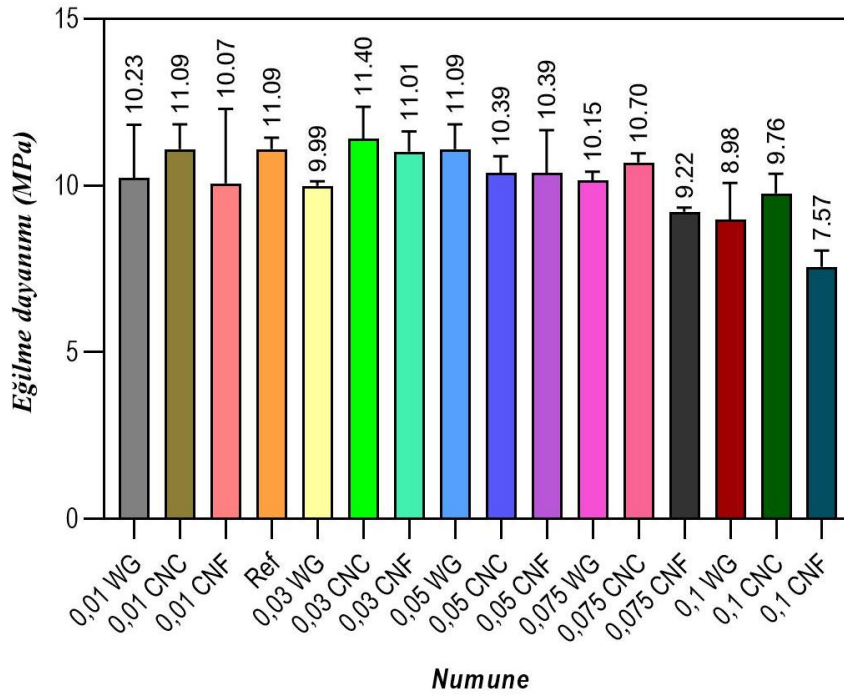
Şekil 4.8. Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

Harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.9’da sunulduğu gibidir. Bu sonuçlara göre,

1) WG, %0.01 oranında kullanıldığında eğilme dayanımını korumuş daha yüksek oranlarda kullanıldığında eğilme dayanımında düşüşe sebep olmuştur.

2) CNC, %0.05 oranını aşınca kadar tüm oranlarda eğilme dayanımını referans numunesine göre arttırmıştır ancak %0,05 oranının aşılması durumunda eğilme dayanımını yalnızca koruyabilmiştir.

3) CNF, %0.075 oranına kadar kullanıldığı oranlarda eğilme dayanımını korumuştur. Fakat %0,075 oranının aşılması durumunda eğilme dayanımında düşüşe sebep olmuştur.



Şekil 4.9. Harçların 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları

WG miktarının %0.03 oranının üzerine çıkmasıyla düşen eğilme ve basınç dayanımının sebeplerini literatürdeki bazı kaynaklar, WG moleküllerinin adsorpsiyonunun etrenjit çekirdeklenme hızını yavaşlatması, hidrasyonu geciktirmesi, gözenekliliğin artması ve etrenjit kristallerinin morfolojik değişimine yol açması ile açıklamaktadır (Ma ve ark., 2012; Y. Zhang ve ark., 2018).

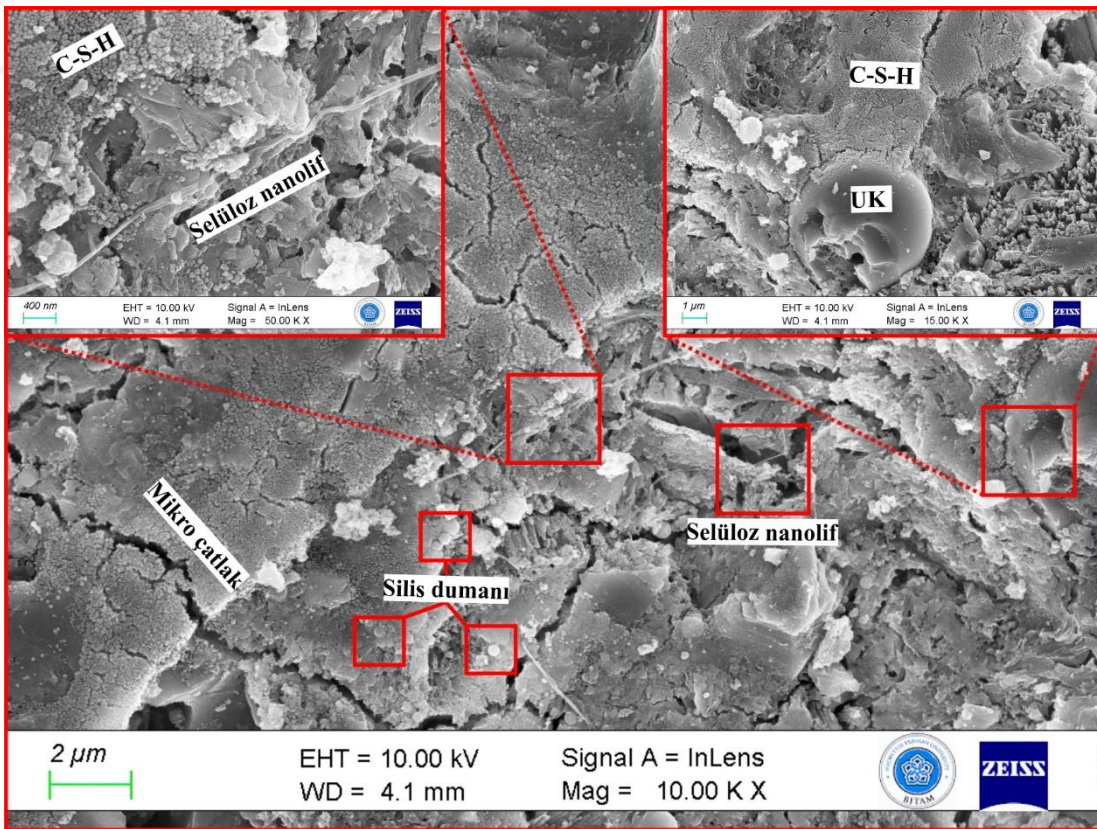
CNC'lerin katı, kristalimsi ve sert doğası, sağladığı mekanik dayanım, selüloz zincirleri arasındaki yüksek derecede düzenli ve moleküller arası hidrojen bağından kaynaklanmaktadır (Klemm vd., 2018). CNC'ler Ara Yüzey Geçiş Bölgesi (ITZ) alanındaki çatlakların boyutunu ve morfolojisini değiştirirler. CNC içeren numunelerin CNF içeren numuneye göre önemli ölçüde daha az mikro gözenekler ve mikro çatlaklar gösterdiği çalışmalarda belirtilmiştir (Barnat-Hunek ve ark., 2019). CNC katkısının sebep olduğu mukavemet artışı, çimento hamurlarının hidrasyon derecesindeki (DOH) artışla ilişkilendirilebilmektedir. CNC'ler tarafından DOH'daki artışı açıklamak için iki mekanizma kullanılır: sterik stabilizasyon ve kısa devre difüzyonu (SCD). Sterik stabilizasyon, bazı su azaltıcı ajanların (WRA'lar) taze çimento süspansiyonlarında işlenebilirliği artırmak için kullandıkları mekanizmadır. SCD, CNC'lerin çimento parçacıkları yüzeyine adsorbe ettiği ve suyu kılcal gözeneklerden hidrate olmayan çimentoya taşıdığı bir mekanizmadır. Bu sayede hidrate olmuş çimento partikülü sayısı artar ve bu daha yüksek mukavemetle sonuçlanır. %0.05 oranından daha yüksek CNC konsantrasyonlarında ise CNC aglomerasyonundan kaynaklandığına inanılan bir mukavemet düşüşü gözlenir (Barnat-Hunek ve ark., 2019).

CNF katkısının %0.01 oranının aşılmasıyla basınç mukavemetinde düşüş görülmüştür. En yüksek oran olan çimento ağırlığında %0.1 oranında kullanılması sonucunda ise referans numunesine kıyasla basınç dayanımında %23,7'lik bir düşüş vardır. Çimento pastalarının mekanik dayanımları yüksek CNF konsantrasyonlarında azalır, bu düşüşün sebebi selüloz lif dozajının artmasıyla hava sürüklenmesinin artmasıyla ve zayıf bağlanma arayüzleri oluşturan lif kümelerinin oluşumu ile açıklanmıştır (Hisseine ve ark., 2018). Lif konsantrasyonu arttıkça matris içerisinde homojen dağılmayan lifler, gözenekli bir yapıya sahip alanların oluşmasıyla birlikte zayıf bölgelerin oluşumuna sebep olmaktadır ve böylelikle kırılmayı kolaylaştıran erken çatlaklar meydana gelmektedir (Alzoubi ve Albiss, 2020; Mohammadkazemi ve ark., 2015). CNF katkısının eğilme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise %0,05 katkı oranına kadar referans numunesine göre bir artış gözlemlenirken, bu orandan sonra dayanım kayıplarının olduğu belirlenmiştir. En yüksek dayanım artışı (%7) %0,03 oranında CNF katkısı kullanılması durumunda elde edilmiştir. CNF katkısının eğilme dayanımının arttırmasının nedenleri literatürde nanoselüloz liflerinin yüksek elastisite modülüne sahip olmasına (Abe ve Yano, 2011; Sun ve ark., 2016), yüksek en boy oranı sayesinde mikro dalgaları yönlendirip engellemesine ve “köprü etkisi” ile çatlak

ilerlemesini de önlemesine bağlanmaktadır (Cengiz ve ark., 2017; Scrivener ve Nemati, 1996).

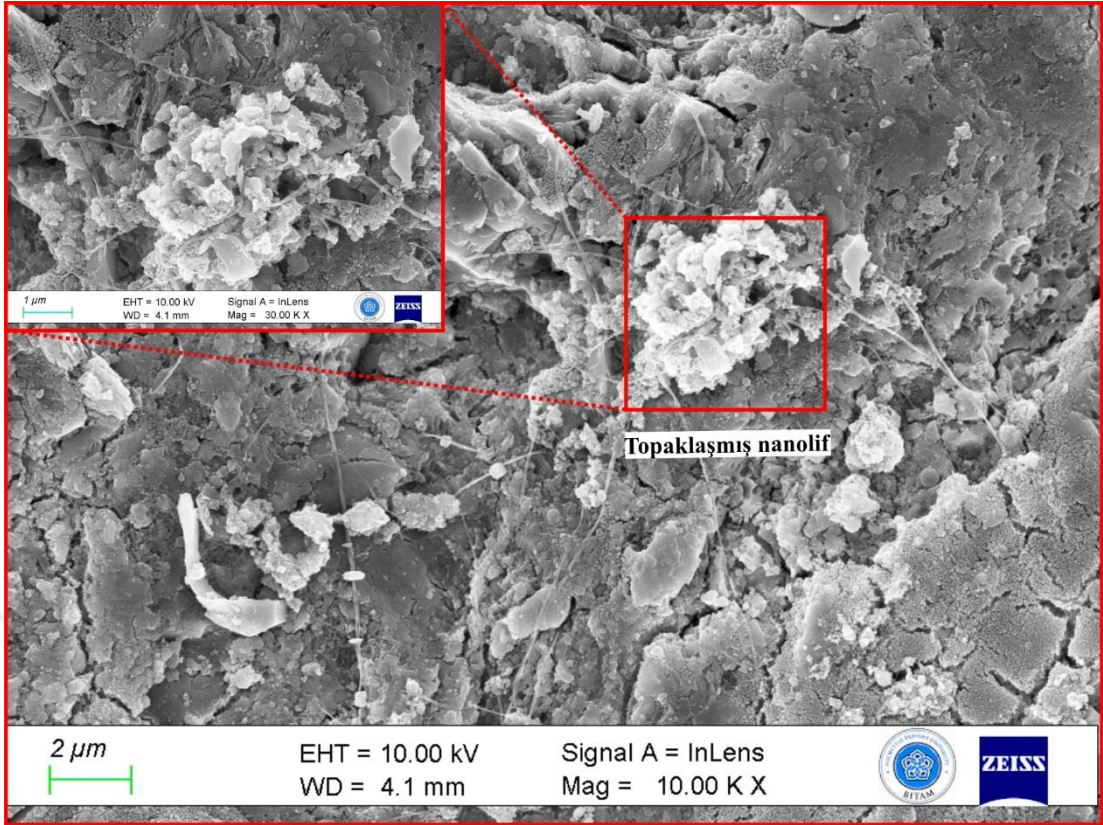
#### 4.5. Mikroyapı Analizi Sonuçları

Tez kapsamında CNF ve CNC katkılarının çimento pastası mikroyapısının üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla FE-SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 CNF katkılı numunenin görüntüsünü, Şekil 4.13 ise CNC katkılı numunenin görüntüsünü içermektedir.

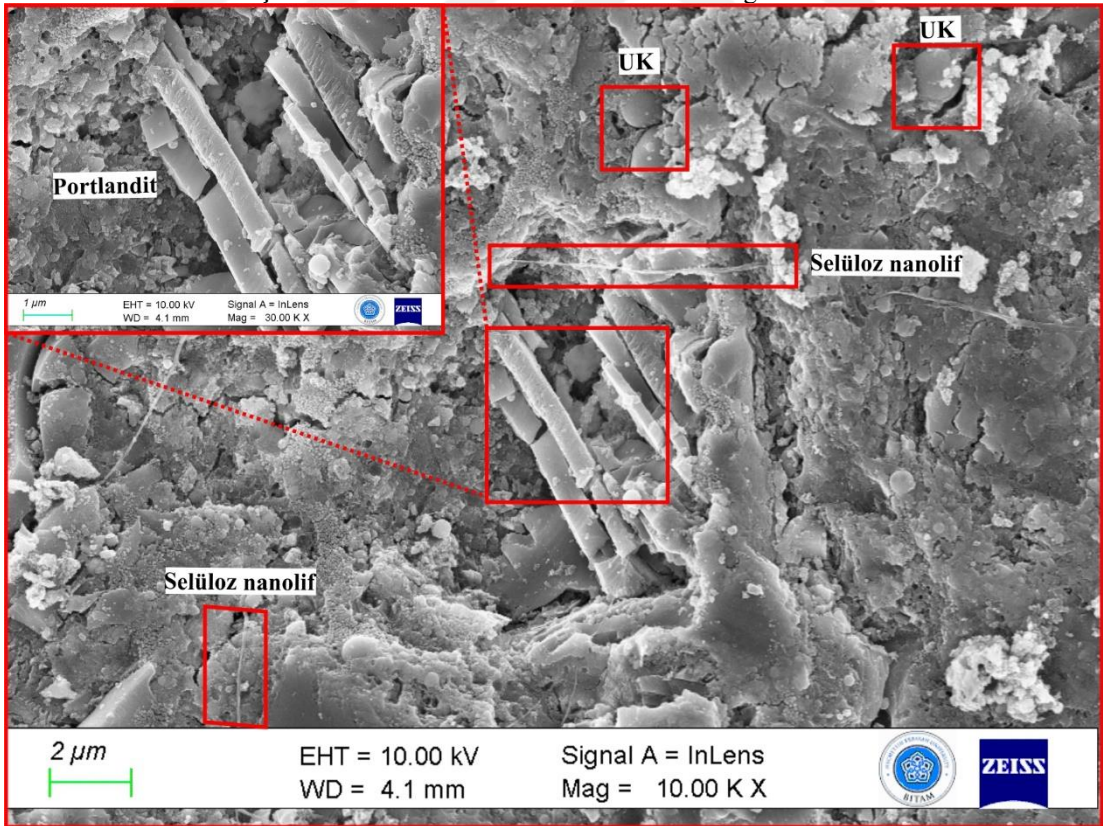


Şekil 4.10. CNF katkılı numunenin FE-SEM görüntüsü

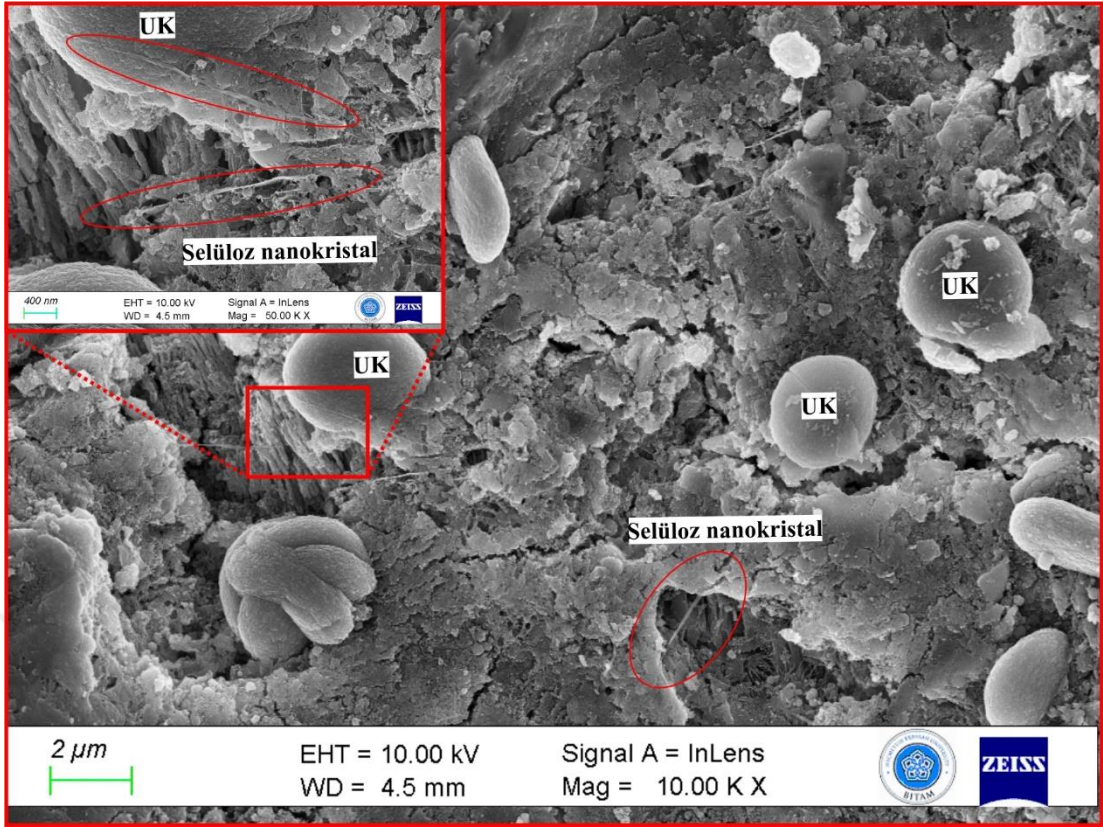




Şekil 4.11. CNF katkılı numunenin FE-SEM görüntüsü



Şekil 4.12. CNF katkılı numunenin FE-SEM görüntüsü



**Şekil 4.13.** CNC katkılı numunenin FE-SEM görüntüsü

Analizler için uygun boyutlarda numune hazırlama ve kurutma süreçleri esnasında oluşan mikro çatlaklar dışında genel olarak tüm numunelerin yoğun bir matrise sahip olduğu görülmektedir. Karışımlarda kullanılan uçucu kül ve silis dumanının reaksiyona girmeyen parçacıkları matris içerisinde uygun bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Görüntüleme işlemleri numunelerin 28. yaş gününde hidrasyon alkol muamelesi ile durdurularak gerçekleştirilmiştir. Buna bağlı olarak mineral katkı malzemelerinin henüz reaksiyonlarını tamamlamadığı, parçacıkların bir kısmının çözünürken diğer kısımların henüz reaksiyon göstermediği de görülmektedir. Bu durum puzolanik reaksiyonların uzun bir zaman diliminde tamamlandığı gerçeği ile örtüşmektedir.

CNF katkılı numunelerin görüntülerinde matris içerisinde neredeyse tamamen dağılmış, uzun selüloz nanolifler görülmektedir. Uzun ve dağılmış liflerin akış yönünde hizalanmasının zorluğu nedeniyle viskozite artışlarından sorumlu olduğu düşünülmektedir. Selüloz liflerin matris içerisinde düzgün dağılımını sağlamak için liflerin karışım suyu ile ultrasonik homojenizatör marifetiyle karıştırılmasının oldukça faydalı olduğu anlaşılmaktadır. Ancak yine de Şekil 4.11'den anlaşılacağı üzere bazı bölgelerde liflerin topaklaştığı ve birbirine dolaştığı görülmektedir. Topaklaşan bölgede yoğun bir şekilde hidrasyon ürünlerinin oluştuğu görülmektedir. Liflerin yüksek su



tutma kapasitesinin bu etkinin oluşmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Topaklaşan lifler üzerinde yoğun ürün oluşumu gözlenirse de mekanik dayanım kaybının nedenini bu durumun oluşturduğu düşünülmektedir. Tek noktada toplanmış, zayıf bir yapı üzerinde oluşan ürünlerin dayanım açısından yüksek fayda sağlamayacağı düşünülmektedir. Ayrıca numunelerde Portlandit gibi hidrasyon ürünlerinin de varlığı Şekil 4.12'den anlaşılmaktadır.

CNC katkılı numunenin de muhtelif bölgelerinde benzer hidrasyon ürünlerinin oluşumu gözlenmiştir. Şekil 4.13'te verilen görüntü incelendiğinde, henüz reaksiyonunu tamamlamamış uçucu kül parçacıkları ve selüloz nanokristallerin varlığı göze çarpmaktadır. CNF'e kıyasla CNC'lerin daha kısa olduğu ve matris içerisinde daha düzgün dağıldığı anlaşılmaktadır. Benzer şekilde karışımlarda kullanılmadan önce CNC'ler de ultrasonik homojenizatör marifeti ile karışım suyunda dağıtılmıştır. Bu durumun avantajı burada daha net ortaya çıkmaktadır. Ayrıca CNC'nin CNF'e göre daha kısa ve daha az su emme kapasitesine sahip olması viskozite ve dayanım sonuçlarını doğrulamaktadır. Daha kısa partiküllerin akış yönünde hizalanması daha kolay olmuştur.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Harçların yayılma çapında azalmaya neden olan CNF, CNC ve WG, karışımların viskozite ve akma gerilmelerini arttırmaktadır. Yayılma çapı ile ortaya çıkan bu sonuç yapılan viskozite ölçümleri ve elde edilen viskozite ve akma gerilmeleri sonuçlarıyla da kanıtlanmıştır.

Yapılan viskozimetre ölçümleri sonucunda CNF, CNC ve WG'nin, 3D baskıda kullanılacak harçlar için oldukça kritik öneme sahip olan tiksotropik özelliği arttırdığı belirlenmiştir. Katkı miktarı arttıkça tiksotropik özelliğin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum katkı oranında (%0.1), referans numunesine kıyasla tiksotropik özelliği yaklaşık olarak, CNF 48 kat, CNC 33 ve WG 30 kat arttırmıştır.

Taze hal dayanımı açısından katkılar üst düzey performans göstermişlerdir. Referans numunesini üzerine henüz yük yüklenmeden ciddi bir deformasyona uğrarken maksimum oranda (%0.1) katkı içeren numunelerden, CNF 50 N, CNC 40 N, WG 45 N yük taşıyabilmiştir. Katkı içeren harçlar tüm oranlarda, referans numunesine göre daha iyi taze hal dayanımı sergilemiştir. Literatürde belirtilen akma gerilmesi ve taze hal dayanımı ilişkisi bu tez çalışması tarafından da doğrulanmıştır.

Basınç dayanımı açısından en iyi performansı CNC katkısı göstererek kullanıldığı tüm harçlarda basınç dayanımını arttırmıştır. CNF ve WG katkısı ise basınç dayanımı açısından en optimum sonuçları %0.01 oranında kullandıklarında vermiştir.

Eğilme dayanımı açısından CNC ve CNF katkıları %0.03 oranında kullanıldığında en yüksek sonucu sağlamıştır. WG ise yalnızca %0.01 oranında eğilme dayanımında artış sağlamıştır.

İdeal bir 3D baskı harcı: i) baskı ağzından düzgün bir şekilde ekstrüde edilmesini sağlayan kayma incelmesi kabiliyetine sahip olmalıdır; ii) basılı 3D yapıların şekil stabilitesini korumak için yeterli viskoziteye ve yüksek akma gerilimine sahip olmalıdır, ve iii) baskıdan sonra viskoelastik özelliklerde hızlı bir iyileşme sağlayan üstün tiksotropik özellik göstermelidir. Kullanılan CNF, CNC ve WG katkıları yukarıdaki gereklilikleri karşılamakta ve harçların özelliklerini iyileştirmektedir.

## 5.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında 800 kg/m<sup>3</sup> dozajında bağlayıcı kullanılmıştır. Bu oran değiştirilerek farklı bağlayıcı dozajlarındaki karışımların performansları üzerinde çalışılabilir.

Bu tez çalışmasında daha çok reoloji ve dayanım üzerinde testler yapılmıştır. Karışımların durabilite performanslarını incelemek amacıyla deneysel çalışmalar yürütülebilir.

Bağlayıcı olarak Portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Farklı bağlayıcı türleri kullanılarak reoloji ve dayanım üzerine çalışmalar yapılabilir.





## KAYNAKLAR

- Abe, K., ve Yano, H., 2011, Formation of hydrogels from cellulose nanofibers. *Carbohydrate Polymers*, 85(4), 733-737.
- Al Jassmi, H., Al Najjar, F., ve Mourad, A.-H. I., 2018, Large-scale 3D printing: the way forward. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 324(1), 012088.
- Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., ve Mourad, Y., 2015, Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 109, 118-130.
- Alzoubi, H. H., ve Albiss, B. A., 2020, Performance of cementitious composites with nano PCMs and cellulose nano fibers. *Construction and Building Materials*, 236, 117483.
- Andrew Ting, G. H., Noel Quah, T. K., Lim, J. H., Daniel Tay, Y. W., ve Tan, M. J., 2022, Extrudable region parametrical study of 3D printable concrete using recycled glass concrete. *Journal of Building Engineering*, 50, 104091.
- Assaad, J., Khayat, K. H., ve Mesbah, H., 2003, Assessment of thixotropy of flowable and self-consolidating concrete. *Materials Journal*, 100(2), 99-107.
- ASTM, C. (2007). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. *CI437*.
- Austin, W. M., & Khoshnevis, B., 1989, Automatic model generation for production-distribution systems using natural language. <http://dx.doi.org/10.1177/003754978905200506>, 52(5), 207-211.
- Baradan, S., 2006, Türkiye İnşaat Sektöründe İş Güvenliğinin Yeri Ve Gelişmiş Ülkelerle Kıyaslanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 87-100.
- Barnat-Hunek, D., Szymańska-Chargot, M., Jarosz-Hadam, M., ve Łagód, G., 2019, Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 1-11.
- Bauguess, B., 2022, The Genesis Collection at Wolf Ranch, [online], Icon, <https://www.archdaily.com/909534/worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china>, [15.04.2023]
- Bessaies-Bey, H., Khayat, K. H., Palacios, M., Schmidt, W., ve Roussel, N., 2022, Viscosity modifying agents: Key components of advanced cement-based materials with adapted rheology. *Cement and Concrete Research*, 152, 106646.
- Bouziani, T., ve Benmounah, A., 2013, Correlation between v-funnel and mini-slump test results with viscosity. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17, 173-178.

- Brinchi, L., Cotana, F., Fortunati, E., ve Kenny, J. M., 2013, Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: Technology and applications. *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 154-169.
- Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G. F., ve Thorpe, A., 2007, Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in construction*, 16(2), 224-231.
- Cao, Y., Zavattieri, P., Youngblood, J., Moon, R., ve Weiss, J., 2016, The relationship between cellulose nanocrystal dispersion and strength. *Construction and Building Materials*, 119, 71-79.
- Cengiz, A., Kaya, M., ve Pekel Bayramgil, N., 2017, Flexural stress enhancement of concrete by incorporation of algal cellulose nanofibers. *Construction and Building Materials*, 149, 289-295.
- Chen, M., Liu, B., Li, L., Cao, L., Huang, Y., Wang, S., Zhao, P., Lu, L., ve Cheng, X., 2020, Rheological parameters, thixotropy and creep of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites modified by bentonite. *Composites Part B: Engineering*, 186, 107821.
- Czaikoski, A., da Cunha, R. L., ve Menegalli, F. C., 2020, Rheological behavior of cellulose nanofibers from cassava peel obtained by combination of chemical and physical processes. *Carbohydrate polymers*, 248, 116744.
- De France, K. J., Hoare, T., ve Cranston, E. D., 2017, Review of Hydrogels and Aerogels Containing Nanocellulose. *Chemistry of Materials*, 29(11), 4609-4631.
- Du, J., Guo, P., Liu, Z., ve Meng, W., 2023, Highly thixotropic ultra-high-performance concrete (UHPC) as an overlay. *Construction and Building Materials*, 366, 130130.
- Du Plessis, C., 2002, Agenda 21 for sustainable construction in developing countries. *CSIR Report BOU E*, 204, 2-5.
- Duman, E., ve Etiler, N., 2013, İnşaat Sektörü ve İşçi Sağlığı. *Turkish Journal of Occupational Health and Safety*, 13(48), 30-38.
- El Cheikh, K., Rémond, S., Khalil, N., ve Aouad, G., 2017, Numerical and experimental studies of aggregate blocking in mortar extrusion. *Construction and Building Materials*, 145, 452-463.
- ERCAN, A., 2010, Türkiye’de Yapı Sektöründe İşçi Sağlığı ve Güvenliğinin Değerlendirilmesi. *Journal of Polytechnic*, 13(1), 49-53.
- Ferraris, C. F., Hackley, V. A., ve Avilés, A. I., 2004, *Measurement of particle size distribution in Portland cement powder: analysis of ASTM round robin studies*. ASTM International.

- Ghantous, R. M., Valadez-Carranza, Y., Reese, S. R., ve Weiss, W. J., 2022, Drying behavior of 3D printed cementitious pastes containing cellulose nanocrystals. *Cement*, 9, 100035.
- Ghio, V. A., 1993, *The rheology of fresh concrete and its effect on the shotcrete process*. University of California, Berkeley.
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., ve Morel, P., 2016, Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, 100, 102-109.
- Hager, I., Golonka, A., ve Putanowicz, R., 2016, 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, 151, 292-299.
- Hisseine, O. A., Ahmed, Omran, F., ve Tagnit-Hamou, A., 2018, Influence of Cellulose Filaments on Cement Paste and Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6), 04018109.
- Jiao, D., De Schryver, R., Shi, C., & De Schutter, G., 2021, Thixotropic structural build-up of cement-based materials: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104152.
- Jolin, M., Lemay, J. D., Ginouse, N., Bissonnette, B., ve Blouin-Dallaire, É., 2015, The Effect of Spraying on Fiber Content and Shotcrete Properties.
- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., ve Khoshnevis, B., 2017, Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145, 639-647.
- Khalil, N., Aouad, G., El Cheikh, K., ve Rémond, S., 2017, Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. *Construction and Building Materials*, 157, 382-391.
- Khayat, K. H., 1998, Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials -An overview. *Cement and Concrete Composites*, 20(2-3), 171-188.
- Khayat, K. H., ve Mikanovic, N., 2012, Viscosity-enhancing admixtures and the rheology of concrete. *Understanding the Rheology of Concrete*, 209-228.
- Khoshnevis, B., 2004, Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5-19.
- Khoshnevis, B., ve Bekey, G., 2003, Automated Construction Using Contour Crafting-- Applications on Earth and Beyond. *Nist Special Publication Sp*, 489-494.
- Klemm, D., Cranston, E. D., Fischer, D., Gama, M., Kedzior, S. A., Kralisch, D., Kramer, F., Kondo, T., Lindström, T., Nietzsche, S., Petzold-Welcke, K., ve Rauchfuß, F., 2018, Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. *Materials Today*, 21(7), 720-748.

- Koehler, E. P., & Fowler, D. W., 2004, *Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete*.
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., ve Thorpe, T., 2012, Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 45(8), 1221-1232.
- León-Martínez, F. M., Cano-Barrita, P. F. D. J., Lagunez-Rivera, L., ve Medina-Torres, L., 2014, Study of nopal mucilage and marine brown algae extract as viscosity-enhancing admixtures for cement based materials. *Construction and Building Materials*, 53, 190-202.
- Li, Z., Hojati, M., Wu, Z., Piasente, J., Ashrafi, N., Duarte, J. P., Nazarian, S., Bilén, S. G., Memari, A. M., ve Radlińska, A., 2020, Fresh and Hardened Properties of Extrusion-Based 3D-Printed Cementitious Materials: A Review. *Sustainability*, 12(14), 5628.
- Li, Z., Lu, T., Liang, X., Dong, H., ve Ye, G., 2020, Mechanisms of autogenous shrinkage of alkali-activated slag and fly ash pastes. *Cement and Concrete Research*, 135, 106107.
- Liang, L., Zhang, X., Liu, Q., Li, X., ve Shang, X., 2022, Cellulose nanofibrils for the performance improvement of ultra-high ductility cementitious composites. *Cellulose*, 29(3), 1705-1725.
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., ve Thorpe, T., 2012, Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21(1), 262-268.
- Liu, C., Wang, X., Chen, Y., Zhang, C., Ma, L., Deng, Z., Chen, C., Zhang, Y., Pan, J., ve Banthia, N., 2021, Influence of hydroxypropyl methylcellulose and silica fume on stability, rheological properties, and printability of 3D printing foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104158.
- Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., ve Langenberg, S., 2015, Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*, 60, 40-49.
- Long, W. J., Tao, J. L., Lin, C., Gu, Y. cun, Mei, L., Duan, H. B., ve Xing, F., 2019, Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing. *Journal of Cleaner Production*, 239, 118054.
- Long, W. J., Lin, C., Tao, J. L., Ye, T. H., ve Fang, Y., 2021, Printability and particle packing of 3D-printable limestone calcined clay cement composites. *Construction and Building Materials*, 282, 122647.
- Ma, L., Zhao, Q., Yao, C., ve Zhou, M., 2012, Impact of welan gum on tricalcium aluminate–gypsum hydration. *Materials Characterization*, 64, 88-95.

- Ma, G., ve Wang, L., 2018, A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(3), 382-400.
- Ma, G., Salman, N. M., Wang, L., & Wang, F., 2020, A novel additive mortar leveraging internal curing for enhancing interlayer bonding of cementitious composite for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 244, 118305.
- Malaeb, Z., AlSakka, F., ve Hamzeh, F., 2019, 3D concrete printing: machine design, mix proportioning, and mix comparison between different machine setups. İçinde *3D Concrete printing technology*, 115-136.
- Manikandan, K., Wi, K., Zhang, X., Wang, K., ve Qin, H., 2020, Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing. *Manufacturing Letters*, 24, 33-37.
- Mehta, P. K., ve Monteiro, P. J. M., 2014, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Meyer, C., 2009, The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601-605.
- Mihryan, A., 2011, Cellulose from cladophorales green algae: From environmental problem to high-tech composite materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(4), 2449-2460.
- Mohammadkazemi, F., Doosthoseini, K., Ganjian, E., ve Azin, M., 2015, Manufacturing of bacterial nano-cellulose reinforced fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 101, 958-964.
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., ve Youngblood, J., 2011, Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941-3994.
- Muhammad Salman, N., Ma, G., Ijaz, N., ve Wang, L., 2021, Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3D concrete printing (3DCP): Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*, 291, 123281.
- Muthukrishnan, S., Ramakrishnan, S., ve Sanjayan, J., 2021, Technologies for improving buildability in 3D concrete printing. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104144.
- Nagarajan, K. J., Ramanujam, N. R., Sanjay, M. R., Siengchin, S., Surya Rajan, B., Sathick Basha, K., Madhu, P., ve Raghav, G. R., 2021, A comprehensive review on cellulose nanocrystals and cellulose nanofibers: Pretreatment, preparation, and characterization. *Polymer Composites*, 42(4), 1588-1630.
- Nassiri, S., Chen, Z., Jian, G., Zhong, T., Haider, M. M., Li, H., Fernandez, C., Sinclair, M., Varga, T., Fifield, L. S., ve Wolcott, M., 2021, Comparison of unique effects

- of two contrasting types of cellulose nanomaterials on setting time, rheology, and compressive strength of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 123, 104201.
- Nematollahi, B., Xia, M., ve Sanjayan, J., 2017, Current progress of 3D concrete printing technologies. *ISARC. Proceedings of the international symposium on automation and robotics in construction*, 34.
- Özalp, F., Yılmaz, H. D., ve Yaşar, Ş., 2018, 3D Yazıcı Teknolojisine Uygun Sürdürülebilir Ve Yenilikçi Betonların Geliştirilmesi. *Hazır Beton*, 62, 70.
- Pade, C., ve Guimaraes, M., 2007, The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1348-1356.
- Palacios, M., ve Flatt, R. J., 2016, Working mechanism of viscosity-modifying admixtures. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 415-432.
- Panda, B., Lim, J. H., ve Tan, M. J., 2019, Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Composites Part B: Engineering*, 165, 563-571.
- Panda, B., Paul, S. C., Hui, L. J., Tay, Y. W. D., ve Tan, M. J., 2017, Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment. *Journal of Cleaner Production*, 167, 281-288.
- Panda, B., ve Tan, M. J., 2018, Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International*, 44(9), 10258-10265.
- Park, C. K., Noh, M. H., ve Park, T. H., 2005, Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 842-849.
- Paul, S. C., Tay, Y. W. D., Panda, B., ve Tan, M. J., 2018, Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of civil and mechanical engineering*, 18, 311-319.
- Paul, S. C., van Zijl, G. P. A. G., ve Gibson, I., 2018, A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. *Rapid Prototyping Journal*, 24(4), 784-798.
- Perkins, I., ve Skitmore, M., 2015, Three-dimensional printing in the construction industry: A review, 15(1), 1-9.
- Perrot, A., Rangeard, D., ve Pierre, A., 2016, Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(4), 1213-1220.

- Rahman, M. K., Baluch, M. H., ve Malik, M. A., 2014, Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 50, 710-717.
- Rahul, A. V., Santhanam, M., Meena, H., ve Ghani, Z., 2019, 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites*, 97, 13-23.
- Reales, O. A. M., Duda, P., Silva, E. C. C. M., Paiva, M. D. M., ve Toledo Filho, R. D., 2019, Nanosilica particles as structural buildup agents for 3D printing with Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, 219, 91-100.
- Reiter, L., Wangler, T., Roussel, N., ve Flatt, R. J., 2018, The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research*, 112, 86-95.
- Rodrigues, F. A., ve Joekes, I., 2011, Cement industry: Sustainability, challenges and perspectives. *Environmental Chemistry Letters*, 9(2), 151-166.
- Roussel, N., 2006, Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 39(4), 501-509.
- Roussel, N., 2018, Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*, 112, 76-85.
- Roussel, N., Lemaître, A., Flatt, R. J., ve Coussot, P., 2010, Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 77-84.
- Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., ve Brumaud, C., 2012, The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 148-157.
- Ruuska, A., ve Häkkinen, T., 2014, Material Efficiency of Building Construction. *Buildings 2014, Vol. 4, Pages 266-294*, 4(3), 266-294.
- Saruhan, V., Keskinateş, M., & Felekoğlu, B., 2022, A comprehensive review on fresh state rheological properties of extrusion mortars designed for 3D printing applications. *Construction and Building Materials*, 337, 127629.
- Scrivener, K. L., & Nematı, K. M., 1996, The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(1), 35-40.
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R., 2019, An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286-1296.
- Shakor, P., Nejadi, S., Sutjipto, S., Paul, G., ve Gowripalan, N., 2020, Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar. *Additive Manufacturing*, 32, 101069

- Sun, X., Wu, Q., Lee, S., Qing, Y., & Wu, Y., 2016, *Cellulose Nanofibers as a Modifier for Rheology, Curing and Mechanical Performance of Oil Well Cement OPEN*.
- Sun, H., Que, Z., Wei, H., Zhou, A., Peng, X., Cui, W., ve Wang, X., 2022, Tuning matrix rheology and mechanical performance of ultra-high performance concrete using cellulose nanofibers. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 1570–1582.
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>, 12(3), 261-276.
- Tay, Y. W. D., Qian, Y., & Tan, M. J. (2019). Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106968.
- Teng, L., Zhu, J., Khayat, K. H., & Liu, J. (2020). Effect of welan gum and nanoclay on thixotropy of UHPC. *Cement and Concrete Research*, 138, 106238.
- Turner, L. K., ve Collins, F. G., 2013, Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125-130.
- Türk, F., Kaya, M., Saydan, M., ve Keskin, Ü. S., 2022, Environmentally friendly viscosity-modifying agent for self-compacting mortar: *Cladophora* sp. cellulose nanofibres. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-16
- TSE, 2003, TS EN 1008 Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları.
- TSE, 2012, TS EN 197 Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri
- TSE, 2013, TS EN 934-2+A1 Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme.
- TSE, 2016, TS EN 196 Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini
- Usanmaz, D., 2021, COVID 19 Pandemi Sürecinin Türkiye’de Konut Sektörü Üzerine Etkileri. *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi SBE Dergisi*, 11(3), 1352-1365.
- Walsh, N.P., 2019, World’s Largest 3D-Printed Concrete Pedestrian Bridge Completed in China [online], ArchDaily, <https://www.archdaily.com/909534/worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china>, [15.04.2023]
- Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., ve Roussel, N., 2016, Digital concrete: opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*, 1, 67-75.



- Wolfs, R. J. M., Bos, F. P., ve Salet, T. A. M., 2019, Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*, 119, 132-140.
- Yahia, A., 2011, Shear-thickening behavior of high-performance cement grouts — Influencing mix-design parameters. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 230-235.
- Zhang, Y., Zhang, Y., Liu, G., Yang, Y., Wu, M., ve Pang, B., 2018, Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink. *Construction and Building Materials*, 174, 263-271.
- Zhang, J., Wang, J., Dong, S., Yu, X., ve Han, B., 2019, A review of the current progress and application of 3D printed concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105533.
- Zhang, C., Nerella, V. N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V., ve Banthia, N., 2021, Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104155.

