



**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME KATKILI  
ÇİMENTO ESASLI 3D BASKI HARÇLARININ  
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN**

**ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ**

**Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN**

**Danışman  
Prof.Dr. Tayfun UYGUNOĞLU**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Ağustos 2024**

TC.  
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
DOKTORA TEZİ

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME KATKILI ÇİMENTO ESASLI 3D  
BASKI HARÇLARININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI

Hazırlayan  
Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN

("İnşaat Mühendisliği (Yapı; Yapı Malzemeleri; Yapım Yönetimi)" tematik alanında  
100/2000 YÖK Doktora Bursiyeri)

Danışman  
Prof. Dr. Tayfun UYGUNOĞLU

AFYONKARAHİSAR, 2024

## TEZ ONAY SAYFASI

Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN tarafından hazırlanan “Faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı 3D baskı harçlarının mühendislik özelliklerinin araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 08 / 08 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof.Dr. Tayfun UYGUNOğLU

**Başkan** : Prof.Dr. İlker Bekir Topçu  
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi,  
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi

**Üye** : Prof.Dr. Tayfun Uygunoğlu  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Prof.Dr. Atilla Evcin  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Doç.Dr. Tahir Gönen  
Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Doç.Dr. Ahmet Raif Boğa  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
..... /..... /..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. Bekir YALÇIN  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

### Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**08 / 08 / 2024**

**İmza**

**Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN**

## ÖZET

Doktora Tezi

### FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME KATKILI ÇİMENTO ESASLI 3D BASKI HARÇLARININ MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof.Dr. Tayfun UYGUNOĞLU

Bu tez çalışmasında, faz değiştiren malzeme (FDM) katkılı çimento esaslı üç boyutlu (3D) baskı harçlarının mühendislik özellikleri araştırılmıştır. Öncelikle farklı tip faz değiştiren malzeme kullanımının fiziksel ve mekanik özelliklere etkisini araştırmak için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme ve kapsülsüz faz değiştiren malzeme kullanımının etkisini incelemek için farklı oranlarda (%0, %2.5 ve %5) FDM katkılı çimento esaslı harçlar üretilerek taze ve sertleşmiş beton özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. 3D baskı yazıcıda kullanılacak harçların yazdırma esnasında hortumda tıkanma yapmayacak ve kopma olmaksızın akabilecek kıvamda tasarımını yapmak için ekstrüde edilebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ekstrüde edilebilirlik deney sonuçlarına göre sonraki deneylerde harç karışımların 0.37 s-ç oranında hazırlanmasına ve dairesel uçla yazdırılmasına karar verilmiştir. FDM katkılı çimento esaslı harçların farklı sıcaklık değerlerinde (20-50 °C) ve farklı hızlarda görünen viskoziteleri ölçülmüştür. Tasarlanan 3D baskı yazıcıda mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı harçlarla yazdırma işlemi yapılmıştır. Yazdırılan model kutularda FDM katkılı çimento esaslı harçların istenilen sıcaklıktaki çevre koşullarını simüle eden iklimlendirme kabini içinde ısı özellikleri analiz edilmiştir. Ayrıca baskılanan harçların basınç, eğilme, aderans dayanımı gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Deneysel bulgulara göre FDM kullanımıyla harçların işlenebilirliği kontrol numuneye göre kapsülsüz FDM'li harçlarda %3 ve %6, mikrokapsüllenmiş FDM'li harçlarda %2.5 ve %5 oranında azalmıştır. Ancak taze harcın reolojik özellikleri FDM'nin ısıyı absorbe etmesinden dolayı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle FDM'li harcın taze

özellikleri sıcaklıkla kontrol edilebilir. Faz değiştiren malzemenin dahil edilmesiyle elde edilen harçların mekanik performansında bir azalma olmuştur. Faz değiştiren malzeme katkılı numuneler ile kontrol numunelerin erken dayanımı arasındaki fark yaklaşık 10 MPa iken ileri evre dayanımındaki farkın yaklaşık 20 MPa çıktığı görölmüştür. Model kutularda yapılan ısıl deneylerde, kontrol duvarlara göre FDM katkılı duvarlarda yaklaşık %68 oranında bir sıcaklık farkı ölçölmüştür. Ayrıca FDM'li harçların faz değişiminin, farklı sıcaklıklarda elektriksel özdirenç ve UPV değerleri ölçölerek elde edilebileceği de bulunmuştur.

**2024, xv + 107 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Çimento esaslı harç, faz değiştiren malzeme, taze ve sertleşmiş beton özellikleri, 3D baskı beton.

## **ABSTRACT**

Ph.D. Thesis

### INVESTIGATION OF THE ENGINEERING PROPERTIES OF PHASE- CHANGEABLE MATERIAL ADDITIVE CEMENT-BASED 3D PRINTING MORTARS

Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Prof. Tayfun UYGUNOĞLU

In this thesis study, the engineering properties of cement-based three-dimensional (3D) printing mortars with phase change material (PCM) additives were investigated. First of all, experimental studies were carried out to investigate the effect of using different types of phase change materials on physical and mechanical properties. To examine the effect of using microencapsulated phase change material and non-encapsulated phase change material, cement-based mortars with PCM additives at different rates (0%, 2.5% and 5%) were produced and the properties of fresh and hardened concrete were experimentally examined. Extrudability experiments were carried out to design the mortars to be used in the 3D printing printer in a consistency that will not clog the hose during printing and flow without breaking. According to the extrudability test results, it was decided to prepare the mortar mixtures at a 0.37 s-c ratio and print them with a circular tip in the following experiments. The apparent viscosities of cement-based mortars with PCM additives were measured at different temperatures (20-50 °C) and different speeds. Printing was done with microencapsulated PCM-added cement-based mortars in the designed 3D printing printer. In the printed model boxes, the thermal properties of cement-based mortars with PCM additives were analyzed in an air conditioning cabin simulating environmental conditions at the desired temperature. In addition, mechanical properties of the pressed mortars such as pressure, bending and adherence strength were determined. According to experimental findings, the workability of mortars with the use of PCM decreased by 3% and 6% in mortars with unencapsulated PCM and by 2.5% and

5% in mortars with microencapsulated PCM, compared to the control sample. However, the rheological properties of fresh mortar vary depending on temperature due to the fact that PCM absorbs heat. Therefore, the fresh properties of PCM mortar can be controlled by temperature. There was a decrease in the mechanical performance of the mortars obtained with the inclusion of phase change material. It was observed that the difference between the early strength of the phase change material-added samples and the control samples was approximately 10 MPa, while the difference in the late stage strength was approximately 20 MPa. In thermal experiments carried out in model boxes, a temperature difference of approximately 68% was measured in PCM-added walls compared to control walls. It has also been found that the phase change of PCM mortars can be obtained by measuring electrical resistivity and UPV values at different temperatures.

**2024, xv + 107 pages**

**Keywords:** Cementitious mortar, phase change material, fresh and hardened concrete properties, 3D printed concrete.

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusunun belirlenmesi, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu değerli katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Tayfun UYGUNOğLU' na teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını 221M784 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK'a ve 20.FEN.BİL.3434 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi ile destekleyen Afyon Kocatepe niversitesi'ne teşekkür ederim.

Tüm yaşantım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen AİLEME ve değerli hocam Onk. Dr. Haluk NURBAKİ'ye teşekkür ederim.

Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN  
AFYONKARAHİSAR, 2024

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
RESİMLER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	4
2.1 3D Yazıcıların İnşaat Sektöründe Kullanımı .....	4
2.2 Üretim Aşamasındaki Enerji Korunumu.....	9
2.2.1 3D Baskı Yazıcı Otomatik Yapı Üretim Prensipleri.....	12
2.2.2 3D Yazdırılabilir Malzemelerin Optimize Karışım Esasları.....	14
2.3 Yapıların Kullanımı Sırasındaki Enerji Korunumu.....	18
2.3.1 Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar .....	21
2.3.1.1 3D Baskı Yazıcılarla Otomatik Yapı Üretimi İle İlgili Çalışmalar .....	21
2.3.1.2 Faz Değiştiren Malzeme Kullanımı İle İlgili Çalışmalar .....	24
3. MATERYAL ve METOT .....	28
3.1 Kullanılan Malzemeler .....	28
3.1.1 Çimento .....	28
3.1.2 Agrega .....	29
3.1.3 Kimyasal Katkı .....	30
3.1.4 Faz Değiştiren Malzeme .....	30
3.1.5 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Karışım Suyu.....	32
3.2 Karışımların Hazırlanması.....	32
3.3 Taze Harçlarda Yapılan Deneyler.....	33
3.3.1 Yayılma .....	33
3.3.2 Ekstrüde Edilebilirlik .....	34

3.3.4 Görünen Viskozite .....	35
3.3.5 3D Yazdırma.....	37
3.4 Sertleşmiş Harçlarda Yapılan Deneyler .....	39
3.4.1 Fiziksel Özellikler.....	39
3.4.1.1 Ultrases Geçiş Süresi Deneyi .....	39
3.4.1.2 Elektriksel Özdirenc .....	39
3.4.1.3 Boşluk Oranı ve Su Emme .....	40
3.4.2 Mekanik Özellikler .....	40
3.4.2.1 Basınç Deneyi .....	40
3.4.2.2 Eğilme Deneyi.....	41
3.4.2.3 Aderans Dayanımı.....	42
3.4.2.4 Dinamik Elastisite Modülü.....	43
3.4.3 Isıl Özellikler .....	43
3.4.3.1 Isıl İletkenlik .....	43
3.4.3.2 DSC-TGA Analizleri.....	44
3.4.3.3 Enerji Performansı.....	44
3.4.4 Mikroyapı Özellikler.....	46
3.4.4.1 Mikroyapı Analizi .....	46
4. BULGULAR.....	47
4.1 Taze Harçlarda Yapılan Deneyler.....	47
4.1.1 Yayılma .....	47
4.1.2 Ekstrüde Edilebilirlik .....	48
4.1.3 Görünen Viskozite .....	51
4.1.4 3D Yazdırma.....	57
4.2 Sertleşmiş Harçlarda Yapılan Deneyler .....	58
4.2.1 Fiziksel Özellikler.....	58
4.2.1.1 Ultrases Geçiş Süresi Deneyi .....	58
4.2.1.2 Elektriksel Özdirenc .....	60
4.2.1.3 Boşluk Oranı ve Su Emme .....	62
4.2.2 Mekanik Özellikler .....	64
4.2.2.1 Basınç Deneyi .....	64

4.2.2.2 Eğilme Deneyi.....	66
4.2.2.3 Aderans Dayanımı.....	67
4.2.2.4 Dinamik Elastisite Modülü.....	68
4.2.3 Isıl Özellikler .....	68
4.2.3.1 Isıl İletkenlik .....	68
4.2.3.2 DSC-TGA Analizleri.....	69
4.2.3.3 Enerji Performansı.....	71
4.2.4 Mikroyapı Özellikler.....	73
4.2.4.1 Mikroyapı Analizi .....	73
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	75
6. KONU İLE İLGİLİ YAPILABİLECEK ÇALIŞMALAR.....	81
7. KAYNAKLAR .....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	101

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

CaO	Kalsiyum oksit
SiO <sub>2</sub>	Silisyum oksit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alüminyum oksit
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Demir oksit
MgO	Magnezyum oksit
SO <sub>3</sub>	Sülfat
K <sub>2</sub> O	Potasyum oksit
Na <sub>2</sub> O	Sodyum oksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
µm	Nanomikron
mm	Milimetre
cm	Santimetre
dm	Desimetre
m	Metre
g	Gram
kg	Kilogram
lt	Litre
rpm	Revolutions per minute
MPa	Megapaskal
°C	Santigrad derece
dev	Devir
dk	Dakika
kohm(kΩ)	Kiloohm
kw	Kilowatt
Dmax	Maksimum çap
R	Direnç değeri
A	Numune yüzey alanı
δ	Elektriksel özdirenç
L	Plakalar arası mesafe

### Kısaltmalar

ASTM	Uluslararası Amerikan test ve malzeme topluluğu
CEM I	Portland çimento
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre
EN	Avrupa normu
EM	Eklemeli imalat
FDM	Faz değiştiren malzeme
KPSLZ	Kapsülsüz faz değiştiren malzemeler
PCM	Faz değiştiren malzemeler
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TGA	Termogravimetrik analiz
TS	Türk standartları
UPV	Ultrasonik geçiş süresi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 2.1</b> Prefabrik bileşenler kullanılarak üretilen bina şematik gösterimi. ....	11
<b>Şekil 2.2</b> Geleneksel yöntemle yapı üretimi ile 3D baskı otomatik yapı üretiminin karşılaştırılma şeması. ....	12
<b>Şekil 2.3</b> 3D baskı yazıcı otomatik yapı üretim fazlarının şematik gösterimi. ....	14
<b>Şekil 2.4</b> Nozul deliğinin şekline bağlı olarak katmanlar arası boşluk (a: temas alanı; b: daire kesitli uç harç katmanı; c: dikdörtgen kesitli uç harç katmanı). ....	15
<b>Şekil 3.1</b> Ara yüzey polimerizasyon yöntemiyle mikrokapsül üretimi. ....	31
<b>Şekil 3.2</b> Faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harç karışımlarının elde edilmesinin şematik gösterimi. ....	32
<b>Şekil 3.3</b> a) Kayma gerilmesi-şekil değiştirme oranının farklı model yaklaşımları b) x-y dağılım grafiğinde doğrusal eğimden korelasyon katsayısının bulunması. ....	37
<b>Şekil 3.4</b> Model kutuların ısıl analizlerinin yapım aşamasının şematik gösterimi. ....	45
<b>Şekil 4.1</b> Mikrokapsüllü ve kapsülsüz FDM katkılı çimento esaslı harçların yayılma çapı. ....	47
<b>Şekil 4.2</b> Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranı değerlerinde dairesel uzun uçtan ekstrüde edilebilirliği. ....	49
<b>Şekil 4.3</b> Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranı değerlerinde dikdörtgen uzun uçtan ekstrüde edilebilirliği. ....	49
<b>Şekil 4.4</b> Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranı değerlerinde dairesel kısa uçtan ekstrüde edilebilirliği. ....	50
<b>Şekil 4.5</b> Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranı değerlerinde dikdörtgen kısa uçtan ekstrüde edilebilirliği. ....	50
<b>Şekil 4.6</b> Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranına göre görünen viskoziteleri. ....	51
<b>Şekil 4.7</b> Mikrokapsüllü FDM katkılı numunelerin karıştırma hızına ve sıcaklığa bağlı viskoziteleri (a: 10 rpm; b: 50 rpm; c: 100 rpm) ....	52
<b>Şekil 4.8</b> Kapsülsüz FDM katkılı çimento hamurlarının karıştırma hızına ve sıcaklığa bağlı viskoziteleri (a: 10 rpm; b: 50 rpm; c: 100 rpm). ....	53
<b>Şekil 4.9</b> Mikrokapsüllü FDM katkılı çimento hamurlarının karıştırma hızına ve sıcaklığa bağlı eşik gerilmesi değerleri (a: 10 rpm; b: 50 rpm; c: 100 rpm) ..	55
<b>Şekil 4.10</b> Kapsülsüz FDM katkılı çimento hamurlarının karıştırma hızına ve sıcaklığa bağlı eşik gerilmesi değerleri (a: 10 rpm; b: 50 rpm; c: 100 rpm) ..	56
<b>Şekil 4.11</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı prizma numunelerde ultrases geçiş hızı. ....	58

<b>Şekil 4.12</b> Kapsülsüz FDM katkılı prizma numunelerde ultrases geçiş hızı. ....	59
<b>Şekil 4.13</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı harçların sıcaklığa bağlı UPV değerleri.....	60
<b>Şekil 4.14</b> Kontrol ve mikrokapsüllü FDM katkılı numunelerin elektriksel özdirençlerinin frekansa bağlı değişimi. ....	60
<b>Şekil 4.15</b> Kontrol ve kapsülsüz FDM katkılı numunelerin elektriksel özdirençlerinin frekansa bağlı değişimi. ....	61
<b>Şekil 4.16</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı harçların sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç değerleri.....	62
<b>Şekil 4.17</b> Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların görünen boşluk oranı değerleri.....	62
<b>Şekil 4.18</b> Kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların görünen boşluk oranı değerleri. ....	63
<b>Şekil 4.19</b> Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların su emme değerleri. ....	63
<b>Şekil 4.20</b> Kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların su emme değerleri.....	64
<b>Şekil 4.21</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı deney numunelerinin basınç dayanımı sonuçları. ....	65
<b>Şekil 4.22</b> Kapsülsüz FDM katkılı deney numunelerinin basınç dayanımı sonuçları. ...	65
<b>Şekil 4.23</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı deney numunelerinin eğilme dayanımı sonuçları. ....	66
<b>Şekil 4.24</b> Kapsülsüz FDM katkılı deney numunelerinin eğilme dayanımı sonuçları. ..	66
<b>Şekil 4.25</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı 3D baskı numunelerin aderans dayanımı. ....	67
<b>Şekil 4.26</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı numunelerin dinamik E-modülünün sıcaklıkla değişimi. ....	68
<b>Şekil 4.27</b> FDM katkılı çimento esaslı harcın sıcaklığa bağlı ısı iletkenliği. ....	69
<b>Şekil 4.28</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı deney numunelerinin TGA analizi. ....	70
<b>Şekil 4.29</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı deney numunelerinin DSC analizi. ....	71
<b>Şekil 4.30</b> Kontrol ve FDM'li model harç kutularının iç duvar yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması (a: -5 °C; b: 0 °C; c: 5 °C; d: 25 °C).....	71

**Şekil 4.31** Kontrol ve FDM'li model harç kutularının dış duvar yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması (a: -5 °C; b: 0 °C; c: 5 °C; d: 25 °C).....72

**Şekil 4.32** Kontrol ve FDM'li model harç kutularının yüksekliği boyunca sıcaklığının karşılaştırılması (a: -5°C; b: 0°C; c: 5°C; d: 25°C).....73



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 2.1.</b> 3D baskı yazıcıda kullanılacak harç karışım hedefleri. ....	18
<b>Çizelge 3.1</b> Portland çimentosunun kimyasal özellikleri.....	28
<b>Çizelge 3.2</b> Portland çimentosunun fiziksel özellikleri. ....	28
<b>Çizelge 3.3</b> MasterGlenium 51 süperakışkanlaştırıcı beton katkısı teknik özellikleri....	30
<b>Çizelge 3.4</b> 3D baskı yazıcı ölçü bilgileri. ....	37



## RESİMLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Resim 2.1</b> Tecla 3D baskı evler. ....	5
<b>Resim 2.2</b> Büyük ölçekli 3 boyutlu yazıcı: CONPrint3D.....	5
<b>Resim 2.3</b> Robotik kollu beton yazıcı: Apis Cor.....	7
<b>Resim 2.4</b> Eindhoven Teknoloji Üniversitesi'nin (TU/E) baskı tesisi kullanılarak yapılan 3D baskı köprü. ....	8
<b>Resim 2.5</b> 3D baskılı yeşil sürdürülebilir dikey beton duvar sistemi. ....	8
<b>Resim 2.6</b> 3D baskı yazıcı ile a) harç katmanların basılması ve b) bükülmesi. ....	13
<b>Resim 2.7</b> 3D yazıcıyla ekstrüde edilmiş harçların katman sayıları (a: 20; b: 27; c: 30; d:18; e:13; f: 6). ....	24
<b>Resim 2.8</b> Uygun agrega seçilmemesi sonucunda nozulda oluşan bloke nedeniyle basılan katmanlarda çökme oluşması. ....	29
<b>Resim 3.1</b> Mikrokapsüllenmiş FDM mikroskop görüntüsü. ....	31
<b>Resim 3.2</b> FDM katkılı çimento esaslı harç karışımların hazırlanması. ....	33
<b>Resim 3.3</b> a) Harcın yayılma tablasında görünümü; b) yayılan harç üzerinde çap ölçümü. ....	33
<b>Resim 3.4</b> Prizmatik numunelerin kalıplanması ve kür edilmesi.....	34
<b>Resim 3.5</b> Harçların ekstrüzyonunda kullanılan nozul şekilleri (a: dairesel uzun; b: dikdörtgen uzun; c: dairesel kısa; c: dikdörtgen kısa). ....	34
<b>Resim 3.6</b> Proje kapsamında tasarlanarak yaptırılan ekstrüzyon ünitesi (a: Ekstrüzyon cihazı; b: cihaz haznesi; c: harç akışı). ....	35
<b>Resim 3.7</b> FDM katkılı çimento harçlarının viskozitelerinin belirlenme aşaması. ....	36
<b>Resim 3.8</b> 3D baskı yazıcı kalibrasyon işlemleri. ....	38
<b>Resim 3.9</b> Repetier Host yazıcı kontrol programı. ....	38
<b>Resim 3.10</b> Ultrases cihazı ile ölçümlerin yapılması. ....	39
<b>Resim 3.11</b> Elektriksel öz direnç ölçümü. ....	40
<b>Resim 3.12</b> Deney numunelerinde basınç dayanımı. ....	41
<b>Resim 3.13</b> Deney numunelerinde eğilme dayanımı.....	41
<b>Resim 3.14</b> 3D yazıcıda yazdırılan FDM katkılı çimento esaslı harç numunelerinin a) kesilmesi b)katmanlar arası aderans dayanımının belirlenmesi.....	42
<b>Resim 3.15</b> Isıl iletkenlik analiz cihazı. ....	43

<b>Resim 3.16</b> NETZSCH STA F3-449 tipi cihazda DSC ve TGA analizleri. ....	44
<b>Resim 3.17</b> Mikrokapsüllenmiş FDM katkı ve kontrol model harç kutularının hazırlanması.....	45
<b>Resim 3.18</b> Deney kutularının iç ve dış sıcaklıklarının iklimlendirme kabininde ölçülmesi. ....	46
<b>Resim 3.19</b> LEO VP-1431 tipi taramalı elektron mikroskopunda mikroyapı analizi. ...	46
<b>Resim 4.1</b> Kopmadan ekstrüde edilen harçlardan (s-ç: 0.33) bir görünüm (a: uzun dairesel uç; b: uzun dikdörtgen uç). ....	48
<b>Resim 4.2</b> 3D baskı yazıcıda model kutu baskı deneme çalışmaları. ....	57
<b>Resim 4.3</b> 3D baskı yazıcıda kontrol ve %5 FDM model kutuların yazdırılması.....	58
<b>Resim 4.4</b> FDM katkı çimento esaslı harç mikroyapısı. ....	74

## 1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze ana sektörlerden biri olan inşaat sektörü, hem artan konut talebinin hem de tüm yapısal gereksinimlerin karşılanmasında geleneksel inşaat üretim sürecini teknolojik gelişmelerle destekleme arayışına girmiştir (Gan vd. 2020, Hossain vd. 2020). Her ne kadar inşaat aşamasında yapı malzemesinin dayanımı en önemli kriter olsa da, hızla artan küresel ısınma nedeniyle akıllı ve yenilikçi çevre dostu malzemelerle dayanımın artırılması öncelik haline gelmiştir. Yapı üretiminde hammadde kaynaklarını etkili kullanmak, ekolojik üretimin yanı sıra maliyeti de düşürmek ve zamandan tasarruf sağlamak için hızlı üretim tekniklerine yönelim başlamıştır (Bock 2015).

Geleneksel üretim tekniklerine göre zaman, malzeme ve işçilikten tasarruf sağlayarak yeşil ve sürdürülebilir yapı üretimine olanak sağlayan 3D baskı teknolojisi ile üretim yeni bir teknolojidir (Tankova ve Silva 2020, Labonnote vd. 2016). 3D baskı teknolojisiyle, yapı malzeme üretiminden başlayarak çok katlı yapı uygulamasına kadar yaygınlaştırılacak uygulamalarla inşaat sektörüne farklı bir boyut kazandırmak hedeflenmektedir (Bos vd. 2016, Nodehi vd. 2022). Yapı üretiminde en çok kullanılan çimentolu malzemelerin elde edilmesinde kullanılan katkı üretim yöntemleri, inşaat endüstrisinde teknolojik kullanımı öne çıkartsa da imalat safhasındaki gereksinimleri karşılayacak yeni malzemelerin geliştirilmesi de göz ardı edilmemelidir (Ramrez vd. 2004, Han vd. 2021, Siddika vd. 2020).

İmalat safhasındaki gereksinimlere cevap verecek üretim yöntemlerinden biri de harç karışımların ekstrüde edilerek yazdırılması yöntemidir. Yapı üretim sektöründe ekstrüzyon harçlarının 3D yazıcılarda baskı harcı olarak kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır (Nerella vd. 2018, Hou vd. 2021). Yapı ve yapı elemanlarının yapımında kullanılan çimento esaslı malzemeleri katmanlı olarak yazdırmada Eklemeli İmalat (EM), en başarılı yöntemlerden biri olarak gösterilebilir (Buswell vd. 2018, Cai vd. 2019). Bununla birlikte eklemeli imalat yönteminde pompadan malzemenin tıkanmadan basılabilmesi ve inşaa sürecinin hızla tamamlanması için optimize edilmiş harç karışım tasarımının yapılması gerekmektedir (Shakor vd. 2019, Manikandan vd. 2020). 3D baskı yazıcı üretim teknolojisinin uygulanmasındaki zorlukları azaltmak ve yapı üretimindeki yerini güçlendirmek için çalışmalar hız kesmeden devam etmektedir.

Ekstrüzyon baskıda kullanılan çimento esaslı malzemeler beraberinde gizli ısı depolama ve serbest bırakma yeteneğine sahip malzemelerin kullanımı üzerine çalışmalar yapmayı da gerektirmektedir. Akıllı-yenilikçi malzeme kullanımı ile yapı ömrü boyunca ısı konforu sağlayarak enerji verimli binaların üretilmesine olanak sağlanmaktadır (Pielichowska ve Pielichowski 2014, Khadiran vd. 2016).

Akıllı malzemeler, belirli bir uyarının etkisinde fiziksel özelliklerini değiştirebilirler ve farklı çevresel değişikliklere optimum şekilde yanıt vererek oluşan yeni koşullara göre kendi işlevlerini oluşturabilirler (Ghareb ve Farhat 2018, Bahl vd. 2020). Akıllı malzemeler bir değişkeni algılama yeteneğine sahip oldukları için dış etkenleri algıladıktan sonra sıcaklık, basınç ve gerilim gibi sorunlara uygun eylemi başlatabilmektedirler. Tanımlanan soruna göre son eylemi kullanmayı öğrenen akıllı malzemeler yapı malzemesi içerisinde istenilen doğrultuda çalıştırılabilmektedir (Ashima vd. 2021, Wu vd. 2020).

Akıllı malzeme olarak tanımlanan faz değiştiren malzemeler (FDM) , faz değişikliklerine göre ayırt edilerek, belirli bir sıcaklık düzeyine göre binalarda enerji verimliliğini arttırmak, binaların değişen iklim koşullarına göre gerekli ısınma ve soğutma yüklerini en aza indirmek için uygulanmaktadır (Cunha ve Aguiar 2020, Ghalambaz vd. 2019). Faz değiştiren malzemeler binalardaki iç sıcaklıkları kontrol altına almak ve ısı konforu arttırmak için kullanılırken, yapı malzemeleri ile uyumlu çalışmasının zorluğundan dolayı uygulanması sınırlı kalmıştır (Karthikeyan ve Ramachandran 2014, Su vd. 2015).

Faz değiştiren malzemeleri mikro kapsülleme yöntemleri, faz geçişi sırasında faz değiştiren malzeme sızıntısının azaltılmasını ve yüzey alanı nedeniyle yüksek bir ısı transferi yapmasını sağlamaktadır. Faz değiştiren malzemelerin mikrokapsüllemesi ile birlikte hem enerji depolama kabiliyeti artmış hem de beton gibi kompozit malzemelerle daha uyumlu hale gelmiştir. Bununla birlikte, faz değiştiren malzemenin kapsüllemesinde kullanılan kabuğun sertliği ısı transfer oranını azaltırken, mikro kapsülleme yapı malzemesinin mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir (Meyer vd. 2019, Salunkhe ve Shembekar 2012).

Bu tez çalışmasında 3D baskı yazıcıda kullanılacak farklı tipte faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların taze ve sertleşmiş halde fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmalara ekstrüzyon cihazında kullanılacak farklı s-ç oranında (0.33, 0.35 ve 0.37) ve 0.4 mm boyutunda agrega ile tasarlanmış çimento esaslı harçların hazırlanması ile başlanmıştır. Çimento esaslı harçlar 50-200 mm/dk hız değerlerinde daire ve dikdörtgen kesitli nozul ucu kullanılarak ekstrüde edilmişlerdir. Sonrasında sıcaklığa bağlı faz değiştiren materyaller belirli oranlarda (%0, %2.5, %5) kapsülsüz ve mikrokapsüllü FDM olarak çimento esaslı harca eklenerek harçların viskozitelerindeki değişim belirlenmiştir. Farklı tipte FDM katkılı harçların ve kontrol harçların farklı sıcaklık (20-50 °C) değerlerinde 10-100 rpm değerleri arasında on farklı devirde görünen viskoziteleri ölçülmüştür. Baskı öncesi alınan numunelerde mekanik deneyler yapılarak numunelerin dayanımları belirlenmiştir. 3D baskı yazıcının kalibrasyonu tamamlandıktan sonra bilgisayar kontrollü 3D yazıcıda baskı aşamasına geçilmiştir. 3D yazıcıda basılan model kutularda ısıl analiz deneyleri gerçekleştirilmiştir.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 3D Yazıcıların İnşaat Sektöründe Kullanımı

Yirmibirinci yüzyılın başından bu yana otomasyonun büyümesi ile gelişen Endüstri 4.0, bilgi ve iletişim teknolojilerine dayalı üretim yapan bir çok alanda etkili olmuştur. Endüstriyel internet, siber güvenlik, büyük ölçekli analiz, yapay zeka, katmanlı üretim, ileri robotik ve gelişmiş malzemeler Endüstri 4.0'ın temel özellikleri arasında yer almaktadır (Geissbauer vd. 2014, Vaidya vd. 2018 ). Pek çok endüstride, eklemeli üretim teknolojileri halihazırda laboratuvar araştırmalarının ötesine geçerek havacılık, otomotiv ve biyomedikal mühendisliği gibi gerçek hayattaki uygulamalarda kullanılmaktadır (Dallasegaa vd. 2018).

1983 yılında Chuck Hull tarafından eklemeli üretim esasına dayalı bir teknoloji olan 3D baskı yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemde bilgisayarda tasarlanan nesnelere, farklı hammaddelerle katmanlar şeklinde art arda eklenerek üretilmektedir. Tüm sanayi sektörleri için yeni bir çığır açan 3D baskı yöntemi, yapı sektöründe de etkili olmaya başlamıştır (Oesterreich vd. 2016).

Ancak inşaat sektöründe 3D baskının kullanılması, inşaat sürecinin dijitalleştirilmesi ve otomasyonu açısından yüksek potansiyele sahip bir uygulama olarak dikkat çekse de, geleneksel tasarım yaklaşımlarından dolayı diğer endüstri kollarına kıyasla çok etkili ilerleme gösterememektedir (Conner vd. 2015).

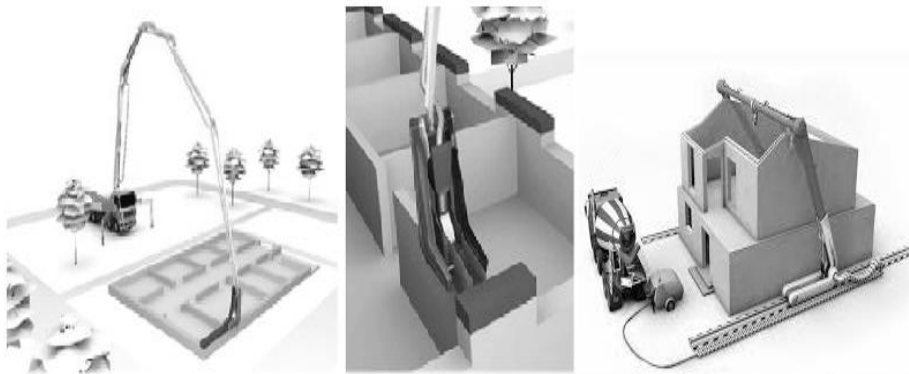
İnşaat için en yaygın kullanılan 3 boyutlu baskı teknolojisi, katmanlı ekstrüzyon tekniğidir (Bhattacharjee vd. 2021). İnşaat için eklemeli üretim teknolojilerini kullanan yazıcılar; robotik kolu, portal tip ve portal 3D yazıcılar olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bunlardan portal yazıcılar boyutu nedeniyle büyük ölçekli binalar inşa etmeye uygundur. Robotik kolu yazıcılar ise daha çok akademik araştırmalarda yapılan deneysel çalışmalar için tercih edilmektedir. Robotik kol sistemi, portal yazıcılarla karşılaştırıldığında daha yeni bir uygulamadır. Bu sistem, teğetsel süreklilik yöntemini kullanarak daha ayrıntılı nesnelere basılmasını ve baskı katmanları arasında daha yumuşak bir geçiş olmasını sağlayarak estetik bir görünüm sağlamaktadır (Zhang vd. 2018).

Dünyanın 3D baskı yazıcıyla tamamen toprak kullanılarak yapılmış ilk evi İtalya'da Bologna merkezli mimarlık stüdyosu Mario Cucinella Architects ve WASP işbirliği ile inşa edilmiştir. Teknoloji ve kil kelimelerinin birleşimi olan (Technology & Clay) Tecla adlı 3D baskı evler, nehir yatağındaki kil kullanılarak doğal malzemelerle, aynı anda çalışan birden fazla 3D baskı yazıcı ile üretilmiştir (Wilson vd. 2023).



**Resim 2.1** Tecla 3D baskı evler.

Beton baskıda kullanılan büyük ölçekli 3 boyutlu yazıcılardan olan CONPrint3D, Almanya'da TU Dresden'deki üç enstitünün ortak çalışmasıyla üretilmiştir. CONPrint3D sistemi, geleneksel inşaat makinelerinin 3D yazıcı olarak kullanılacak şekilde mobil beton pompasıyla koordineli bir şekilde çalışması üzerine kurgulanmıştır (Resim 2.2). İnşaatlarda kullanılan daha küçük ölçekli 3D yazıcılardan temel farkı, 3D beton baskının modern mimariye ve bina tasarımına uyarlanabilmesidir (Wang vd. 2021).



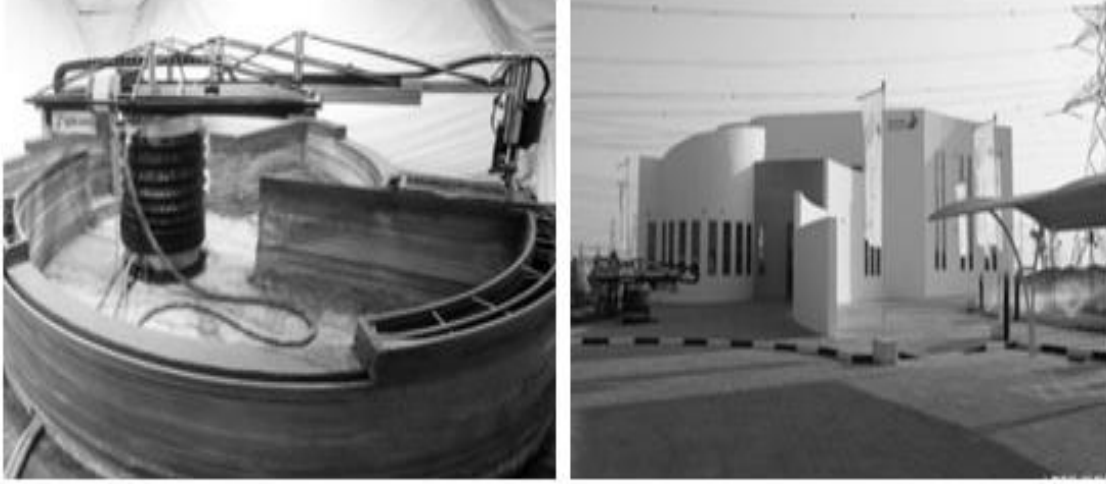
**Resim 2.2** Büyük ölçekli 3 boyutlu yazıcı: CONPrint3D.

CONPrint3D, keskin köşelere ve ağırlıklı olarak düz duvarlara sahip monolitik yapılar için tasarlanmıştır. Tüm yazıcılar, büyük ölçekli uygulamalar için 3 boyutlu baskı malzemesinin sağlamlığı açısından gereklilik olan iri agrega içeren betonla baskı yapma yeteneğine sahip olmamakla birlikte, CONPrint3D boyutu 8-10 mm'ye kadar olan iri agregalı beton kullanmaktadır. Ayrıca yüksek performanslı beton, gaz beton ve lif takviyeli beton ile de baskı yapılabilmektedir.

CONPrint3D yazdırma kafası ile doğrudan dozajlama yapabilme özelliği ile beton akışının daha iyi kontrol edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, taze beton özellikleri baskıdan önce belirlenerek gereksinimlere göre ayarlanabilmektedir. Yazdırma kafası, yazdırılan katmanların düzgün yüzeyli olarak üretilmesini sağlayacak şekillendirme plakalarıyla donatıldığı için, düz duvarlar ve keskin köşeler pürüzsüz bir yüzey kalitesinde basılabilmektedir (Mechtcherine vd. 2019).

Robotik kollu beton yazıcılar, basılacak yapının ortasına monte edilen döner kol ve kaydırma mekanizmalarından oluşmaktadır. İnşaat uygulamalarında bu yazıcıların avantajı mobil olmaları ve birden fazla birimin birlikte basılması için uygun olmalarıdır (Kloft vd. 2020). Bu tür yazıcılar sınırlı boyutta oldukları için büyük ölçekli binaların basımı için tercih edilmemektedir. Robot kollu yazıcıyı daha hareketli hale getirerek yazdırma alanını artırmak için bir sistem üzerine robot kol yazıcıları yerleştirilebilir. Ancak bu durumda baskı kontrolü zorlaşmakta ve baskı kalitesinde problemler ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca robotik kollu yazıcılar ince agregalı malzeme kullanımına uygun olduğu için kaba agrega kullanımında sorunlar olmaktadır (Lu vd. 2019).

Rus şirketi Apis Cor değişken yükseklik ve genişlik boyutlarına sahip robotik kollu beton yazıcı tasarlamıştır. Baskı kafasını hareket ettirmek için baskı yapılacak yapının ortasına yerleştirilen döner kollu robotun yüksekliği 8.5 m uzunluğa kadar ayarlanabilmektedir. Birden fazla katlı binaların baskısı yapılırken baskı robotunun bir sonraki kata taşınması gerektiği için yapı, baskı robotunun montajı için yeterli alan sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, baskı robotunun ağırlığı da dikkate alınarak alt tavanların yük taşıma kapasitesi tanımlanmıştır. Apis Cor yazıcı ile, Dubai'de 9,5 m yüksekliğinde ve 640 m<sup>2</sup> alana sahip iki katlı bir ofis binası basılmıştır (Resim 2.3) (Tahmasebini vd. 2020).



**Resim 2.3** Robotik kollu beton yazıcı: Apis Cor.

Salet vd. (2018), kamu kullanımı için güvenli olarak sertifikalandırılabilir 3D beton baskılı bir yapı üretmek amacıyla yaptıkları çalışmada, Eindhoven Teknoloji Üniversitesi'nin (TU/E) baskı tesisini kullanarak bir köprü üretimi gerçekleştirmişlerdir. Her bir elemanın yüksekliği yaklaşık 1.08 m ve 12 mm'lik 90 adet basılı katmandan oluşmaktadır. Köprü toplamda, her biri 25.1 m uzunluğunda 535 adet basılı katmanda ve 13.4 km'lik bir baskı yolu uzunluğunda yapılmıştır.

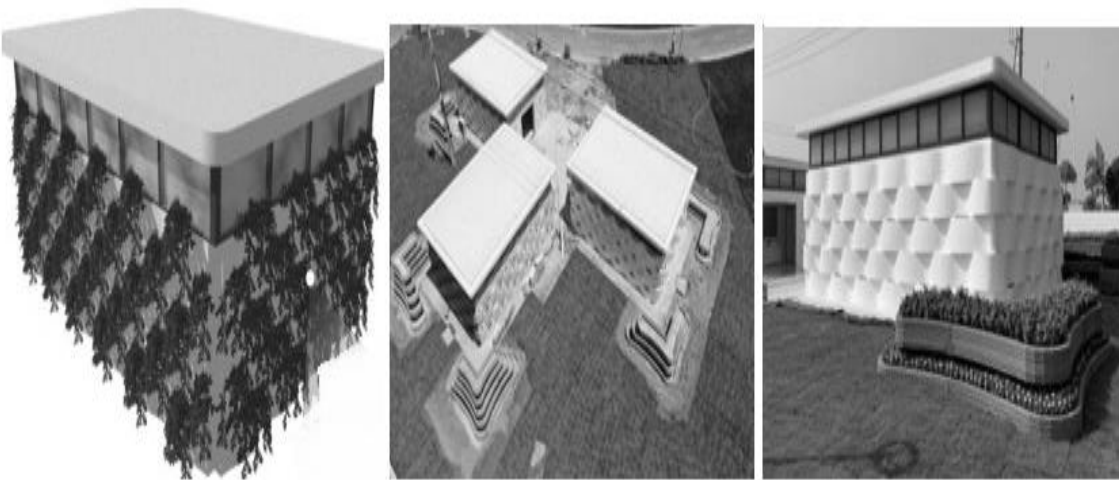
3D baskı ile tek bir katmanın basılması yaklaşık 5 dakika 20 saniye sürerken, tüm köprü elemanlarının basılması 48 saatte tamamlanmıştır. Projede, iki karıştırma cihazı ve pompalar da dahil olmak üzere iki sistem kullanılmıştır. Baskı betonda kuru derzlerin oluşmasını önlemek diğer sisteme geçmeden önceki 2 saatlik süre, sistemin değiştirilmesi ve temizlenmesi, sertleşen beton parçalarının sisteme zarar vermesini ve baskı malzemesi kalitesini düşürmesini önlemek için kullanılmıştır.

Yazıcının açıklık sınırları göz önünde bulundurulduğunda köprüyü altı bileşene bölerek bunları ayrı ayrı 3D baskı yazıcıda yazdırmışlardır. Daha sonra betonu çekme hasarından korumak için ön gerilim uygulamışlardır. Basılı yapıyı değerlendirmek için mevcut bir standart ve norm olmadığından, köprünün Hollanda yapı yönetmeliklerine uygunluğunu göstermek için yerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Köprünün üst kısmına beton yüzey kaplaması uygulanmış ve köprüyü tamamlamak için ayaklara parapet monte edilmiştir. 3D baskı bisiklet köprüsü 2017 yılında trafiğe açılmıştır (Resim 2.4).



**Resim 2.4** Eindhoven Teknoloji Üniversitesi'nin (TU/E) baskı tesisi kullanılarak yapılan 3D baskı köprü.

He vd. (2020), 3D-VtGW adı verilen modüler 3D baskılı yeşil sürdürülebilir dikey beton duvar sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem kullanılarak Çin'in Nanjing kentinde bir bina inşa edilmiştir. Daha sonra binanın ısı davranışını 3D-VtGW sistemiyle belirlemek için bir ısı ağ modeli kullanılmıştır. Deney sonuçları, binanın enerji tasarrufu ve iyileştirilmiş ısı konfor için yüksek potansiyel gösterdiğini ortaya koymuştur (Resim 2.5).



**Resim 2.5** 3D baskılı yeşil sürdürülebilir dikey beton duvar sistemi.

İnşaat 3D baskı laboratuvarında yeterince çalışılmış olmasına rağmen, uygulama alanında katmanlı imalat teknolojilerine ilişkin düzenleyici belgeler henüz mevcut değildir. Buna rağmen inşaat sektörü, pahalı kalıp kullanmadan hemen hemen her şekilde sahip binaların ve diğer karmaşık yapıların doğrudan inşası için potansiyel kullanımı nedeniyle bu teknolojiyi inşaat uygulamalarına uyarlamaya çalışmaktadır. Şu anda bilinen tüm araştırma ve uygulamalarda, mevcut deney yöntemleri 3D baskıya uyarlanarak kullanılmaktadır (Izadgoshasb vd. 2021).

Bununla birlikte katmanlı imalat yöntemi sağladığı avantajlarla özgün mimari tasarım yapmayı, sabit bir hızda çalışarak iş gereksinimini en aza indirmeyi, maliyeti düşürmeyi, inşaat süresini kısaltmayı, böylece hata olasılığını ve malzeme kullanımını azaltmayı amaçlamaktadır (Gao vd. 2015 ).

## **2.2 Üretim Aşamasındaki Enerji Korunumu**

Küresel iklim krizinin evren üzerindeki etkilerinin hızla artmasıyla mevcut sera gazı emisyonlarının etkisini azaltmak ve enerji tüketimini en aza indirmek için enerji verimliliği stratejileri üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Yapılar yaşamsal faaliyetlerin çoğunun gerçekleştiği yer olduğundan, enerji tüketimi binaların yapım aşaması ve kullanım süreci boyunca dünyada tüketilen toplam enerji miktarının yaklaşık %30-40'ına karşılık gelmektedir. Ayrıca dünyadaki CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %30'u yapılar nedeniyle oluşmaktadır (Allouhi vd. 2015, Wilkinson vd. 2007).

İnşaat sektörü, malzeme üretiminden yapının inşa edilmesi sürecine kadar çevre kirliliğini önemli ölçüde arttıran ve iklim krizinin olumsuz etkilerine katkı sağlayan bir sektör olarak öne çıkmaktadır (Wu vd. 2016, Willmann vd. 2016).

Yapılarda konforlu bir ortam elde ederken enerji kullanım seviyelerini en az seviyeye indirerek, tüketilen enerjiden önemli miktarda tasarruf edilmesini sağlamak için bina enerji verimliliği uygulaması kaçınılmaz olmuştur. Ayrıca üretkenliğini arttıran diğer sektörlere göre durgun kalması nedeniyle enerji verimli yapılar üretmeye olanak sağlayacak yenilikçi çalışmalar hız kazanmıştır (Abu Bakar vd. 2015, Khoshnevis 2004, Kim vd. 2015).

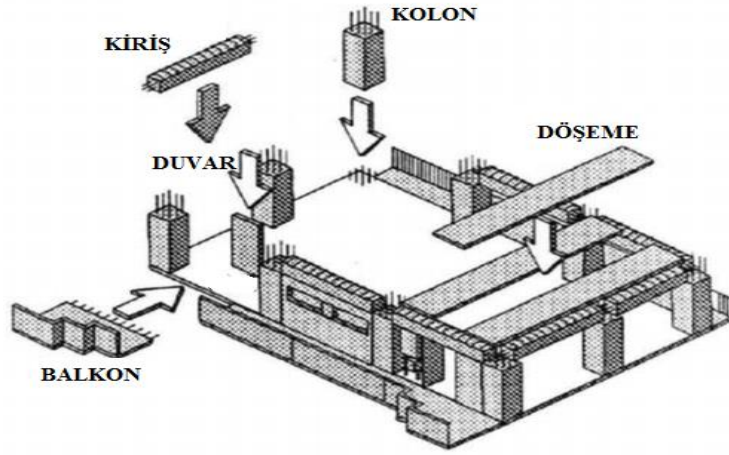
Yapı üretimi projelendirme ve uygulama aşamasına kadar çok fazla hizmet kolunu bünyesinde bulundurmaktadır. Bilgisayar destekli uygulamalar projelerde kolaylıklar sağlamakla birlikte üretim aşamasında hep sınırlı seviyede kullanılmıştır (Oliveira vd. 2020, Tay vd. 2017, Urhal vd. 2019). Bu nedenle inşaat sektörü yeşil, sürdürülebilir ve enerji açısından daha verimli çözümlere ulaşmak için 3D baskı yazıcı ile üretim tekniğine yönelmiştir (Gisario vd. 2019, Buchli vd. 2018).

Geleneksel yapı üretimine göre karbon ayak izini azaltan ve enerji verimli yapılar ortaya çıkmasını sağlayan bu yöntem az maliyetle sınırsız geometrik tasarımlar yapmaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca 3D baskı ile yapı üretim tekniği endüstriyel atıkları yeniden kullanma konusunda geniş bir potansiyele sahip olduğu için sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır (Ribeiro vd. 2019, Jandyal vd. 2022).

Yapının ve yapı elemanlarının tasarımı, bulunduğu çevrenin enerji tüketimi miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmaktadır. Bu nedenle, iklim koşullarına uygun, enerji talebi daha az olan binalar oluşturmak için tasarım aşamasında özen gösterilmesi gerekmektedir (Azhar vd. 2011, Carazo-Álvarez vd. 2019). Binalar uygun şekilde tasarlanırsa kullanım ömrü boyunca pasif olarak ısı konfor sağlayabilir. 3D baskının uygulama esnekliği, tasarımcılara, enerji azaltma amaçlı ek işlemleri ortadan kaldırarak her proje için uygun öğeler oluşturma fırsatı sağlamaktadır (Hager vd. 2016, Primkulov vd. 2018).

Dijital teknolojileri benimseyerek hızla kullanan tıp ve otomotiv gibi sektörlerin aksine, inşaat sektöründe dijital dönüşüm henüz yeni başlamaktadır. Araştırmalarda 3D baskı yazıcı ile üretime esas olan robotik yazılımlara odaklanılmakla birlikte bina performansı ve malzeme üzerine daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

Araştırmacılar genellikle düşük aderans dayanımından, basılı bileşenleri birleştirmedeki zorluklardan ve anizotropik davranıştan kaynaklanan sorunlara işaret etmektedir. 3D baskı yazıcı ile üretilen binaların nasıl bir performans göstereceği ve şu an ki mevcut standart koşullarını yeterli düzeyde karşılayıp karşılayamayacağı bilinmezliğini korumaktadır (Şekil 2.1) (Attaran 2017, Czarnowski vd. 2018).

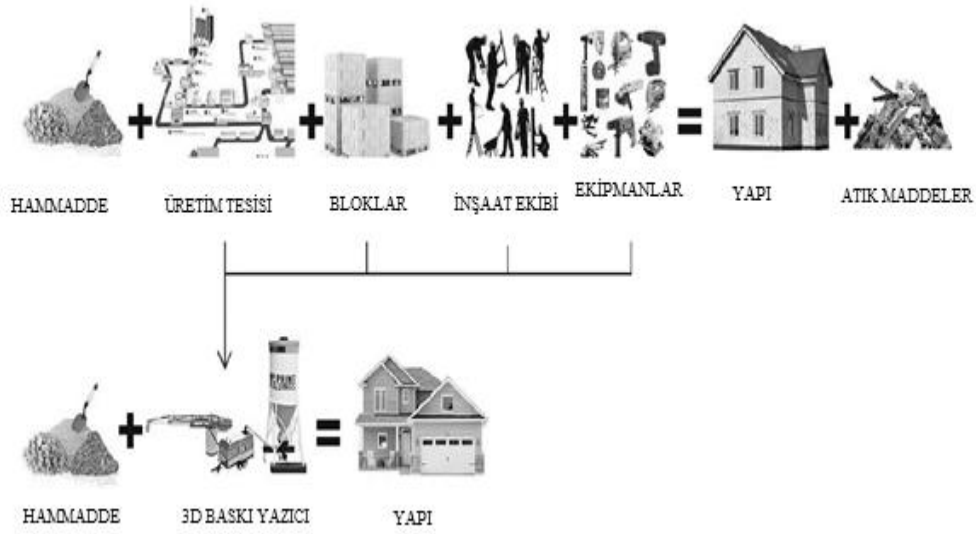


**Şekil 2.1** Prefabrik bileşenler kullanılarak üretilen bina şematik gösterimi.

3D yazıcı otomatik yapı üretim tekniği ile geleneksel inşaat karşılaştırıldığında, kalıp ve işçiliğin ortadan kaldırılması, inşaat ekipmanlarının taşınması, montaj işlemleri ve daha kısa proje süreleri nedeniyle maliyet tasarrufu beklenmektedir (Son vd. 2010). Öte yandan, alışılmadık bileşenler kullanan karışımların karışım oranlarının ve özelliklerinin daha sıkı bir şekilde kontrol edilmesi, betonun maliyetini arttırabilir.

Çevresel etki, kalıp kullanımının ortadan kaldırılması ve malzeme miktarının azaltılmasıyla azaltılabilir, ancak bağlayıcı içeriği çok yüksekse yine artabilir. Tüm bunlarla birlikte 3D baskı yazıcının prefabrikasyon tesisinde ve inşaat sahasında kullanılması durumunda kalıp işçiliği, beton dökme ve sıkıştırma için gerekli iş gücünün azalması, otomasyondan kaynaklanan hata ve kaza oranlarında en aza indirgenmesi önem taşımaktadır (Şekil 2.2) (Taylor vd. 2003, Wakisaka vd. 2000).

3D baskı yazıcılar ile enerji verimli, düşük maliyetli ve büyük ölçekli karmaşık yapıların üretilmesinde endüstriyel atıkların yeniden kullanılması da sağlanmaktadır. Mahadevan vd. (2020), 3D baskı yazıcıda yazdırılabilir beton ve M25 betonla yapılmış bir binanın üretimindeki enerji tüketim maliyetini ve çevresel atıkları karşılaştırmışlardır. Ding vd. (2020) 3D baskı beton karışımlara inşaat ve yıkım atıklarından elde edilen kumun eklenmesini araştırmışlardır. Christen vd. (2022) mevcut 3D yazdırılabilir beton karışımında bulunan doğal agreganın %64'ünü değiştirerek geri dönüştürülmüş tuğla agregası kullanmışlardır.

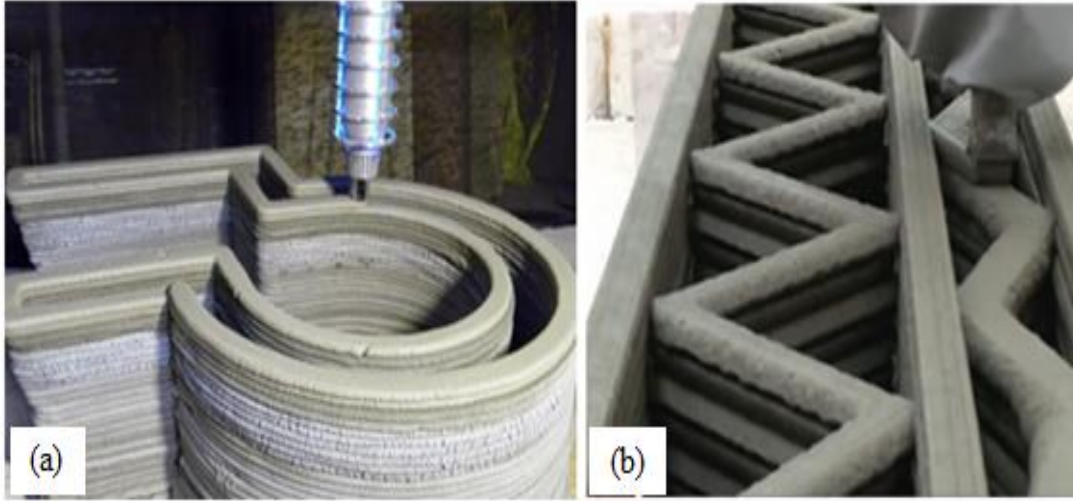


**Şekil 2.2** Geleneksel yöntemle yapı üretimi ile 3D baskı otomatik yapı üretiminin karşılaştırılma şeması.

3D baskı yazıcının üretim aşamasında kullanılabilmesi içinde basılacak nesnelerin boyutlarından dolayı, metal veya plastik nesneler için kullanılanlardan çok daha büyük yazıcılar veya daha genel olarak robotik makineler gerekmektedir. Ayrıca 3D baskı otomatik yapı üretimi yapısal elemanlarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması ve modellenmesi için standart bir deney yoktur. Tüm bu zorluklar göz önüne alındığında, akıllı sistem tasarımına, çevre dostu ve uygun fiyatlı yapı üretimine olanak sağlayacak malzeme geliştirmeye gereksinim vardır (Uygunoğlu vd. 2019).

### 2.2.1 3D Baskı Yazıcı Otomatik Yapı Üretim Prensipleri

3D baskı ile yapı üretiminde kullanılan harç; agrega, çimento ve suya, kimyasal ve mineral katkı maddeleri ilave edilmesiyle elde edilen bir karışımdır (Yasser vd. 2023, Ingham ve Kennedy 2013, Muthukumarana vd. 2023). Geleneksel metottaki beton yerleştirme işleminin aksine 3D baskı yazıcıda kalıpsız katmanlı üretim esastır ve yerleştirme esnasında baskı katmanının genişliği ve kalınlığı kontrol edilmelidir (Resim 2.6) (De Schutter vd. 2018, Jolin vd. 2009).



**Resim 2.6** 3D baskı yazıcı ile a) harç katmanların basılması ve b) bükülmesi.

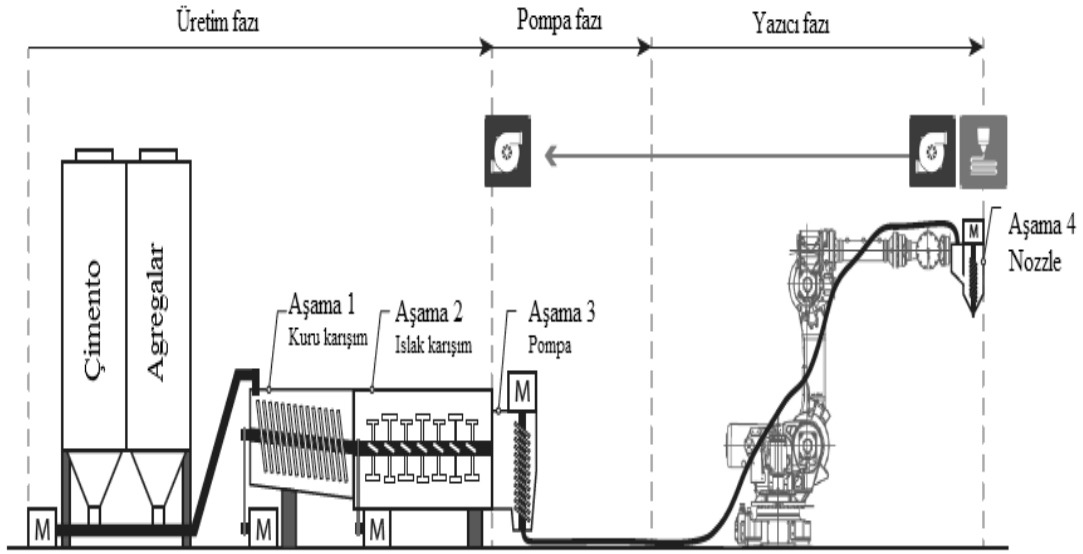
3D baskı yazıcılarla yapı üretimi yapılabilmesi için öncelikle 3 boyutlu model tasarıma gereksinim vardır. Bilgisayar ortamında tasarlanan çizimlerin somutlaştırılması içinde 3D baskı yazıcılarda çimento esaslı harç malzemesi kullanılmaktadır. Harç ise çimento, su ve ince agrega karışımından oluşan ve içerisinde iri agrega bulunmayan bir betondur (Jiao vd. 2021, Ghaffar vd. 2018).

Başarılı bir yapı üretimi gerçekleştirebilmek için ekstrüzyon işlemiyle ilgili bazı özelliklerin karşılanması gerekir. Yazdırma işleminde kullanılacak malzeme pompalanabilir, yazdırılabilir ve inşa edilebilir olmalıdır. Ayrıca katmanlar kendi ağırlığını ve üst üste binen katmanların ağırlığını şekil değişimine uğramadan taşıyabilmesi için gereken dayanıma sahip olmalıdır.

3D baskı yazıcı ile katmanlı yapı üretiminde uygulamanın ölçeği, mikro işlevsel parçaların basılmasından büyük ölçekli yapıların ve binaların basılmasına kadar değişmektedir. Genel olarak eklemeli imalatta üretim üç farklı faz ve dört aşamada gerçekleşmektedir. 3D baskı yazıcıda bilgisayar kontrolü altında yazdırılabilir malzeme ile yazdırma işlemi için gerekli sistem esas olarak malzeme tankı, pompalama mekanizması, baskı nozulu ve hareketli kontrol sisteminden oluşmaktadır.

İlk faz olan üretim fazında, yazdırma işlemi için gerekli harç malzemesini oluşturan malzemelerin kuru ve ıslak olarak karıştırılması aşamaları vardır. Öncelikle malzemeler

besleme tankında kuru ve ıslak olarak karıştırılıp hazır hale getirilir. İkinci fazda pompa sistemi aktif olur ve hazırlanan malzeme karışımları boru ile nozula aktarılarak pompa fazı tamamlanmış olur. Son faz olan yazıcı fazında; pompayla nozula aktarılmış olan harcın, hareketli uçtan bilgisayar ortamından yönetilen uygun noktalara ekstrüde edilmesi ile yazdırma işlemi tamamlanmış olur (Şekil 2.3) (Leal da Silva 2017).



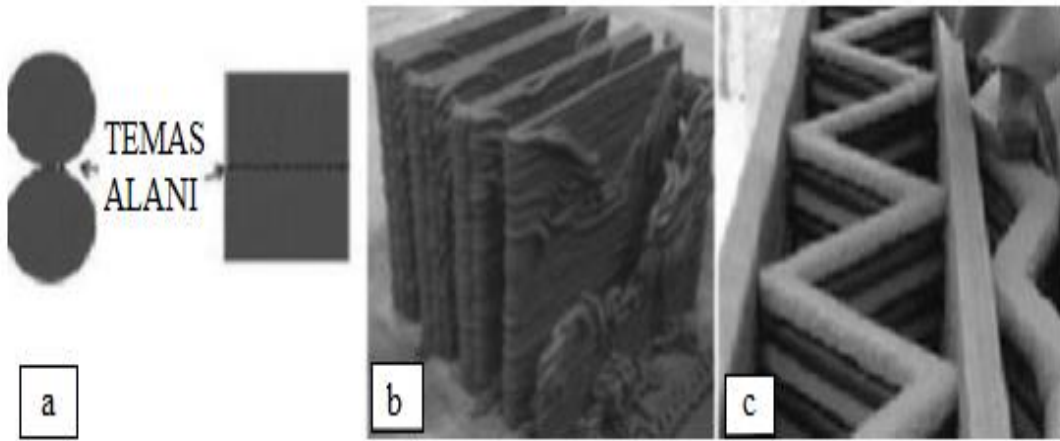
Şekil 2.3 3D baskı yazıcı otomatik yapı üretim fazlarının şematik gösterimi.

### 2.2.2 3D Yazdırılabilir Malzemelerin Optimize Karışım Esasları

3D Baskı yazıcı ile yapı üretiminde çimento esaslı harç bileşenlerinin reolojik özellikleri (statik akma gerilimi, dinamik akma gerilimi) arasındaki korelasyonu formüle ederek statik akma gerilimi ile dinamik akma gerilimi arasında bir denge kurmak için optimum malzeme bileşimini belirlemek gerekmektedir (Lloret vd. 2015).

Katmanlı üretimde kullanılan çimento esaslı harçları yüksek akışkanlıkta tutmak için dinamik akma gerilimi yeterince düşük olmalıdır. Çünkü 3D baskı yazıcı için oldukça önemli olan çimento esaslı harcın pompalanabilirliği ile dinamik akma gerilimi arasında ters orantı bulunmaktadır. Statik akma gerilimi ise, çimento esaslı harcın 3D baskı sürecinde inşa edilebilirliği ile doğru orantılı olup karakterize etmek için kullanılmaktadır (Lim vd. 2011).

3D yazıcıda basılan yapı elemanlarının kalite analizi yapıldığında, şu anda kullanılan beton karışımlarının ekstrüzyon teknolojisinde kullanıma uygun olmadığı görülmektedir. Karışımların optimum olmayan bileşimleri ve uygun olmayan reolojik özellikleri nedeniyle alttaki katmanların kopması, boşluk ve çatlakların yayılması, düşük çatlama direnci, yüksek büzülme şekil değiştirmeleri meydana gelmektedir. Tüm bunlar 3D yazıcıda yazdırılan yapı elemanlarının geometrik boyutlarının bozulmasına ve bunun sonucunda fiziksel ve mekanik özelliklerinin azalmasına yol açmaktadır.



**Şekil 2.4** Nozul deliğinin şekline bağlı olarak katmanlar arası boşluk (a: temas alanı; b: daire kesitli uç harç katmanı; c: dikdörtgen kesitli uç harç katmanı).

3D baskı beton için gereken özelliklerin geleneksel beton için olanlardan çok daha karmaşık olduğu açıkça ileri sürülmektedir. Yüksek akışkanlık ve tiksotropi gibi çatışan özellikler arasındaki optimum koşullar, kullanılan malzeme oranlarının çok hassas olarak ayarlanmasının gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Yüksek akışkanlık ve hızlı sertleşme davranışı gibi istenen özellikleri deneme yanılma deneyleri ile elde etmek önemli bir zaman ve çaba gerektirmektedir. Yine benzer bir şekilde geleneksel yapı üretiminde kullanılan kalıplama işlemi beton karışımının bileşimiyle birlikte kalıplanmış yapı elemanlarının kalitesini doğrudan etkilemektedir (Navarrete vd, 2020).

3D baskı yazıcılarda ekstrüzyon tekniği ile yapı üretiminde, beton karışımının kürlenmesine katkı sağlayan kalıplamanın ve ekstrüzyonundan sonra sıkıştırılmasını amaçlayan bir teknolojik aşamanın olmaması yazıcıya uygun karışım tasarımını da zorunlu kılmaktadır 3D baskı yazıcıda kullanılacak çimento esaslı harcın ince taneli

granülometrik özelliklere sahip olması durumunda yazdırılan katmanlardaki çökmenin önüne geçilebilmektedir (Alkhalidi ve Hatuqay 2020). Ayrıca ince taneli viskozitesi düşük harç karışımında yazdırma işleminin istenilen sürede tamamlanabilmesi için çıkış ucuna hızlandırıcı kimyasal katkı ilave edilmesiyle pompalama kolaylaştırılabilmektedir (Mechtcherine vd. 2014).

3D baskı yazıcıdaki malzemenin pompalanabilecek kadar yumuşak olması, yazdırılan katmanlarda şekil değiştirme olmayacak kadar da çıkış ucunda sert olması istenmektedir. Katmanlı üretimde yazdırılan katmanın bir sonraki yazdırılacak katmanı şekil değiştirmeden taşıyabilmesi ve art arda katmanlar eklendiğinde katmanlarda çok fazla şekil bozukluğunun olmaması için harcın hızla sertleşmesi gerekmektedir. Geleneksel beton yapımında, beton yapı elemanlarına kalıpta yerleştirildiği ve desteklendiği için bu bir sorun oluşturmamaktadır. Ancak 3D baskı yazıcı ile üretim kalıpsız olduğundan, basılan harç katmanının kendini destekleyebileceği karışım tasarımı kaçınılmaz olmaktadır (Şekil 2.4) (Kazemian vd. 2017).

Beton malzeme özelliklerinin ayarlanmasının dışında yapısal inşa edilebilirliği arttırmanın basit bir yolu da nozul tipini değiştirmektir. Çünkü nozul tipi harç temas alanını doğrudan etkilemektedir (Duballet vd. 2017). Dairesel bir nozul deliğinde iki katman arasındaki temas alanı dikdörtgen veya kare bir delikle karşılaştırıldığında daha az olmaktadır. Dolayısıyla dikdörtgen nozuldan yazdırılan elemanlar daha kalıcı bir şekilde üretilmektedir.

3D baskı beton harç dayanımında su/çimento oranı en önemli faktör olmakla birlikte kütleme, ara katman bağlantılarına göre deney yönü, lif ilave edilmesi durumunda lif yönelimi de oldukça etkilidir. 3D baskı yapı üretiminde baskı yönünün ve baskı süresinin, basılı nesnelerin toplam taşıma kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu varsayılmaktadır (Le vd. 2012, Schuldt vd. 2021).

Sun vd. (2020), sodyum karboksimetil nişastası ve hidromagnezit tohumları katkı olarak kullandığı çimento esaslı karışımı (CMS) 3D baskı yazıcıda yazdırmışlardır. Basılı katmanların gözenekliliği CMS dozajındaki artışla birlikte artmıştır. Bu durumun zayıf iç

yapılara sebep olarak daha düşük dayanıma yol açtığını belirtmişlerdir. Öte yandan, %1-2 oranında hidromagnezit tohumlarının eklenmesi durumunda cüruf bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerinde küçük bir etki gösterdiği sonucuna da ulaşmışlardır.

Panda vd. (2018), uçucu kül, silika dumanı (SF) ve cürufun ikame edildiği jeopolimer bazlı çimento esaslı karışımlar (SCM) ile 3D baskı yapı oluşturma hızı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. %10 cürufun, karıştırmadan 10-30 dakika sonra akma dayanımı gelişimini iyileştirme açısından %10 SF'den daha iyi etki gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, Ca içeren SCM'lerin malzemenin hızlı sertleşmesine neden olması olarak açıklanmıştır. Ayrıca, hem SF hem de cürufun 3D baskı yazıcıda yazdırılabilir harcın tiksotropisini desteklediği belirtilmiştir.

Beton harcın pompalanabilirliğini kaybetmeden katmanın yazdırılması ve sonraki katmanı oluşturacak harç karışımının basıma hazır duruma getirilmesi için gereken zaman ayarları yapılmalıdır. Uygun zaman aralığı seçimi, taze beton tabakalarındaki bağlayıcıların hidrasyonunu veya kimyasal reaksiyonunu tamamlamasına ve iki tabaka arasındaki bağı kuvvetlendiren bir kristal yapının oluşmasına yol açabilir.

Katmanlar arası zaman aralığının artmasıyla da, alt katman kümelendikçe, sertleştikçe kimyasal bağın azaldığı varsayılır. Ek olarak, diferansiyel katmanlar arası kuruma büzülmesi oluşabilir ve nihai katmanlar arası bağ kuvvetini önemli ölçüde etkiler.

3D baskı yapı üretim tekniği yeni bir teknoloji olduğu için uygulamada kullanılacak standartlar henüz yapılmamıştır. Ancak beton harçlar için hazırlanmış standartlar olmasa da, geleneksel üretim yöntemine uygulanan deneyler numunelere uygulanarak yazdırılabilir harç için en uygun karışım optimize edilmeye çalışılmaktadır.

Bununla birlikte, 3D baskı yazıcı için gerekli harçların optimum karışım tasarımının yapılması tek başına yeterli olmamaktadır. Optimize edilmiş karışım tasarımının faydalarını elde etmek için, kütleme tekniğinin aktif edilmesi ve basılma sırasında yakın takiple tam kontrolün sağlanması gerekmektedir (Çizelge 2.1) (Uygunoğlu ve Özgüven 2019).

**Çizelge 2.1.** 3D baskı yazıcıda kullanılacak harç karışım hedefleri.

En yüksek basınç dayanımı	En yüksek işlenebilirlik
Sistemde akışkanlığı en üst düzeye çıkarmak	Harcın yazdırılması sırasında yapışmanın en üst düzeyde tutulması
Beton hız seviyesinin ayarlanması	Uygun ayar oranının korunarak sonraki katmanlarla bağlanmasını sağlamak

### 2.3 Yapıların Kullanımı Sırasındaki Enerji Korunumu

Geleneksel kaynakların tükenmesi ve giderek artan enerji talebi küresel iklim krizi boyutlarının gün geçtikçe artmasına neden olmaktadır. Enerji taleplerinin karşılanmasında geleneksel kaynaklar düşük maliyetli bir yöntem olması nedeniyle dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Endüstrilerin ve şehirlerin hızlı büyümesi nedeniyle fosil yakıtların kullanımında bir artış olmuş ve bu da hava ve su kirliliği, habitat bozulması ve iklim değişikliği gibi olumsuz sonuçları beraberinde getirmiştir (Sinsel vd. 2020).

Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre inşaat sektörü, toplam enerji tüketiminin %30'undan fazlasını ve toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarına dolaylı bina emisyonlarında dahil edildiğinde CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. Bu olumsuzlukların azaltılabilmesi için rüzgar, güneş, biyokütle, jeotermal gibi yeşil ve yenilenebilir enerji seçeneklerinin araştırılması bir zorunluluk olmuştur (Tao ve He 2018). İnşaat sektörü de yeşil enerji kaynaklarını benimseyerek, enerji sistemi verimliliğini artırmak, sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştırmak için yenilikçi yaklaşımlar kullanmaya yönelmiştir (Jouhara vd. 2020).

İnşaat sektöründeki enerji tüketiminin ve sera gazı emisyonunun azalması için ülkeler bazı çalışmalar yapmaktadırlar. Avrupa'da devletler 2020 yılına kadar yeni binaların "neredeyse sıfır" enerji tüketimini hedefleyen ve 2020'den önce sera gazı emisyonlarını %20'nin altına çekmeye çalışan yönetmelikler düzenlemişlerdir (Yang vd. 2014). Yaşam döngüsü tahminleri ve enerji talepleri akıllı binalardaki yönetim uygulamalarının yanı

sıra ısı enerji depolama için de rapor edilmiştir (Kneifel 2010, Ramesh vd. 2010). Yapılan araştırmalar binalarda enerji tasarrufu için iki yöntem üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlardan biri binalarda ısı yalıtımı sağlamak, ikincisi ise ısı eylemsizlik (atalet) sağlamaktır. Isıl enerji depolama, binalarda ısı atalet sağlayarak enerji verimliliğinin iyileştirilmesi için binalarda uygulanan etkili bir yöntemdir (Huang vd. 2014, Huberman ve Pearlmutter 2008).

Isıl enerji depolamanın uygulanması, yenilenebilir kaynaklarla enerji üretimi uygulamalarının genel verimliliğini ve dağıtılabiliğini arttırmaktadır (Wahid vd. 2017). Depolama ortamındaki iç enerjinin değişiminden yararlanan ısı enerji depolama, termokimyasal, duyulur ve gizli ısı depolama olarak sınıflandırılabilir ( Yun vd. 2019). Gizli ısı depolama, duyulur ısı ile karşılaştırıldığında daha verimli bir yöntemdir ve ısının depolanması ve serbest bırakılması arasında daha küçük bir sıcaklık farkı ile çok daha yüksek bir enerji yoğunluğu sağlamaktadır (Christopher vd. 2021, Zubair vd. 2018).

Gizli ısı ısı enerji depolama yöntemini kullanarak enerji verimli akıllı binalar inşa etmek için yenilikçi malzemelerin termodinamik açıdan işlevsel ve verimli olması gerekmektedir (Vats ve Vaish 2019). Ayrıca bunlar, sistemi ortamından ayırma ve sistem ile çevre arasında istenen sıcaklık farkının korunmasına yardımcı olma özelliğine sahip olmalıdır. Aynı zamanda ısı akışının yönünü kontrol edebilme yeteneklerinin önemi de göz ardı edilmemelidir (Tatsidjodoung vd. 2013).

Akıllı ve yenilikçi malzemelerle uygulanan yöntemlerden biri de faz değiştiren malzeme kullanarak gizli ısı ısı enerji depolamasını gerçekleştirmektir (Veerakumar ve Sreekumar 2016). Genel olarak FDM'ler, belirli bir sıcaklık seviyesinde katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçiş yaptıkları faz değişimine göre ayırt edilebilmektedir. Bir durumdan diğerine belirli bir faz dönüşümü geçirmenin bir sonucu olarak, ısı enerjisi emme/depolama veya serbest bırakma yeteneklerine ilişkin fiziksel dönüşümlerine göre de sınıflandırılabilirler (Marani ve Nehdi 2019, Nayak vd. 2019). Belirli bir amaç için seçilen FDM'nin, verilen uygulamanın sıcaklık aralığı içinde bir faz değişim sıcaklığına sahip olması kritik öneme sahiptir (Berardi ve Gallardo 2019). Aksi takdirde faz değiştiren malzemelerde geleneksel duyulur ısı depolama malzemelerine benzer bir davranış göstereceklerdir.

Faz değiştiren malzemeler teorik olarak, kaya, duvar ve su gibi geleneksel duyulur ısı depolama malzemelerine göre birim hacim başına 5-14 kat daha fazla ısı enerjisi depolayabilirler ve yüksek depolama yoğunlukları, kompakt bir enerji depolama sisteminin elde edilmesini sağlar (Sharma vd. 2009, Kasaeian vd. 2017). Binalarda faz değiştiren malzeme kullanılması, bina kabuğundan aktarılan ısıyı azaltarak ısıtma ve soğutma yüklerini azaltacak, böylece sıcaklık dalgalanmaları azaltılarak iç ortam sıcaklığı bina sakinlerinin ısı konfor aralığında tutulacaktır. Ancak tüm yenilikçi teknolojilerde olduğu gibi faz değiştiren malzeme uygulamasında da bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır (Huo vd. 2018).

Faz değiştiren malzemelerin faz geçiş süreci sırasında oluşan sızıntı sorunu ve doğası gereği düşük ısı iletkenlikleri, faz değiştiren malzemenin enerjiyi emme/depolama ve serbest bırakma hızının son derece yavaş olmasına sebep olmaktadır. Bu durum faz değiştiren malzeme kullanımını çoğu yapı malzemesi ve uygulama için uygunsuz hale getirmektedir (Umair vd. 2019). Bu sorunların üstesinden gelmek için mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler geliştirilmiştir (Rathore ve Shukla 2019).

Mikrokapsülleme teknolojisi, faz değiştiren malzemenin sürekli bir polimerik malzeme ile kapsüllenmesini içerirken, şekil stabilizasyon teknolojisinde seçilen faz değiştiren malzemeler, destekleyici bir malzemenin içine gömülmektedir. Kullanılan kabuk malzeme uygulandığı yapı malzemesiyle uyumlu olmalı ve kabuk malzemesi bulunduğu ortam içerisinde hiçbir kimyasal etkileşim göstermemelidir (Ng vd. 2017, Jamekhorshid vd. 2014). Faz değiştiren malzemelerin mikrokapsllenmesi ile birlikte hem enerji depolama kabiliyeti artmış hem de beton gibi kompozit malzemelere daha uyumlu çalışabilir duruma gelmiştir.

Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemelerin boyutu mikron ölçekli olduğu için betona ilave edilen katkı malzemeleri gibi davranarak beton dayanım ve dayanıklılığını arttırıcı yönde çalışabilmektedir (Zhou vd. 2012, Souayfane vd. 2016). Ancak bir ısı depolama sistemi tasarımı sadece sistemin ısı performansıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda kapsüllenerek kullanılacak malzemelerin maliyeti, güvenirliliği ve sürdürülebilirliğinin de dikkate alınması gerekmektedir..

## 2.3.1 Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar

### 2.3.1.1 3D Baskı Yazıcılarla Otomatik Yapı Üretimi İle İlgili Çalışmalar

Eklemeli üretim teknolojileri, inşaat sektörü de dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde giderek daha yaygın kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat sektörünü etkisini alan 3D baskı yazıcı, akademik araştırmalardaki deneysel çalışmalardan büyük ölçekli toplu inşaata geçiş yapmaktadır (Siemasz vd. 2020). Yapılan çalışmalarda daha çok 3D yazıcıların tüm bina ve yapıların basılmasında uygulanabilirliği üzerine yoğunlaşmaktadır (Werner vd. 2021).

Yapı elemanlarındaki farklı geometrilerin imalatındaki esneklik ve otomasyon yeteneği nedeniyle modüller, 3D baskı yazıcı kullanılarak seri üretim yapılabilmektedir (Baduge vd. 2021). Öte yandan, 3D baskı yazıcının inşaat sektörüne dahil edilmesi pompalama, ekstrüzyon, katman katman işleme ve geçici destek eksikliği nedeniyle yazdırılması ile ilgili zorlukları da beraberinde getirmektedir.

3D baskı yazıcının pompalanabilirlik, ekstrüzyon ve üretilebilirliği karşılamaya yönelik reoloji gereksinimleri işlenebilirlik ve sıkıştırma üzerindeki kısıtlamaları ortadan kaldıracak şekilde belirlenmelidir. Ayrıca, daha yüksek dayanım ve hızlı sertleşme özelliklerine duyulan ihtiyacı dikkate alınarak, yüksek performanslı yazdırılabilir çimentolu malzemelerin tanımlanması gerekmektedir (Izadgoshasb vd. 2021).

Puzotava vd. (2022), 3D baskı teknolojilerine ve bunların temel farklılıklarına genel bir bakış sunmanın yanı sıra, laboratuvar ölçekli inşaat baskısından toplu büyük ölçekli baskıya geçiş sırasında ortaya çıkabilecek olası sorunlarla birlikte kompozit baskı gereksinimlerine de değinmişlerdir. İnşaat için eklemeli üretim teknolojilerini kullanan robotik kollu yazıcılar, portal tipi yazıcılar ve portal 3D yazıcılar olmak üzere üç tip yazıcı ele alınmıştır. Portal yazıcılarda bulunan bazı parçaların, karmaşık yapı elemanlarından oluşan binalar inşa etme kabiliyetine sahip olması nedeniyle büyük ölçekli baskı için daha uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca tüm yazıcıların, büyük ölçekli uygulamalar için 3 boyutlu baskı malzemesinin sağlamlığı ve ekonomik fizibilitesi açısından gereklilik olan iri agrega içeren betonla baskı yapma yeteneğine sahip olmadıkları sonucuna varılmıştır.

3D baskı yazıcılarla otomatik yapı üretimi üç ana faz üzerinde şekillenmiş olmakla birlikte, mimari tasarım ve uygulama projesine göre baskı işlemlerinde farklılıklar olabilmektedir. Malaeb vd. (2019), 9 mm nozulu olan ve dijital olarak kontrol edilen baskı işlemi kullanırlarken, 3D baskı yazıcı için tasarladıkları arkasında iki tane mala ile 2 cm çapında bir ağızlık olan bir makineyi, üç eksenli bir düzlemde hareket ettirmek için kullanmışlardır. Aynı zamanda Gosselin vd. (2016), 6 eksenli robot koluna monte edilmiş bir baskı kafasından oluşan baskı makinesiyle çalışmalarını yürütmüşlerdir.

Jo vd (2020), 1×1×1 m yatak boyutuna sahip beton yapıların laboratuvar deneyleri için prototip 3D baskı yazıcı geliştirerek işlevselliğini ve 3D baskı yazıcı için optimum malzeme özelliklerini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar için PVA liflerinden oluşan üç farklı tipte karışım kullanmışlardır. Laboratuvar deneyleri %0.1 PVA lifi eklemenin büzülme çatlağını önleyerek baskı kalitesini arttırdığını doğrulamıştır. Deneysel çalışmalar sonrasında laboratuvar tipi 3D baskı yazıcı kullanılarak beton yapının basılabilirliğini göstermişlerdir.

Hambach vd (2019), 3D baskı yazıcıda üretilmiş binalarda çelik kullanımını azaltmak veya ortadan kaldırmak için 3D baskı yazıcıda kullanılan harca lifler ekleyerek kendi kendini güçlendirme özelliğini kazandırmaya çalışmışlardır. 3D baskı yazıcıda kullanılacak harca 3-6 mm boyutlarında karbon, cam ve bazalt lifler eklenmiş ve sonrasında mekanik özelliklerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. Çalışma sonucunda %1 oranında karbon lifi eklemenin çimento harcının eğilme dayanımını %174.5 oranında arttırabileceğini, ancak basınç dayanımını önemli ölçüde değiştirmedeğini belirtmişlerdir.

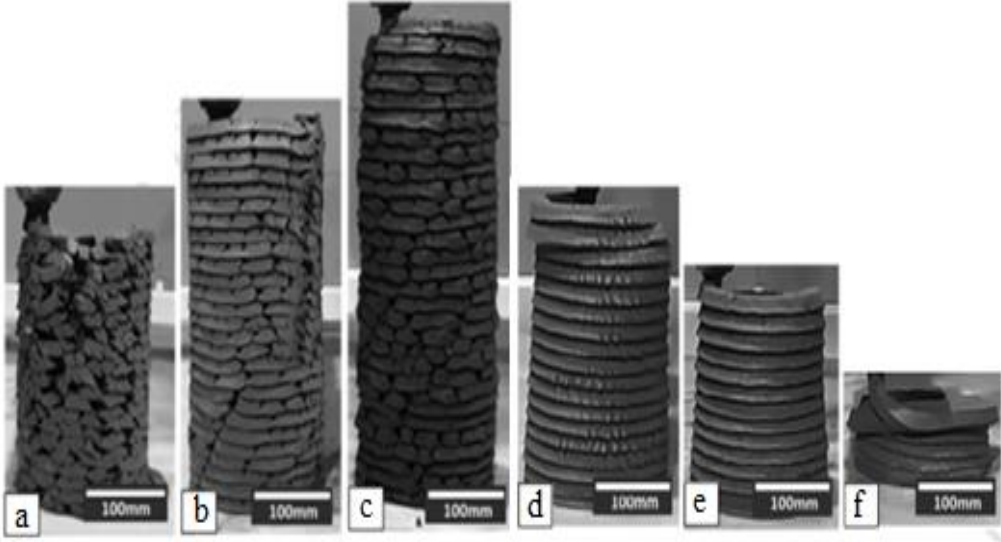
Yeon vd (2018), beton yapılarda oluşan hasarı onarmak için 3D baskı teknolojisini uygulamaya çalışmışlardır. Öncelikle, hasarlı alanı birden fazla açıdan fotoğraflayarak görüntüleri bir yazılım programı yardımıyla 3 boyutlu modele dönüştürerek 3D baskı yazıcıda beton bir yama oluşturmuşlardır. Devamında betondaki hasarlı bölüme 3D baskı beton yamaları özel bir karışımla yapıştırmışlardır. Çalışma sonucunda hasarlı bir yapıyı başarılı bir şekilde onararak bu yöntemin restorasyon ve yeniden inşa için uygulanabilirliğini doğrulamışlardır.

Jayathilakage vd. (2020), 3D baskı yazdırma işleminde pompalama, karıştırma, ekstrüzyon ve sıkıştırma için düşük akma gerilimine ve plastik viskoziteye sahip olunması gerektiğini vurgulamışlardır. Bununla birlikte, yüksek akma gerilimi daha yüksek kayma dayanımına yol açtığından, inşa edilebilirlik dikkate alınarak 3D baskı için yüksek akma gerilimi ve plastik viskozite tercih edilmiştir. Plastik viskozitenin düşürülmesiyle yüksek kesme hızında daha yüksek işlenebilirlik elde edilebilirken, sıfır veya düşük kesme hızlarında yüksek akma gerilimi ve viskoziteye sahip olunarak daha düşük çökmeli sert karışım elde edilebileceği sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte, taze harç işlenebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesi genel olarak akış özelliklerine dayandırılmıştır (Figueiredo vd. 2019). Ayrıca, yazdırılabilir harçların tasarımı geleneksel betonlardan farklı olduğu için henüz tam olarak bir işlenebilirlik ölçütü belirlenmemiştir.

Rahul ve Santhanam (2020) deneysel sonuçlarından basılabilir bir beton karışımının ekstrüde edilebilirliğinin, ince agrega ve bağlayıcı içeriğinin artmasıyla ve iri agrega içeriğinin azalmasıyla arttığını, iri agrega içeriğindeki büyük artışın ise betonun ekstrüde edilebilirliğini azalttığını elde etmişlerdir. Harç, ekstrüzyondan akışı sırasında aşırı baskı kullanmadan ve kopmalar ve/veya boşluk oluşmadan baskı sisteminden geçebilecek kadar işlenebilir olmalıdır. Ayrıca yazdırıldıktan sonra üzerine gelen katmanları taşıyabilmeli ve katman sayısı istenilen kadar yükseltilebilmelidir (Uygunoğlu ve Özgüven 2021).

Alhumayani vd. (2020) büyük ölçekli 3D baskı inşaatının ve geleneksel inşaatın çevresel etkisini değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında beton ve kerpiç olmak üzere iki farklı malzeme türü kullanmışlardır. Yaşam döngüsüne etkisi değerlendirildiğinde kerpiç bazlı duvarların betondan daha az olumsuz çevresel etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, 3D baskı betonun genel çevresel etkileri, küresel ısınma ve ince tanecik oluşumu için daha yüksek potansiyele sahip olması nedeniyle 3D baskı kerpiçten daha fazla olmaktadır. Bu çalışmada ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının, sırasıyla 3D baskı kerpiç ve 3D baskı betonun gelecekteki yapıların üretiminde potansiyellerini arttırabileceğini göstermektedir. Ayrıca NASA'nın Ay ve Mars'ta 3D baskı ile yapı üretimi önerisi de potansiyelin artacağı fikrini desteklemektedir (Neves vd. 2020).

Tay vd. (2019) farklı bileşenlerle 3D yazıcı için harçlar tasarlayarak, bu harçların yazdırılabilir özelliklerini araştırmışlardır. Katman sayısını, yazdırılan harcın işlenebilirliğini ve harçların yayılma tablasında yayılma değerlerini belirlemişlerdir. 3D yazdırılabilir harcın en iyi kıvama sahip olabilmesi için yayılma değerinin 130-210 mm arasında değerler alması önerilmiştir. Bazı harç tasarımlarında katman sayısı arttırılabilmişken, bu harçların yazdırılmasında kesintiler ve boşluklar oluştuğu belirtilmiştir (Resim 2.7). Dolayısıyla, tasarlanan harçların sadece birbiri üzerinde durması değil, aynı zamanda kesinti olmadan yazdırılabilmesi gereklidir. Literatürde bu konuda yapılmış çok az sayıda çalışma bulunmaktadır.



**Resim 2.7** 3D yazıcıyla ekstrüde edilmiş harçların katman sayıları (a: 20; b: 27; c: 30; d:18; e:13; f: 6).

### 2.3.1.2 Faz Değiştiren Malzeme Kullanımı İle İlgili Çalışmalar

Gelişmiş sürdürülebilirlik ve enerji verimli artan talepleri karşılamak için modern altyapılara gereksinim duyulmaktadır. Bu durum akıllı ve yenilikçi malzemelerin tasarım, üretim ve karakterizasyon tekniklerinde yeni araştırmalar yapılmasını sağlamaktadır (Akeiber vd. 2016). Akıllı malzemeler, buldukları ortamda çevresel bir değişiklik olduğunda arzu edilen özellikleri üreten insan yapımı veya doğal malzemelerdir. Yapılan araştırmalar sonrasında herhangi bir dış etkenle özelliklerini belirli bir şekilde değiştirebilen malzemeler akıllı malzeme olarak tanımlanmıştır (Aher vd. 2015).

Sürdürülebilir ve enerji verimli bina inşaatında enerji tasarrufu açısından umut verici bir potansiyele sahip akıllı malzemelerden biri olan faz değıştiren malzemeler yalnızca yapı elemanlarının enerji verimliliğini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda inşaat malzemelerinin bazı mekanik ve dayanıklılık özelliklerini de geliştirebilir.

Fernandes vd. (2014) yaptıkları çalışmada mikrokapsüllenmiş faz değıştiren malzeme kullanıldığında çimento hidrasyon işlemi sırasında beton elemanlardaki sıcaklık değışimlerini ve ısı oluşumunu inceleyerek, çatlak direncini ve betonun ısıl büzülmesini iyileştirmeyi araştırmışlardır. Çimento esaslı harçlara mikrokapsüllenmiş FDM eklenmesinin, özellikle ortam sıcaklığı faz değışimi sıcaklığından düşük olduğunda, ısı emilimi ve salınımının en uygun şekilde kullanılması için sıcaklık artış hızını ve soğuma hızını azalttığı belirtilmiştir. Mekanik özellikler bağlamında, FDM katkı oranı artışı ile beraber dayanımda azalmalara neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Sharifi vd. (2018), FDM'leri içeren beton kaplamalarda donma-çözülme döngüleri veya sıcaklık gradyanlarından kaynaklanan hasarı azaltmak için inceleme yapmışlardır. Ancak sıvı haldeki FDM'lerin beton gibi yapı malzemelerine dahil edilirken sızıntılı olması, çimento hidrasyonunu ve betonun mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle araştırmacılar, erimiş haldeki FDM'lerin sızıntısını önlemek için mikrokapsülleme yöntemi geliştirmişlerdir (Soares vd. 2013, Cui vd. 2017).

Mikrokapsülleme işlemi ile faz değıştiren malzemenin etrafında koruyucu bir kabuk oluşturulmaktadır. Bu kabuk, erimiş FDM'nin sızıntısını ve yabancı maddelerin FDM'ye girmesini önlemeye yardımcı olmaktadır. FDM'lerin sızıntısına karşı koruyucu etkisine ek olarak, erime/donma döngülerinde daha verimli performans göstermeleri sağlanabilmektedir. Ayrıca mikrokapsülleme, yüksek bir ısı transfer alanına yol açmaktadır (Shao vd. 2023). Binaların ısıl konforunu iyileştirmek için mikrokapsüllü faz değıştiren malzemelerin çimento esaslı malzemelere dahil edilmesini araştıran Thiele vd.(2015), Los Angeles'taki ortalama bir aile evinin dış beton duvarlarına mikrokapsüllenmiş FDM eklenmesiyle elde edilen yıllık enerji tasarrufunu incelemiş ve toplamda %10 mikrokapsüllü FDM ile yıllık soğutma yükünde %53'lük bir azalmanın elde edilebileceğini belirlemişlerdir.

Hunger vd. (2009), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) deneyiyle ince agreganın yerine ikame edilen çeşitli miktarlarda FDM'nin beton karışımların ısı kütlesinde bir artış yaptığını gözlemlemişlerdir. Ağırlıkça %5 FDM ilavesi ile referans betona göre %12 enerji tasarrufu sağlanmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonrası FDM ile modifiye edilmiş çimentolu malzemelerin ısı konfor açısından uygun olduğu kanıtlanırken, çimento esaslı malzemelere ağırlıkça %1, %3 ve %5 FDM ilavesinin beton karışımlarının mekanik dayanımında sırasıyla %30, %52 ve %70 oranında azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Djamai vd. (2019), mikrokapsüllenmiş FDM eklenmesinin yapı malzemelerinin mekanik performansını potansiyel olarak tehlikeye atabileceğini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları araştırmada farklı miktarlarda mikrokapsüllenmiş FDM (ağırlıkça %5, %10 ve %15) ekleyerek, modifiye edilmiş çeşitli harçlar üzerinde mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, mikrokapsüllenmiş FDM harç kompozitlerinin mekanik performansındaki bozulmanın, yalnızca zayıf FDM kalıntılarından değil kompozitlerin hidrasyon derecesindeki bir azalmadan kaynaklandığını göstermiştir.

Mikrokapsüllenmiş FDM'ler çoğunlukla çimentolu kompozitlerde ve belirli bir oranda kumun yerine doğrudan beton karıştırma işleminde kullanılmaktadır. Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin çimentolu kompozitlere dahil edilmesi sonucunda ısı iletkenlik, ısı kapasitesi ve basınç dayanımı gibi hem ısı hem de mekanik özellikler üzerindeki etkileri gözlemlenebilmektedir (Ismail vd. 2023).

Jayalath vd. (2016), bu etkileri göstermek için mikrokapsüllenmiş FDM'yi ince agregaların bir parçası olarak harç ve beton karışımlara ilave ederek gelişmiş ısı performans açısından değerlendirmişlerdir. Farklı oranlarda mikrokapsüllenmiş FDM içeren numuneler, kalorimetri, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetri (TGA), taramalı elektron mikroskobu (SEM), basınç dayanımı ve ısı iletkenlik deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda FDM parçacıklarının çimento hidrasyonunu hızlandırdığı görülmüştür. Bununla birlikte, ince agregalar FDM ile değiştirildiğinde 28 günlük basınç dayanımı azalmıştır. Ayrıca mikrokapsüllenmiş FDM'nin, çimentolu matrislerde bozulmadan kaldığı ve karışımların ısı iletkenliğini azaltmanın yanı sıra ısı kapasitesini artırmaya da önemli ölçüde katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir.

Wei vd. (2017), mikrokapsüllenmiş faz değıştiren malzeme içeren çimento lu kompozitlerin dayanıklılığı üzerine araştırma yapmışlardır. İlk olarak mikrokapsüllenmiş faz değıştiren malzeme ilave edilmesinin kompozitlerin su emme ve kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mikrokapsüllenmiş FDM'lerin nem hareketini engelleyen ve emici olmayan yapısından dolayı kompozitlerin su emilim hızı azalmıştır. Sonuçlar, faz değıştiren malzemelerin çimento esaslı kompozitler üzerinde hiçbir zararlı etkisi olmadığını ve hatta belirli durumlarda dayanıklılığını biraz artırabileceğini göstermektedir.

Beton dayanıklılığının azalmasında etkili olan ısıl çatlama, hidrasyon işlemi sırasında oluşan aşırı ısının bir sonucudur ve bu da betonun çatlmasına neden olur. Faz değıştiren malzemeler ısı enerjisini depolayarak betondaki bu çatlakları azaltmak için kullanılabilirler.

Dakhli vd. (2020) betona %30'a kadar faz değıştiren malzeme ilave ederek bunun gözeneklilik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Faz değıştiren malzeme içeriğinin artmasıyla birlikte karışımların gözenekliliğinin arttığı görülmüştür. Gözeneklilikteki artış, boşlukların oluşmasına ve betondaki çatlakların artmasına bunun sonucunda zararlı malzemelerin betona nüfuz etmesine sebep olmuştur.

Illampas vd. (2021), deneysel çalışmalarında kullanacakları çimento bazlı tamir harç numuneleri için, geçiş sıcaklığı 37 °C olan farklı oranlarda (%0, %5, %10 ve %20) mikrokapsüllenmiş faz değıştiren malzeme kullanmışlardır. Çalışma sonucunda harçlardaki yüksek faz değıştiren malzeme içeriğinin, gözeneklilikte artışa ve agrega parçacıklarıyla karşılaştırıldığında, faz değıştiren malzeme mikrokapsüllerinin daha düşük dayanıma yol açtığı görülmektedir. Bununla birlikte, faz değıştiren malzeme katkı harçların ısıl performansı iyileştirerek ısı kapasitesini arttırdığı ve sıcaklık piklerinin zayıflamasına katkıda bulunduğu belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı 3D baskı yazıcılarda kullanılacak olan çimento esaslı harçlara faz değıştiren malzeme ilave ederek harçların fiziksel, mekanik ve ısıl özellikleri üzerinde etkisini belirlemektir. Farklı tip faz değıştiren malzeme katkı harçların taze halde

çökme-yayılmaması ve viskoziteleri belirlenirken, sertleşmiş harçlarda ultrases geçiş hızı, elektriksel özdirenç, basınç ve eğilme dayanımı değişimleri incelenmiştir.

Sonrasında 3D baskı yazdırma çalışmalarına mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçlarla devam edilmiştir. 3D baskı yazıcıda yazdırılan kontrol ve mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların aderans dayanımları ve ısıl özellikleri araştırılmıştır.

### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında, çimento, agrega, faz değiştiren malzeme, kimyasal katkı ve su kullanılmıştır. Deney numunelerinin üretiminde kullanılan tüm bileşenlerin laboratuvar ortamında belirlenen özellikleri aşağıda verilmiştir.

##### 3.1.1 Çimento

Yapılan deneysel çalışmalar çimento esaslı harçlar üzerinde gerçekleştirilmiş olup, bağlayıcı olarak TS EN 197-1 (2012) standardına uygun olan çimento CEM I 42.5N Portland çimento kullanılmıştır. Çimentonun özgül yüzey alanı  $3320 \text{ cm}^2/\text{g}$  olup, özgül ağırlığı 3.1'dir. Portland çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Portland çimentonun kimyasal özellikleri.

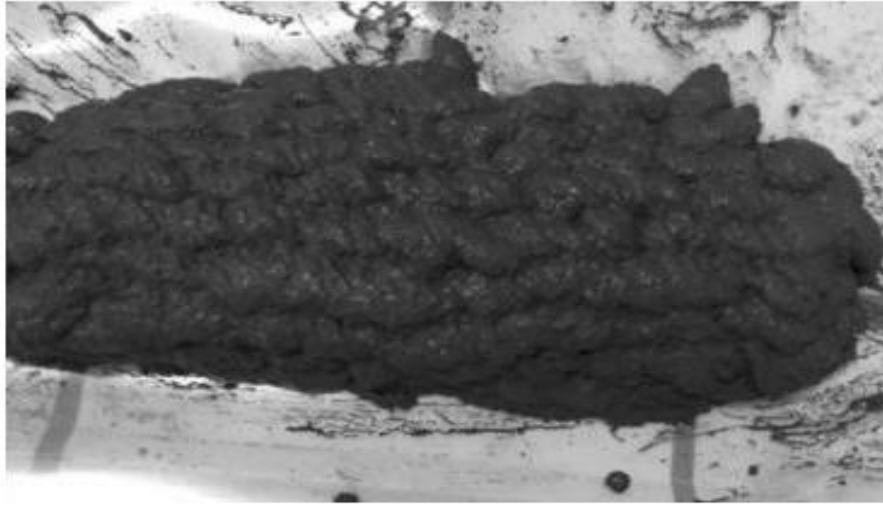
Kimyasal Analiz	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
CEM I 42.5(%)	63.56	19.3	5.57	3.46	0.86	2.96	0.8	0.13

Çizelge 3.2 Portland çimentonun fiziksel özellikleri.

Çimento Tipi	Özgül Ağırlık	İncelik ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
CEM I 42.5N	3.10	3320

### 3.1.2 Agregas

3D baskı yazıcı ucunda bulunan nozulun boyutları genellikle 20-40 mm aralığında olması nedeniyle ve agrega tane boyutunun harcın ekstrüde edilmesi sırasında bloke oluşturmaması için agrega tane boyutunun 4-6 mm'den fazla olmaması gerekmektedir (Resim 2.8). Çimento esaslı harç karışımında kullanılan agrega tipi ve büyüklüğü yapının yük taşıma dayanımına katkıda bulunduğu için de agrega tane boyutu önem taşımaktadır (Zuriguell vd. 2005). Katmanlı üretimde kullanılacak harç karışımında daha büyük boyutlu agregaların tercih edilmesi yazdırılan katmanların çökmesine ve katmanlarda kararsızlık olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca iri agregalar 3D baskı yazıcıda yazdırılan yapı elemanında düzgün bir yüzey elde edilmesine engel olmaktadır. Bu yüzden yapılan araştırmalarda katman yüzeyinde estetik bir görünüm olması için iri agrega yerine ince agrega kullanımı önerilmektedir (Mankoc vd. 2007).



**Resim 2.8** Uygun agrega seçilmemesi sonucunda nozulda oluşan bloke nedeniyle basılan katmanlarda çökme oluşması.

Daha önce yapılan araştırmalar incelendiğinde de 3D baskı yazıcıda harcın yazdırılması esnasında bloke olmaması için nozul çap oranına uygun agrega tane boyutu seçiminin yapılması gerektiği vurgulanmaktadır. Yazdırılan katmanları tıkanma olmanın önüne geçebilmek için daha küçük nozul açıklığı ve tane büyüklüğü tercih edilmesi gerektiği görülmektedir (Choi vd. 2014). Tüm bu veriler dikkate alınarak çimento esaslı harç üretimlerinde agrega olarak özgül ağırlığı 2.64 olan 0.5-400 mikron aralığında silis kumu ve 0-2 µm aralığında silis tozu kullanılmıştır.

### 3.1.3 Kimyasal Katkı

Kimyasal katkı olarak taze betonlarda işlenebilirliği sağlamak amacıyla TS EN-934-2+A1 (2014) standardına uygun MasterGlenium 51 yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı beton katkısı %0.4 oranında kullanılmıştır. MasterGlenium 51 katkısı EN 197 standardındaki tüm çimentolarla kullanılabilen sentetik-dispersiyon sıvı olup yoğunluğu 1.012 kg/dm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasal katkının özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3** MasterGlenium 51 süperakışkanlaştırıcı beton katkısı teknik özellikleri.

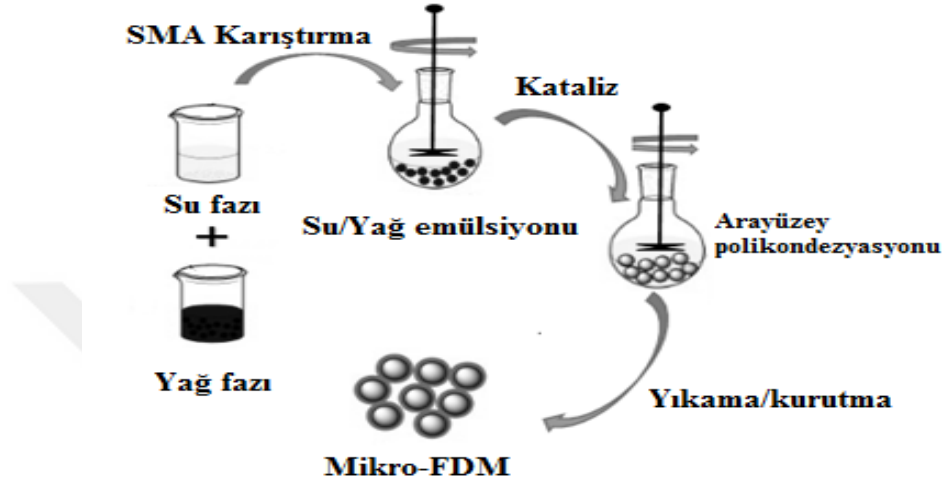
<b>Teknik özellikler</b>	
Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Kahverengi - sıvı
Özgül ağırlık (20°C'de)	1,082 – 1,142 kg/lt
pH değeri	6 – 7
Alkali içeriği (%)	≤ 3,00 (ağırlıkça)
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0.10 (ağırlıkça)

### 3.1.4 Faz Değiştiren Malzeme

Faz değiştiren malzemeler kapsülsüz ve 10 µm boyutunda mikro kapsüllenmiş halde kullanılmıştır. Kapsüllü olarak kullanılan faz değiştiren malzemeler poliüretanla mikro kapsüllenmiş haldedirler. Mikrokapsüller, arayüzey polimerizasyonu ile sentezlenmiştir. Mikrokapsül hazırlama yönteminin temeli, yağ/su emülsiyonunun arayüzey polimerizasyon reaksiyonudur. Dietilentriamin (DETA) ve toluen-2,4-diizosiyanat (TDI), yüzey aktif madde olarak NP-10 ve faz değiştirici madde olarak n-nonadekan kullanılmıştır.

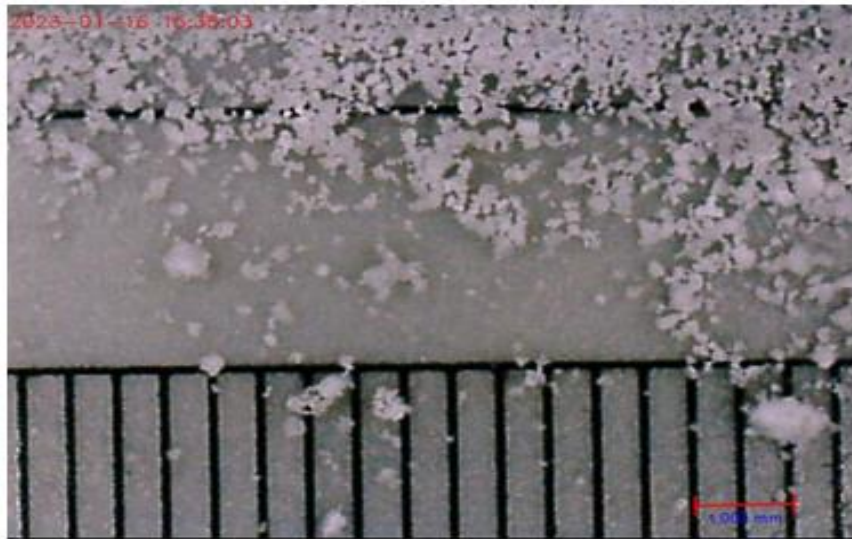
Mikrokapsül üretiminde yüzey aktif madde Tergitol (NP-10) ve saf su (sulu faz) manyetik karıştırıcıda yaklaşık 10 dakika karıştırılarak bekletilmiştir. Faz değişim malzemesi n-nonadekan, toluen-2,4-diizosiyanat (TDI) ve sikloheksan içeren yağ fazı (organik faz), karıştırılan sulu faza ilave edilmiştir. Organik faz ile sulu fazın yaklaşık 1500 rpm'de 5 dakika karıştırılmasıyla bir emülsiyon oluşturulmuştur.

Reaksiyon başlatıcı dietilentriamin (DETA) ve saf su karışımı, emülsiyona damla damla ilave edilmiş ve karışımın, reaksiyonun tamamlanması için yaklaşık 2 saat boyunca 400 rpm’de tutulması sağlanmıştır. Reaksiyon tamamlandıktan sonra sıcaklıktaki saf su ile yıkanarak 40 °C sıcaklıktaki fırında yaklaşık 3 gün kurutulmuştur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Ara yüzey polimerizasyonu yöntemiyle mikrokapsül üretimi.

Mikrokapsülün malzemenin mikroskop görüntüsü Resim 3.1’de verilmiştir. Deneysel çalışma anlatımında ve grafik gösterimlerinde mikrokapsülün malzemesi FDM ile kapsülsüz malzemesi KPSLZ ile ifade edilmiştir.



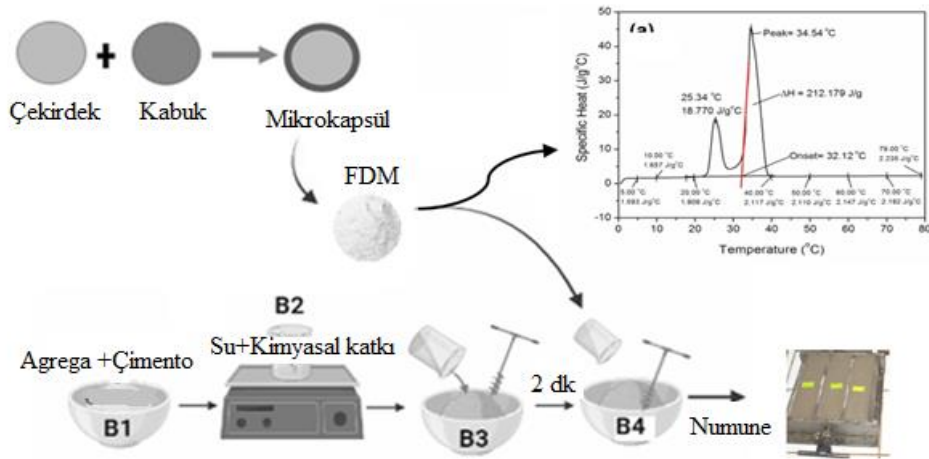
Resim 3.1 Mikrokapsülün mikroskop görüntüsü.

### 3.1.5 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Karışım Suyu

Hazırlanacak karışımın 3D baskı yazıcının nozullarından bloke olmadan sorunsuz bir şekilde ekstrüde edilebilmesi için su içerisinde yabancı maddeler olmamalıdır. Ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılacak karışım suyu için özel bir standart bulunmamaktadır. Bu nedenle çimento esaslı harçların üretiminde Afyon Kocatepe Üniversitesi şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

### 3.2 Karışımların Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılacak harç karışımların 3D yazıcıda ekstrüde edilebilirliklerini belirlemek için öncelikle 0.33, 0.35 ve 0.37 su-çimento oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Ön denemeler sonucunda ekstrüde edilebilirlik için karışım su-çimento oranı 0.37 olarak belirlendikten sonraki deneysel çalışmalar %0.4 oranında kimyasal katkı kullanılarak %0, %2.5 ve %5 oranında faz değıştiren malzeme katkı harçlar üzerinde yapılmıştır (Şekil 3.2).



**Şekil 3.2** Faz değıştiren malzeme katkı çimento esaslı harç karışımlarının elde edilmesinin şematik gösterimi.

Tüm bileşenler laboratuvar mikserinde kuru olarak karıştırıldıktan sonra karışım suyunun yaklaşık üçte ikisi karışıma ilave edilerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Karışıma ilave edilecek olan kimyasal katkı da kalan karışım suyunda çözdürülerek karışıma eklenmiş ve homojen karışım elde edildikten sonra karıştırma işlemi sonlandırılmıştır (Resim 3.2).

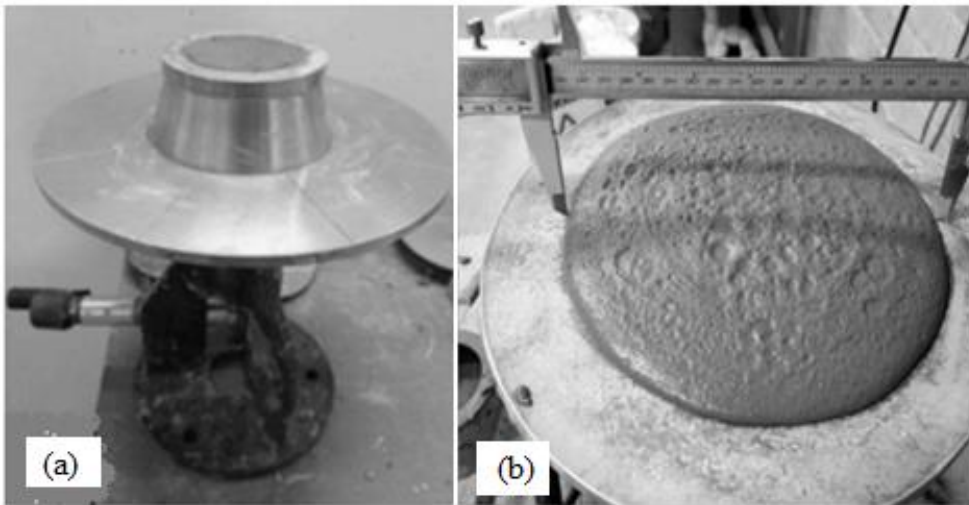


**Resim 3.2** FDM katkıli çimento esasli harç karışımların hazırlanması.

### 3.3 Taze Harçlarda Yapılan Deneyler

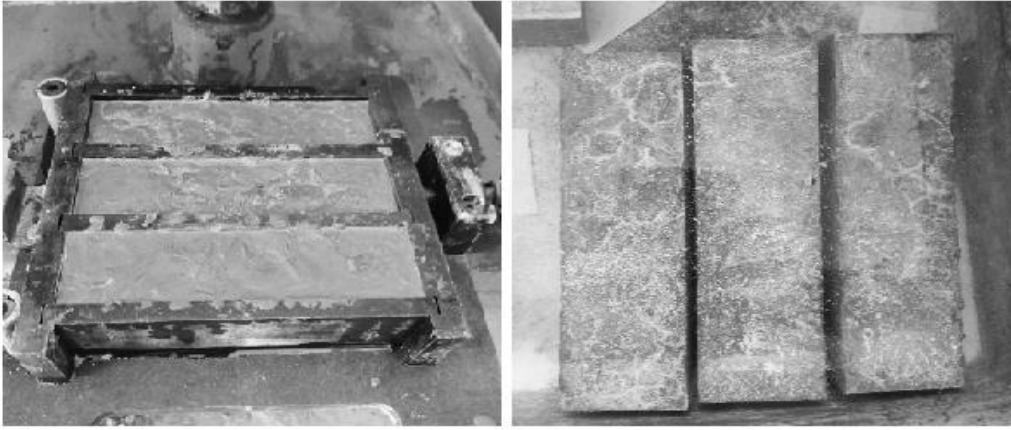
#### 3.3.1 Yayılma

Deneyisel çalışmalar için hazırlanan karışımlarda yayılma deneyi TS EN-12350-6 (2010)'ya göre yapılmaktadır. Çimento esasli harç karışımları hazırlandıktan sonra taze harçta öncelikle işlenebilirlik kontrolü amacıyla yayılma tablasında harçların yayılma özellikleri belirlenmiştir. Bunun için harçlar yayılma tablası üzerinde tablanın bir bölümü olan mini koni içerisine yerleştirilmiştir. Koni yukarı doğru çekildikten sonra, tablanın altındaki kol ile 15 vuruş yaptırılarak harca sarsma uygulanmış ve bu sarsıntıyla tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Yayılan harcın birbirine dik doğrultuda yayılma çapları ölçülerek aritmetik ortalaması alınmıştır (Resim 3.3)



**Resim 3.3** a) Harcın yayılma tablasında görünümü; b) yayılan harç üzerinde çap ölçümü.

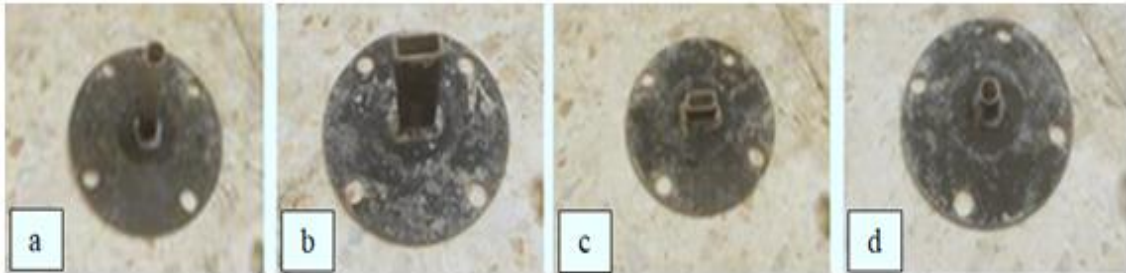
Hazırlanan harç karışımlar iç yüzeyleri yağlanmış (40x40x160 mm) boyutlarındaki prizmatik kalıplara konulmuştur. Harçlar, numune kalıbına yerleştirildikten hemen sonra ayrışma olmayacak şekilde masa tipi vibratörle sıkıştırılmıştır. Kalıplanan deney numuneleri, kalıp içerisinde yeterli sertliğe ulaşınca kadar bekletilmiştir. Sertleşmiş deney numuneleri, kalıplarından çıkartıldıktan sonra, deney uygulama aşamasına kadar (3,7,28 gün)  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve  $\%95\pm 5$  relatif nem ortamına sahip olan bir kür odasında kirece doygun su içerisinde kürlenmiştir (Resim 3.4).



**Resim 3.4** Prizmatik numunelerin kalıplanması ve kür edilmesi.

### 3.3.2 Ekstrüde Edilebilirlik

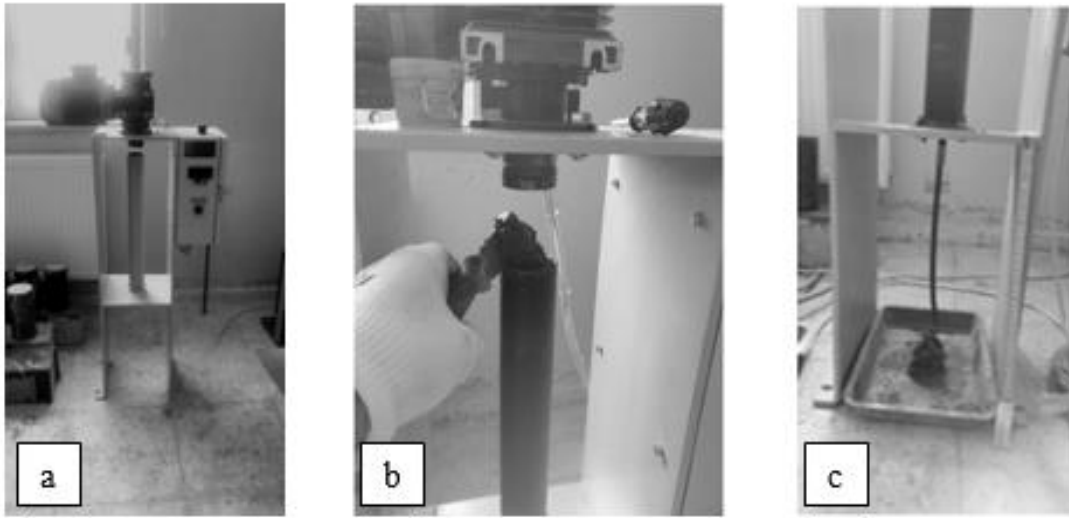
Ekstrüde edilebilirlik deneyleri için ekstrüzyon cihazı olarak RAM tipi ekstrüzyon kullanılmıştır. Çıkış ucu olan nozul boyutu olarak da 10 mm ve 40 mm uzunluğunda, 10 mm çapında dairesel uç ve 10x15 mm kesitli dikdörtgen uç olmak üzere 4 farklı nozul şekli deneysel çalışmalarda cihazda denenmiştir (Resim 3.5).



**Resim 3.5** Harçların ekstrüzyonunda kullanılan nozul şekilleri (a: dairesel uzun; b: dikdörtgen uzun; c: dairesel kısa; c: dikdörtgen kısa).

Hazırlanan harç cihazın haznesine konduktan sonra 50-300 mm/dk arasında altı farklı hız değerlerinde harca piston ile itme kuvveti uygulanmış ve daha küçük çaplı çıkıştan sürekli akması hedeflenmiştir.

Cihazın hazne çıkış ucu yerden 400 mm yüksekliktedir. Harcın nozuldan çıktıktan sonra aşağı doğru kopmadan akabildiği uzunluk değeri akış sırasında bir metre ile ölçülerek kaydedilmiştir (Resim 3.6).



**Resim 3.6** Proje kapsamında tasarlanarak yaptırılan ekstrüzyon ünitesi (a: Ekstrüzyon cihazı; b: cihaz haznesi; c: harç akışı).

### 3.3.4 Görünen Viskozite

Hazırlanan %0, % 2.5 ve %5 oranındaki mikrokapsüllenmiş ve kapsülsüz FDM katkılı çimento esaslı harçların viskozite ölçümleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Brookfield RV-II Pro marka viskozite cihazında V-72 numaralı kanat şeklindeki uç ve viskozite cihazına ait yine aynı marka sıcaklık ayarlı su banyosu kullanılarak yapılmıştır.

Sıcaklık kontrollü su banyosunda harç sıcaklığı 20-50 °C arasındaki ayarlanan değere ulaştığında 10, 50 ve 100 rpm'deki şekil değiştirme değerleri ölçülmüştür. Viskozite ölçümleri her hız için 5 sn ölçüm ve ölçümler arasında 3 sn bekleme olacak şekilde gerçekleştirilmiştir (Resim 3.7).



**Resim 3.7** FDM katkılı çimento harçlarının viskozitelerinin belirlenme aşaması.

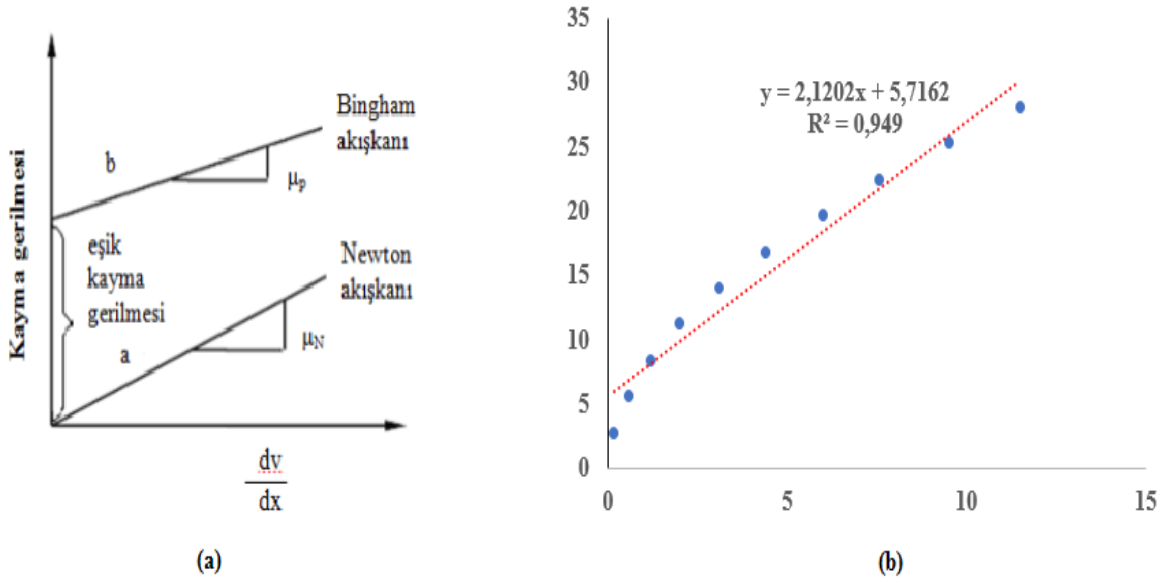
Mikrokapsüllenmiş ve kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkılı harçların ve kontrol harçların görünen viskoziteleri oda sıcaklığında, 600 ml hacimli standart cam beher içine harç konularak ve kanat uçların harç içerisindeki derinliği sabit tutularak TS 6126 EN ISO 2555 (2005)'e göre ölçülmüştür. Brookfield cihazında viskozite ölçümleri sırasında kaydedilen tork ve kullanılan kanat boyutlarına göre (3.1) bağıntısı kullanılarak kayma gerilmeleri belirlenmiştir.

$$\tau = M / (20 \cdot \pi \cdot L \cdot R^2) \quad (3.1)$$

Bağıntıda,  $\tau$ , kayma gerilmesini (Pa.s); M, kanat dönüş torku (dyne-cm); L, viskozite ölçümlerinde kullanılan kanat uzunluğunu (cm) ve R, kanat alt yarıçapını (cm) simgelemektedir.

Newton kuralına uymayan akışkanların kayma gerilmesine karşı davranışları reoloji ile belirlenmektedir. Çimento esaslı harçların reolojik davranışını belirlemek için de Bingham modeli kullanılmaktadır (Topçu ve Uygunoğlu, 2010). Viskozite ölçümleri sırasında elde edilen kayma oranlarına karşılık gelen kayma gerilmelerinin, x-y dağılımı oluşturulduktan sonra grafik üzerindeki noktalardan doğrusal eğim çizgisi geçirilerek Bingham modeli elde edilmiştir. Bingham modelindeki kayma gerilmesi-şekil değiştirme doğrusunu gösteren 'b' doğrusalının eğiminden plastik viskozite hesaplanmaktadır.

Doğrusal eğim çizgisinin düşey eksenini kestiği noktanın değeri eşik kayma gerilmesi değeri olmaktadır. Deneysel çalışmadaki tüm karışım serileri için yapılan bu işlemler sonucunda, doğrusal eğimlerden elde edilen korelasyon katsayısı  $R^2 = 0,949$  olarak bulunmuştur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 a) Kayma gerilmesi-şekil değiştirme oranının farklı model yaklaşımları b) x-y dağılım grafiğinde doğrusal eğimden korelasyon katsayısının bulunması.

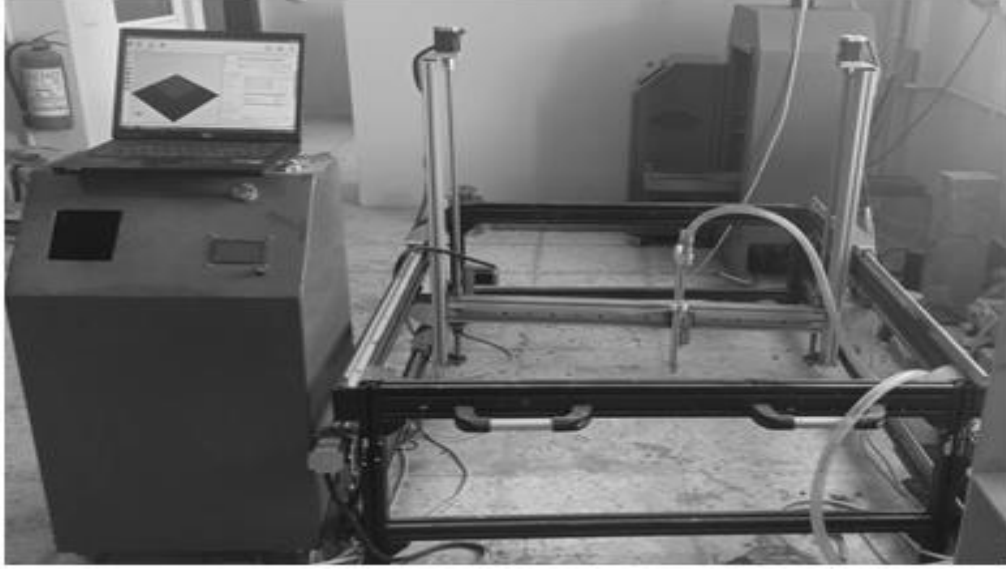
### 3.3.5 3D Yazdırma

3D baskı yazdırma işleminde kullanılacak olan 3D baskı yazıcı, 1100×900×900 mm yazdırma alanı ve Ø20 mm baskı ucu ölçülerinde tasarlanmıştır. 3D baskı yazıcı ölçüleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 3D baskı yazıcı ölçü bilgileri.

3D Baskı Yazıcı Ölçüleri	mm
Sistem ölçüleri	1500*1150*1200
Yazdırma alanı	1100*900*900
Baskı ucu ölçüleri	Ø20

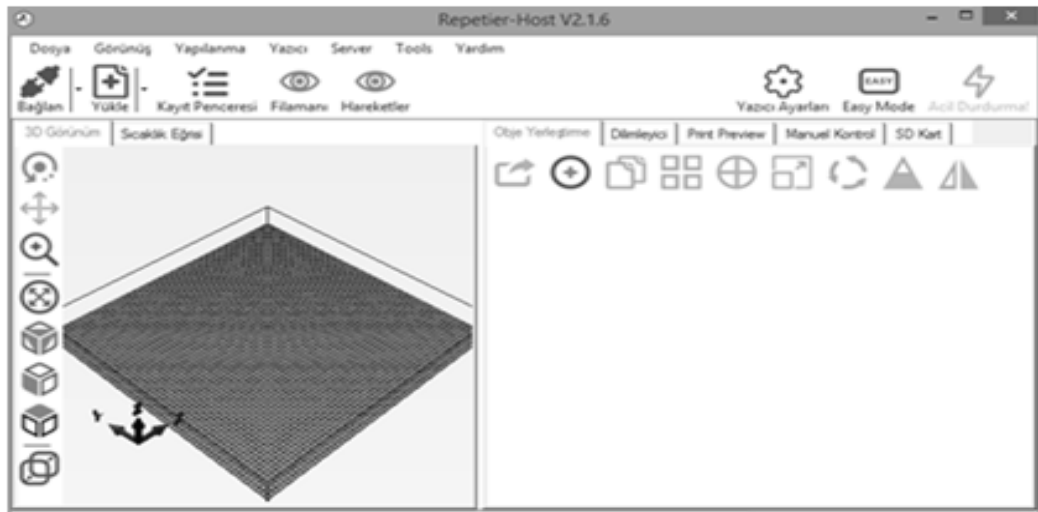
3D baskı yazıcıda yazdırma işlemine başlamadan önce yazıcının kalibrasyon işlemleri tamamlanmıştır. Kalibrasyon işlemi için kuru baskı çalışmaları yapılmıştır (Resim 3.8).



**Resim 3.8** 3D baskı yazıcı kalibrasyon işlemleri.

3D baskı yazıcının kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra üretimi yapılacak modellerin oluşturulması için Tinkercard programı ve matematiksel denklemler kullanılarak, 3 boyutlu modeller Repetier Host yazılımı ile yapılmıştır (Resim 3.9).

Üç boyutlu matematiksel modeli oluşturan x, y, z koordinatlarında baskı kafasının x-y eksenini boyunca yapacağı hareketler hesaplandıktan sonra G-code formatına çevrilerek kaydedilmiştir. Üretilecek model cura engine dilimleme adlı katmanlara ayırma programı kullanılarak istenilen kalınlıktaki katmanlara ayrılmıştır.



**Resim 3.9** Repetier Host yazıcı kontrol programı.

### 3.4 Sertleşmiş Harçlarda Yapılan Deneyler

#### 3.4.1 Fiziksel Özellikler

##### 3.4.1.1 Ultrases Geçiş Süresi Deneyi

Ultrases geçiş süresi deneyi prizma numunelerin beton döküm yönüne dik olan karşılıklı yüzeylerde yapılmıştır. Yüzeyler temizlendikten sonra sensörler ile numune arasına boşluk kalmaması için jel sürülmüş üç farklı numune üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her numunenin sonuçları alındıktan sonra ortalama değer hesaplanmıştır (Resim 3.10).



**Resim 3.10** Ultrases cihazı ile ölçümlerin yapılması.

##### 3.4.1.2 Elektriksel Özdirenç

Suya doymuş prizma deney numunelerinde ASTM C 1760 (2012) standardına uygun olarak direnç ölçer cihazında iki plaka yöntemine göre 15, 25, 35 ve 45 °C sıcaklıklar için elektriksel direnç değeri (R) ölçülmüştür (Resim 3.11). Tüm sıcaklıklar için her bir seriden üç adet ölçüm yapılarak aritmetik ortalama değerleri elde edilmiştir. Harç numunelerinden elde edilen direnç değerleri ile (3.2) bağıntısı kullanılarak elektriksel özdirenç değerleri hesaplanmıştır. Bağıntıda,  $\delta$ , elektriksel özdirenç (kohm.m); R, direnç (kohm); A, numune yüzey alanı (m<sup>2</sup>) ve L, plakalar arası mesafe (m) olarak gösterilmiştir.

$$\delta = (R \cdot A) / L \quad (3.2)$$



**Resim 3.11** Elektriksel özdirenç ölçümü.

### **3.4.1.3 Boşluk Oranı ve Su Emme**

TS EN 12390-7 (2010) ve ASTM C642 (2013)'e göre sertleşmiş beton su emme ve boşluk oranının belirlenmesi için numuneler 28 gün suda kür edilerek kullanılmıştır. FDM katkılı çimento esaslı harç karışımlar  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de hava sirkülasyonlu etüvde 24 saat bekletilerek etüv kurusu hale getirildikten sonra numunelerin sırasıyla etüv kurusu ağırlıkları, su içinde tutulduktan sonra suya doymun ağırlıkları ve su içindeki ağırlıkları belirlenmiştir.

## **3.4.2 Mekanik Özellikler**

### **3.4.2.1 Basınç Deneyi**

Basınç dayanımını belirlemek için 3D yazdırılabilir harçlardan elde edilen numunelere TS EN 12390-3(2010)'e göre basınç deneyleri yapılmaktadır. 3D baskı nesnelerinin farklı yönlerinden küp ve baskı işlemindeki katmanlara şekilsel uygunluk sağlaması için prizma numuneler alındıktan sonra, numuneler  $21 \pm 2^\circ\text{C}$  ortam sıcaklığında ve bağıl nemde kür edilerek 3, 7, 14 ve 28 günlük dayanımları belirlenmektedir (Resim 3.12).



**Resim 3.12** Deney numunelerinde basınç dayanımı.

#### **3.4.2.2 Eğilme Deneyi**

3D baskı yazıcı harç numunelerinin eğilme dayanımları TS EN 12390-5 (2010)'e göre basit kiriş yöntemi ile belirlenmektedir. Prizmatik numuneler  $21 \pm 2$  °C ortam sıcaklığında ve bağıl nemde kür edilerek 3, 7, 14 ve 28 günlük eğilme dayanımları belirlenmektedir (Resim 3.13).



**Resim 3.13** Deney numunelerinde eğilme dayanımı.

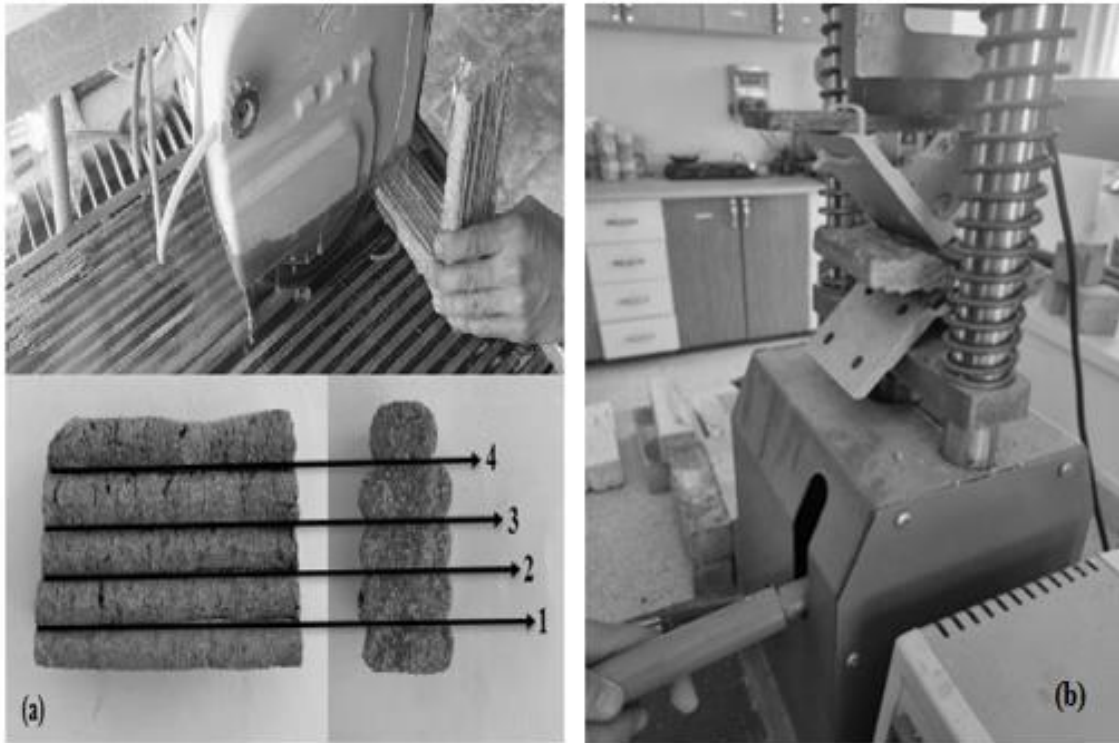
### 3.4.2.3 Aderans Dayanımı

3D baskı yazıcıda yazdırılan mikrokapsüllenmiş FDM katkılı (%0, %2.5, %5) harç numunelerin katmanlar arası aderans dayanımını belirlemek için öncelikle numuneler kesme işlemine tabi tutulmuştur. Deney düzeneği ölçülerinde beş katmanlı olacak şekilde kesilen numuneler üzerinde, hazırlanan özel bir düzenekle aderans deneyi yapılmıştır. Deneyde kullanılan yükleme presinin kapasitesi 20 kN'dur.

3D baskı yazıcıda basılan numunelerin aderans dayanımları en alttan başlayarak en üst katman aralığına kadar belirlenmiştir. Deneyin neden olduğu hataları önlemek için her harç grubundan üçer adet 3D baskılı numune kullanılmıştır (Resim 3.14).

Yarmada çekme yöntemi ile bağıntı (3.3) kullanılarak elde edilen bu üç değer aritmetik ortalaması alınmış ve aderans dayanımı bulunmuştur.

$$T = \frac{(2 \cdot P)}{(\pi \cdot A)} \quad (3.3)$$



**Resim 3.14** 3D yazıcıda yazdırılan FDM katkılı çimento esaslı harç numunelerin a) kesilmesi b) katmanlar arası aderans dayanımının belirlenmesi.

#### 3.4.2.4 Dinamik Elastisite Modülü

Deney numunelerinin dinamik elastisite modülleri de aşağıda verilen (3.4) no'lu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Bağıntıdaki,  $E_d$  : Dinamik elastisite modülünü,  $V$  : Ultrases geçiş hızını ve  $\Delta$  : Birim ağırlık'ı ifade etmektedir.

$$E_d = (10^5 \cdot V^2 \cdot \Delta) / 9.81 \quad (3.4)$$

#### 3.4.3 Isıl Özellikler

##### 3.4.3.1 Isıl İletkenlik

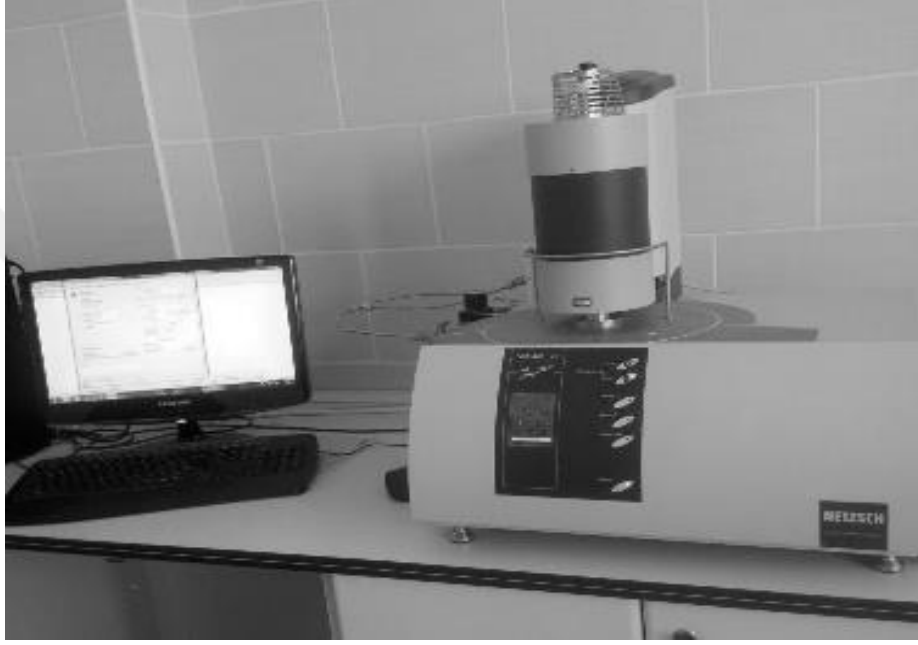
Faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harç numunelerin ısı iletkenlik katsayısı TS ISO 8302 (2002)'de belirtilen ısı akış ölçme yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. 40x40x160 mm boyutlarındaki beton numuneler ısı iletkenlik katsayılarının belirlenmesi için deneye başlamadan önce  $110 \pm 5$  °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat süre ile kurutulmuştur. Her bir karışımdan hazırlanan deney numuneleri üzerinde Resim 3.15'te görülen ısı iletkenlik cihazı ile ölçüm yapılmış ve ortalama ısı iletkenlik katsayıları bulunmuştur.



**Resim 3.15** Isıl iletkenlik analiz cihazı.

### 3.4.3.2 DSC-TGA Analizleri

Kontrol ve faz değiştiren malzeme katkılı numunelerin ısı akışı ve ağırlık değişimini belirlemek için Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezinde NETZSCH STA F3-449 tipi cihazda diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve termogravimetri analizleri (TGA) yapılmıştır (Resim 3.16).



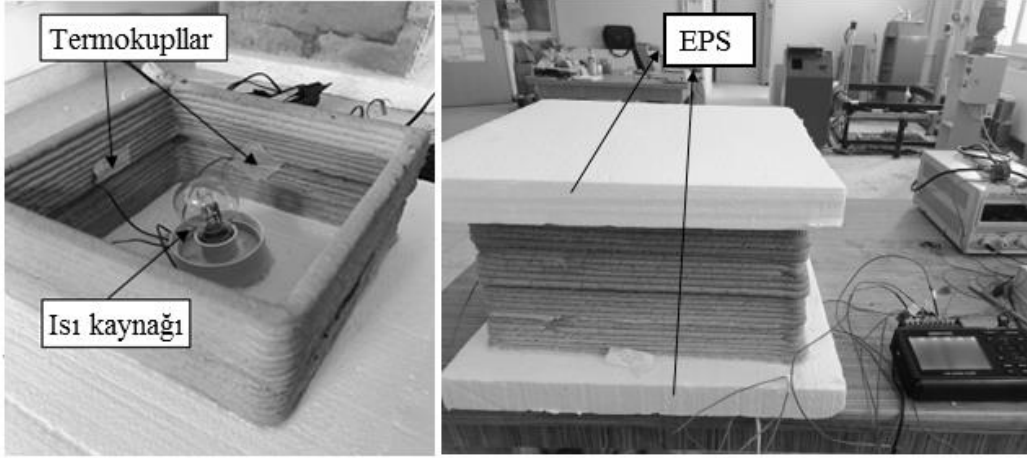
**Resim 3.16** NETZSCH STA F3-449 tipi cihazda DSC ve TGA analizleri.

Faz değiştiren malzeme katkılı ve kontrol numuneler, sabit ısıtma hızında ısıtıldıktan sonra kütle değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülüp kaydedilmiştir. Deney numunelerinde kütle kaybına neden olan reaksiyonlar, ayrışma reaksiyonlarından kaynaklanabileceği gibi, bir bileşenin buharlaşmasından kaynaklı da meydana gelebilmektedir.

### 3.4.3.3 Enerji Performansı

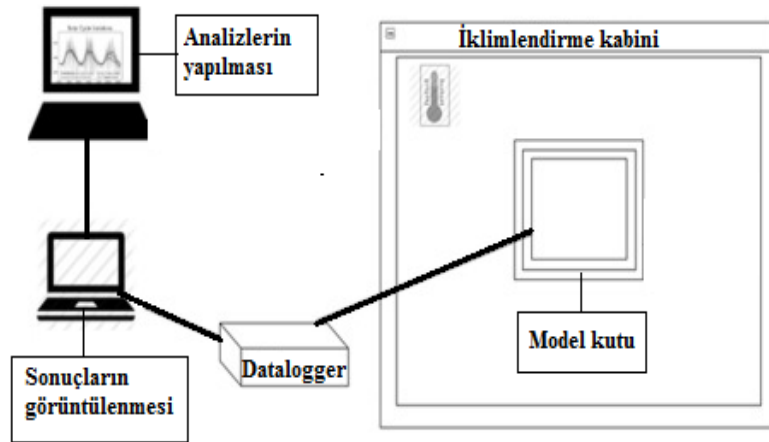
Faz değiştiren malzeme katkılı imento esaslı harçların ısıl özelliklerini incelemek için istenilen sıcaklıktaki evre koşullarını simüle eden iklimsel bir kabin içinde küçük ölçekli bir kutu oluşturularak ısıl özelliklerin analiz edilmesi farklı araştırmalarda da uygulanmıştır (Tittlein vd. 2015, Kusama ve Ishidoya 2017, Cunha vd. 2016).

Öncelikle deneysel çalışmalarda kullanmak için %0 ve %5 mikrokapsüllü faz değıştiren malzeme içeren çimento esaslı harçtan 400x400 mm ebadında, 25 mm duvar kalınlığında deney kutuları 3D baskı yazıcıda yazdırılmıştır. K tipi termokupllar harç kutularının iç duvarına sabitlendikten sonra ısı kaynağı olarak kutuların ortasına 40 W'lık bir lamba yerleştirilmiştir. Model kutuların taban ve üst kısmına yerleştirilen genişletilmiş polistiren sert köpük tabakasıyla yalıtım sağlanmıştır (Resim 3.17).



**Resim 3.17** Mikrokapsüllenmiş FDM katkı ve kontrol model harç kutularının hazırlanması.

Harç kutuların iç duvarlarına sabitlenen termokuplların diğer uçları, iklimlendirme kabini içindeki sıcaklık değışimlerini her 30 saniyede bir ölçüp kayıt altına alan Data Logger cihazına bağlanmıştır. Model kutuların ısı analizlerinin yapım aşamasının şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilmiştir.



**Şekil 3.4** Model kutuların ısı analizlerinin yapım aşamasının şematik gösterimi.

Deney kutularının aynı duvarlarındaki iç ve dış sıcaklık farkı, Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Nüve İD 300 iklimatik kabin kullanılarak -5, 0, 5 ve 25 oC sıcaklık değerleri için 24 saat boyunca kaydedilmiştir (Resim 3.18).



**Resim 3.18** Deney kutularının iç ve dış sıcaklıklarının iklimlendirme kabininde ölçülmesi.

### 3.4.4 Mikroyapı Özellikler

#### 3.4.4.1 Mikroyapı Analizi

Çimento esaslı harçlarda hidratlı ürünlerin ve faz değiştiren malzemelerin dağılımını görmek için Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezinde, LEO VP-1431 tipi taramalı elektron mikroskobunda (SEM) mikroyapı analizi yapılmıştır (Resim 3.19).



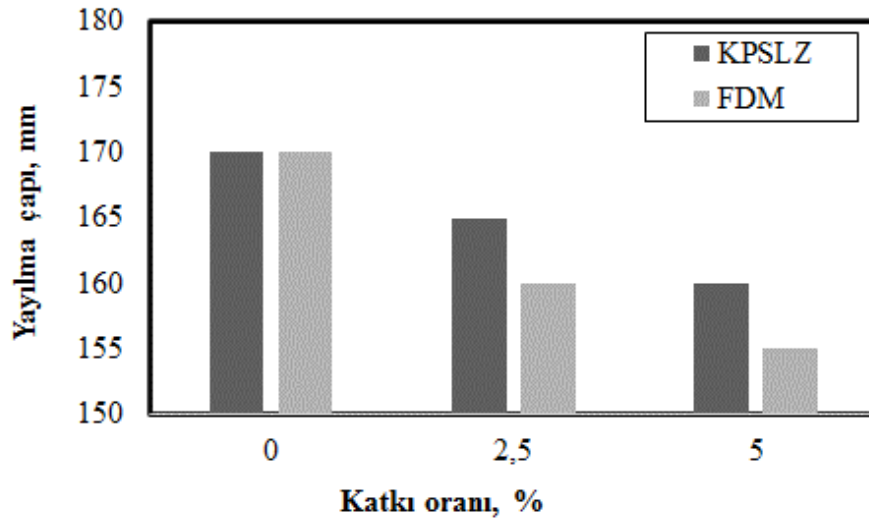
**Resim 3.19** LEO VP-1431 tipi taramalı elektron mikroskobunda mikroyapı analizi.

## 4. BULGULAR

### 4.1 Taze Harçlarda Yapılan Deneyler

#### 4.1.1 Yayılma

Çimento esaslı kontrol ve FDM katkılı harçların yayılma çapı değerleri aritmetik ortalama alınarak hesaplanmıştır. Çimento harçlarının içerisine %0, %2.5 ve %5 mikrokapsüllenmiş ve kapsülsüz FDM katkı ilave edilmesiyle elde edilen numunelerin yayılma çaplarındaki değişimler Şekil 4.1’de verilmektedir. Kontrol numunenin yayılma değeri 170 mm, %2.5 ve %5 FDM katkılı numunelerde yayılma değerleri sırasıyla; kapsülsüz FDM’li numunelerde 165 ve 160 mm, mikrokapsüllenmiş FDM’li numunelerde ise 160 ve 155 mm olarak belirlenmiştir.

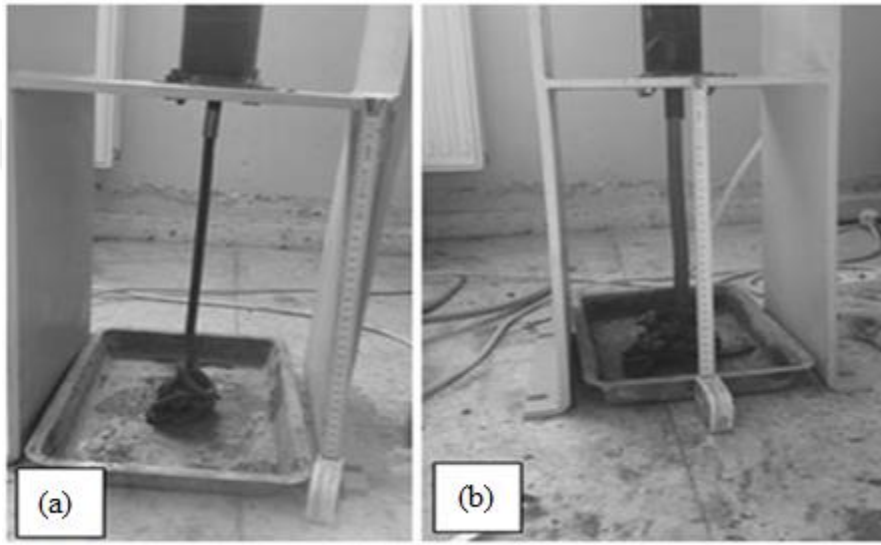


Şekil 4.1 Mikrokapsüllü ve kapsülsüz FDM katkılı çimento esaslı harçların yayılma çapı.

Bütün katkılı harçlarda FDM kullanım oranı arttıkça yayılma çapı değerleri azalmıştır. Bu azalma oranı kontrol harcına göre kapsülsüz FDM (%2.5 ve %5) kullanılan harçlar için %3 ve %6’dır. Diğer yandan mikrokapsüllenmiş FDM (%2.5 ve %5 ) katkılı harç için ise aynı katkı oranlarındaki yayılma çapındaki azalma oranı sırasıyla %6 ve %9 oranındadır. Bunun nedeni kapsülsüz kullanılan FDM’nin karışıma doğrudan sıvı halde ilave edilmesiyle harcın işlenebilirliğini mikrokapsüllenmiş FDM’lere göre kısmen arttırmasıdır.

#### 4.1.2 Ekstrüde Edilebilirlik

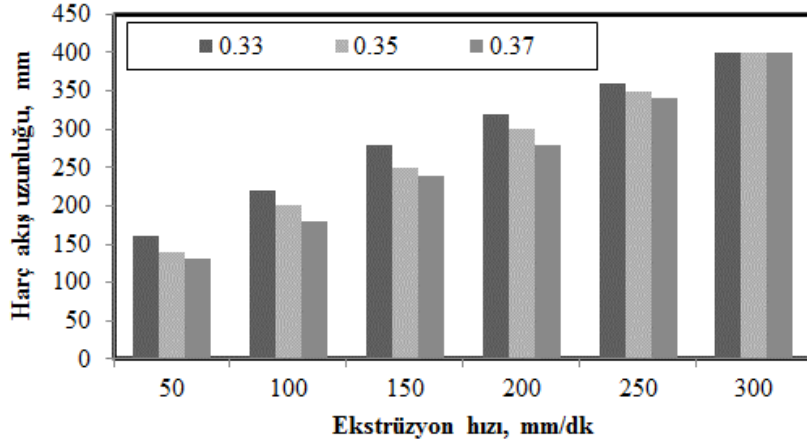
Ekstrüzyon hızı değerlerinin artmasıyla tüm s-ç oranlarındaki harçların akış uzunluğu düzenli bir şekilde artmıştır. Ekstrüde edilebilirlik sırasında hızın düşük olması durumunda, harç birim ağırlığının ve yerçekiminin etkisiyle de belirli aralıklarda kopmalar olmuştur. Tüm s-ç oranındaki harçlar 300 mm/dk ekstrüzyon hızı değerinde kopmadan sürekli olarak akabilmişlerdir. Dairesel ve dikdörtgen kesitli uçlardan harcın kesintisiz akış görüntüleri Resim 4.1’de verilmiştir.



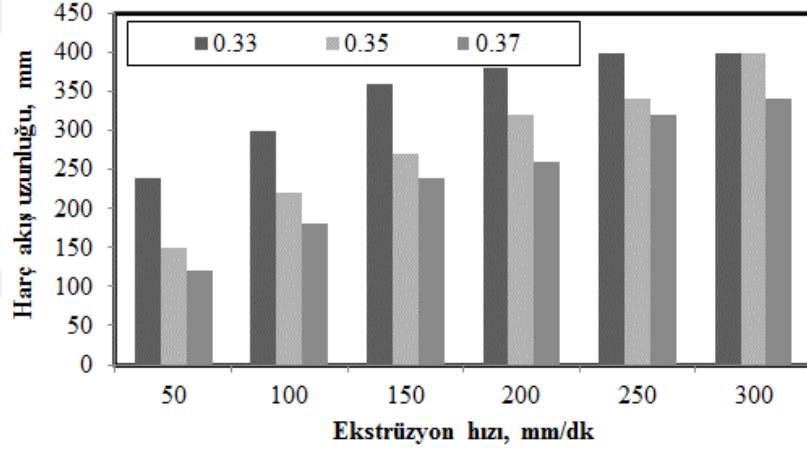
**Resim 4.1** Kopmadan ekstrüde edilen harçlardan (s-ç: 0.33) bir görünüm (a: uzun dairesele uç; b: uzun dikdörtgen uç).

Ekstrüzyon cihazında nozul şekli olarak uzun dairesele çıkış ucu kullanıldığında, hız değerlerine bağlı olarak harçların akış uzunluğu Şekil 4.2’de görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, hazne çıkış ucunun yerden yüksekliği 400 mm olduğundan, harçların bu uzunluk değerinde akabilmeleri hedef değerler olmuştur.

Nozul olarak dikdörtgen uzun uç kullanıldığında da dairesele uzun uçtaki gibi hız değerlerinin artırılmasıyla akış uzunluklarında artışlar elde edilmiştir. Ancak farklı bir durum olarak, s-ç oranının 0.35 ve üzerinde kullanılmasıyla ekstrüzyon hız değerlerindeki harçların akış uzunluğu 0.33 s-ç oranlarına göre belirgin bir şekilde daha az olduğu görülmektedir. Buna ilaveten, 300 mm/dk hız değerinde iki harcın kesintisiz akabildiği, s-ç oranı 0.37 olan harçlarda 340 mm uzunluğunda akabildiği görülmektedir (Şekil 4.3).



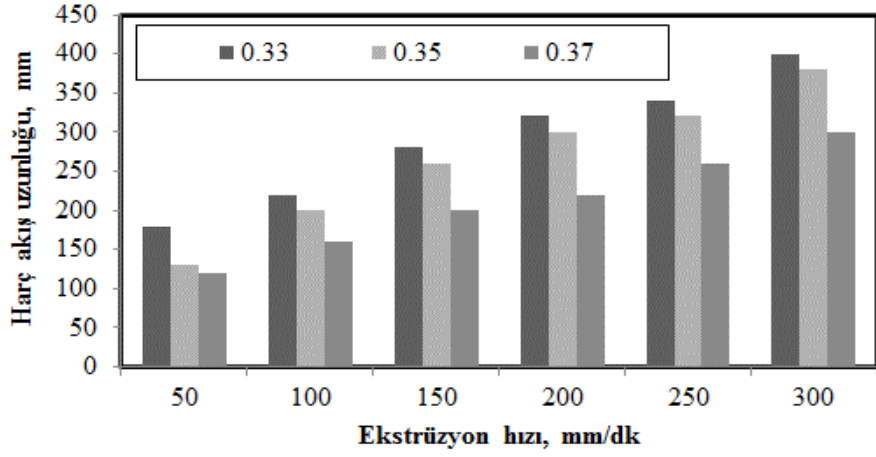
Şekil 4.2 Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranı değerlerinde dairesel uzun uçtan ekstrüde edilebilirliği.



Şekil 4.3 Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranı değerlerinde dikdörtgen uzun uçtan ekstrüde edilebilirliği.

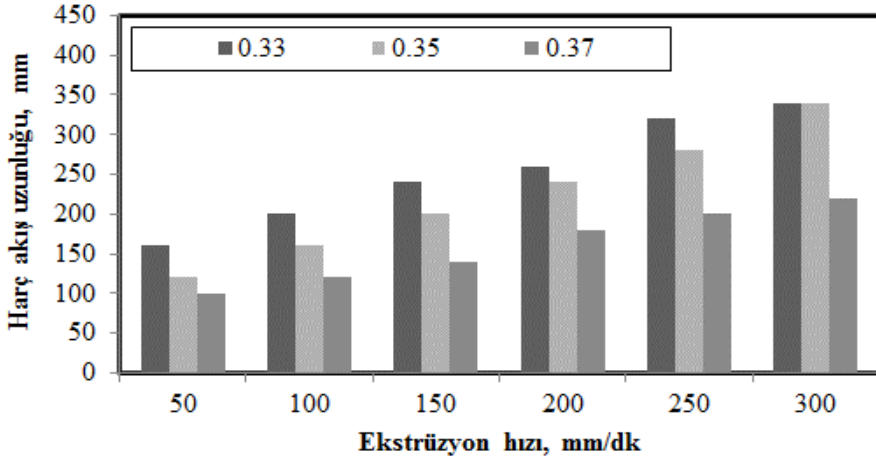
Ekstrüzyon cihazında kısa çıkış ucu kullanılması durumunda aynı kesit alanına sahip uzun uçlarda elde edilen akış değerlerine göre daha düşük harç akış uzunlukları elde edilmiştir. Kısa uçlu nozullarda diğer uzun uçlara göre az da olsa daha kısa akış uzunlukları değerlerinin ölçülmesi, harcın daha kısa sürede nozul içerisinde ilerleyerek doğrudan aşağı doğru yerçekimi etkisinde kalması ve kısa ucun kendi uzunluğundan dolayı baskı yapılacak yüzeye olan uzaklığının daha fazla olması ile açıklanmaktadır.

Dairesel kısa uç ile 300 mm/dk hız değerinde 0.33 ve 0.35 s-ç oranında hedef değere kadar kesintisiz akış, 0.37 s-ç oranında 310 mm uzunluğunda akış sağlandığı grafikte gösterilmiştir. (Şekil 4.4).



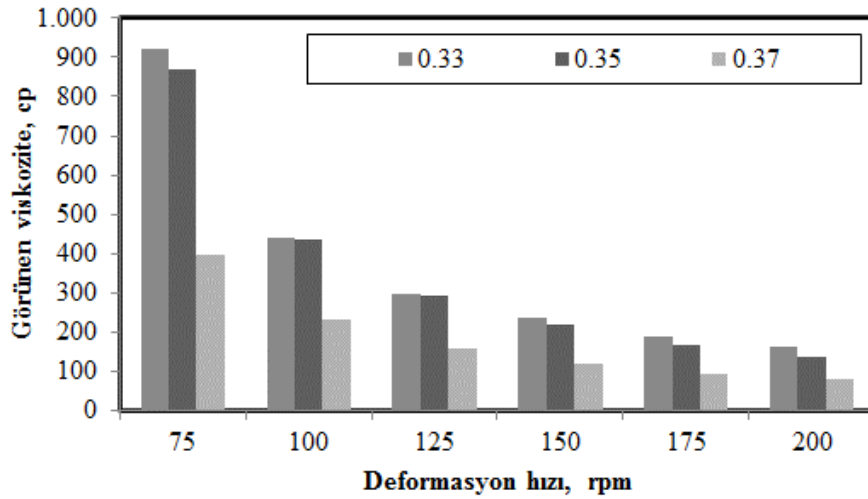
**Şekil 4.4** Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranı değerlerinde dairesel kısa uçtan ekstrüde edilebilirliği.

Kesit alanının artmasından dolayı dikdörtgen kesitli kısa uçlarda dairesel kısa uçlara göre daha düşük akış uzunluklarının elde edildiği grafiklerde açıkça görülmektedir (Şekil 4.5).



**Şekil 4.5** Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranı değerlerinde dikdörtgen kısa uçtan ekstrüde edilebilirliği.

Ekstrüde edilebilirlik deneylerinde kullanılan harçların tüm s-ç oranları için farklı şekil değiştirme hızlarındaki görünen viskoziteleri ölçülerek, elde edilen değerler Şekil 4.6'da verilmiştir. Bütün şekil değiştirme hızları için düşük s-ç oranlarında (0.33 ve 0.35) yakın değerler elde edilirken, s-ç oranının 0.37 olmasıyla harçların tanecikleri arasındaki iç sürtünmenin azalmasıyla daha düşük görünen viskozite değerlerinin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.6 Çimento esaslı harçların farklı s-ç oranına göre görünen viskoziteleri.

Şekil değiştirme hız değerinin artmasıyla artan kayma gerilmelerinden dolayı bütün harçların viskozite değerleri azalmıştır. Ekstrüzyon cihazında en fazla akış uzunlukları yüksek ekstrüzyon hızlarında elde edildiğinden, harçların 200 rpm civarındaki viskozite değerlerinin de genel olarak 100-200 cp arasında kalması önerilebilir. Özellikle uzun dairesel ve dikdörtgen uçlarda bu hız değerlerinde 350 mm üzerinde önemli bir akış uzunluğunun elde edildiği görülebilir.

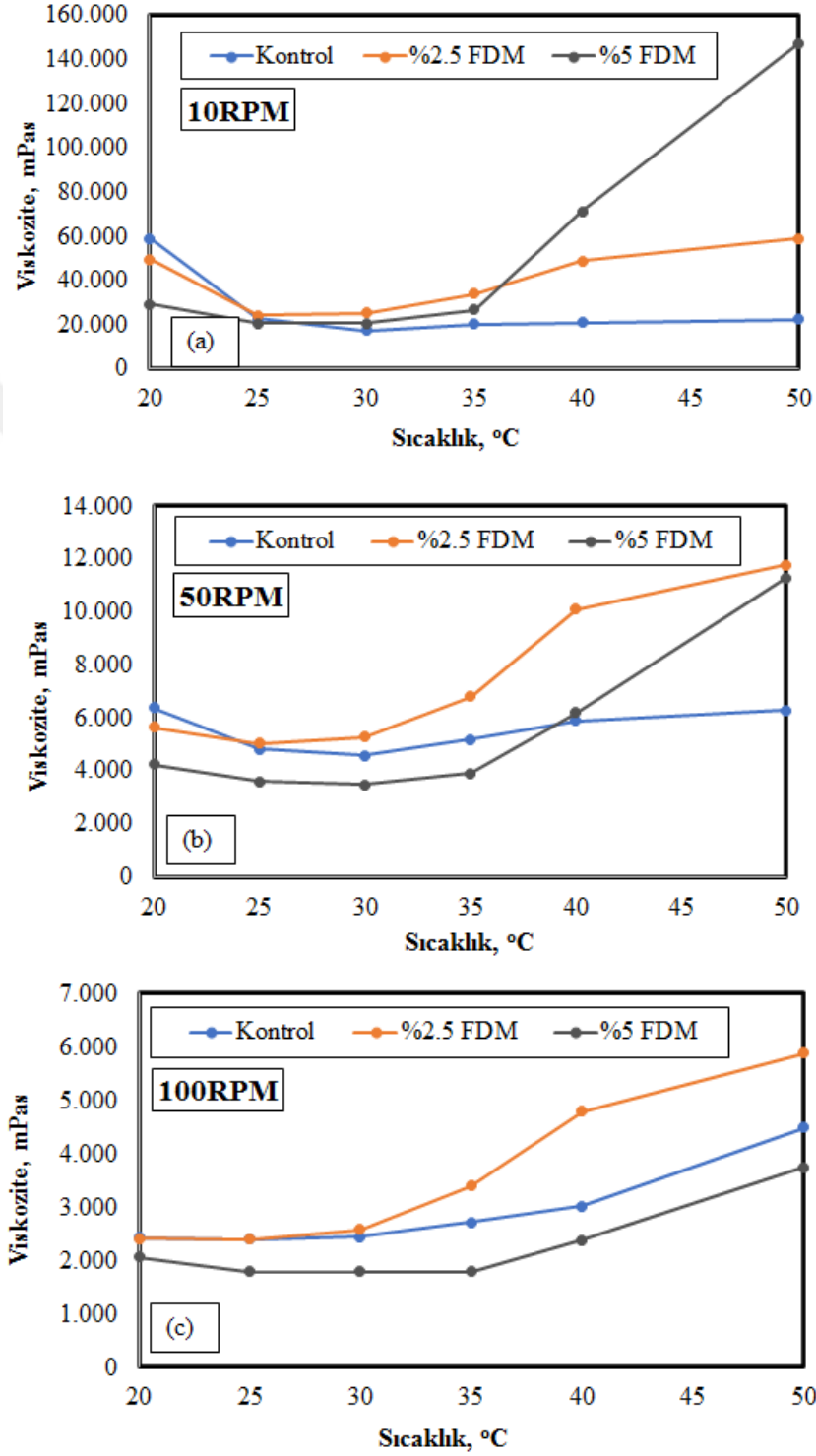
Yapılan çalışmalar sonrasında çimento esaslı faz değiştiren katkılı harçların s-ç oranı 0.37 olarak belirlenmiş ve çalışmalara dairesel uç ile devam edilmiştir.

#### 4.1.3 Görünen Viskozite

Çimento hamurlarına %0, %2.5 ve %5 oranında faz değiştiren malzeme ilave edilerek farklı karıştırma hızlarında viskozitelerindeki değişimler ölçülmüştür. Mikrokapsüllenmiş ve kapsülsüz faz değiştiren malzeme kullanımının özellikle düşük hızlarda (10 rpm) viskozite üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir.

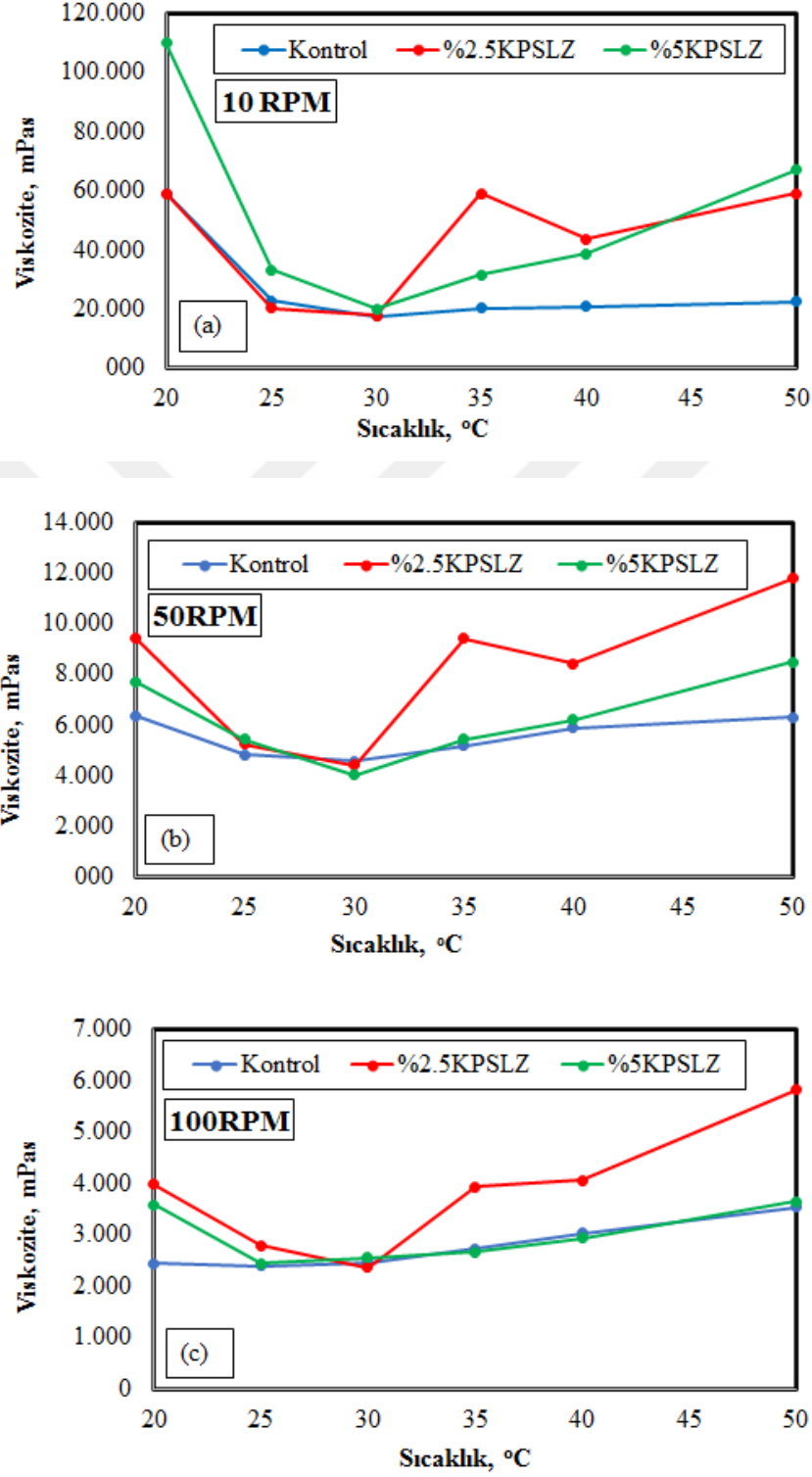
Çimento esaslı mikrokapsüllü faz değiştiren malzeme katkılı karışımların viskoziteleri faz değişim geçiş sıcaklığı olan 35 °C itibaren doğrusala yakın bir ivme ile artışa geçmiştir. Düşük karıştırma hızında çimento hamuru içerisine %2.5 oranında mikrokapsüllü

faz değiştiren malzeme ilave edilmesi durumunda %5 mikrokapsüllü FDM katkı karışma göre daha düşük viskozite değerleri elde edilirken, hız arttıķa durum tersine dönmüştür (şekil 4.7).



şekil 4.7 Mikrokapsüllü FDM katkılı numunelerin karıştırma hızına ve sıcaklığa bağlı viskoziteleri (a: 10 rpm; b: 50 rpm; c: 100 rpm)

Çimento esaslı harçlarda kullanılan kapsülsüz faz değıştiren malzemelerin viskozite üzerindeki etkisi Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Kapsülsüz FDM katkı çimento hamurlarının karıştırma hızına ve sıcaklığa bağlı viskoziteleri (a: 10 rpm; b: 50 rpm; c: 100 rpm).

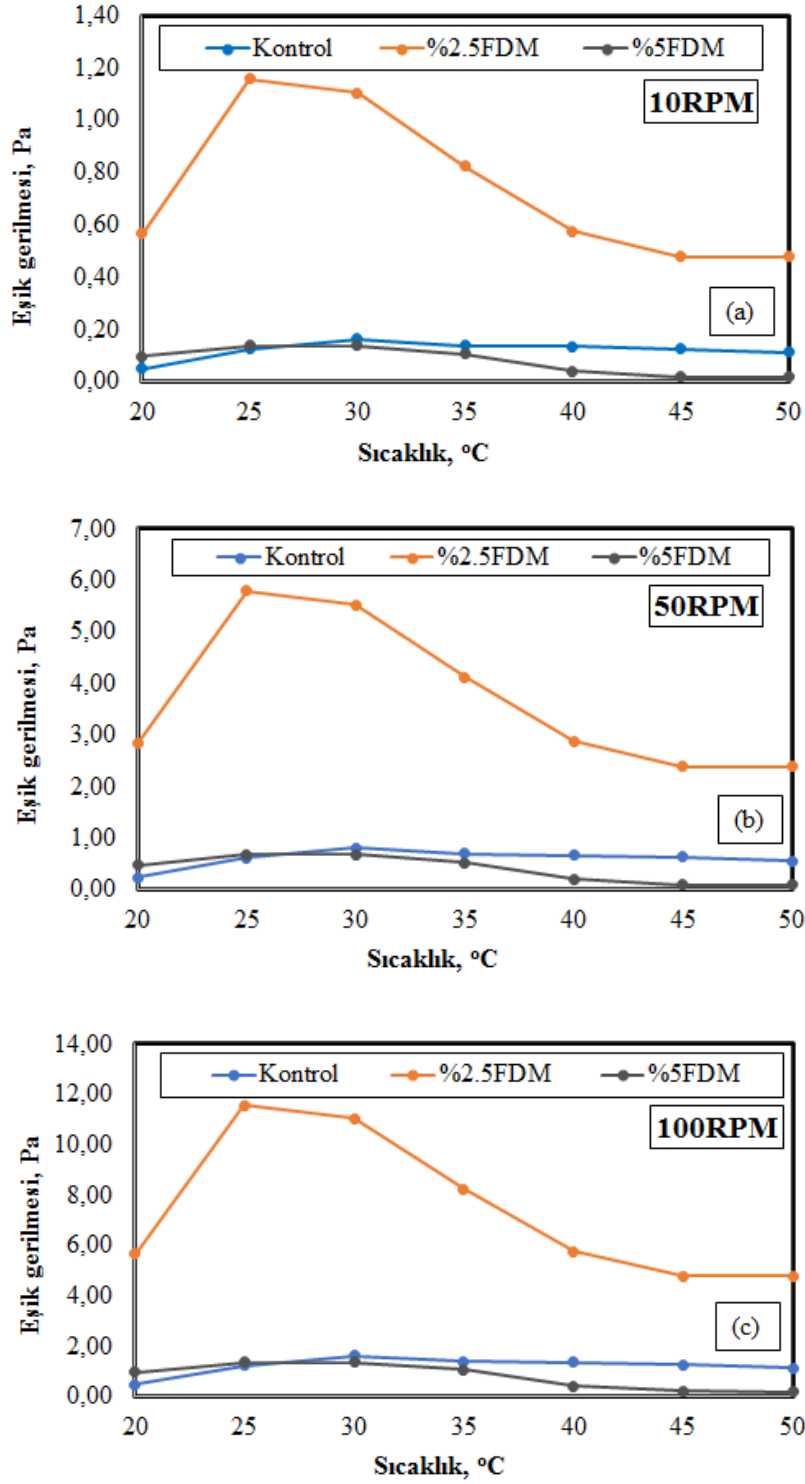
Kapsülsüz FDM'ler viskozite üzerindeki etkisini tüm hız değerlerinde faz geçiş sıcaklığı olan 35 °C'den itibaren göstermiştir. Karışımların hızı arttıkça viskozite değerleri azalmakla birlikte kapsülsüz FDM'lerin etkisinin de azaldığı gözlenmektedir. Bununla birlikte, çimento hamuru düşük hızlarda karıştırılırsa %2.5 kapsülsüz FDM'li harçların 20 °C sıcaklıkta viskozite değerleri kontrol karışımına göre düşük iken, 30 °C sıcaklıktan başlayarak faz geçiş sıcaklığı olan 35 °C sıcaklık değerine kadar değeri artış göstermiştir.

Kapsülsüz %5 oranında faz değiştiren malzeme katkılı harçların viskozite değeri kontrol numuneye göre tüm sıcaklıklar için daha yüksek çıkmakla birlikte 30 °C'den sonra sürekli artış olmuştur. Dolayısıyla, düşük sıcaklıklarda kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkılı karışımın viskozitesinin düşük olması, laboratuvar ortam sıcaklığında akışkanlığın artması; ancak hızlı bir şekilde ısıtılacak olunursa (30-50 °C) harcın viskozitesi önemli miktarda artırılarak çimento hamurunun akmadan-çökmeden durabilmesi sağlanabilecektir. Tüm karışım sonuçları değerlendirildiğinde hem sıcaklık hem de karışım döküm hızının değiştirilmesiyle birlikte, çimento hamurunun reolojik özelliklerini kısa zaman aralığında değiştirilebilme durumu ortaya çıkmaktadır.

Çimento hamuruna mikrokapsüllü faz değiştiren malzeme farklı oranlarda ilave edilerek elde edilen karışımların eşik gerilmesi değerleri belirlenirken 10, 50 ve 100 rpm hızlarındaki ve 20-50 °C sıcaklık aralığındaki veriler kullanılmıştır. Grafik sonuçları incelendiğinde tüm karışımların eşik gerilmesi değerleri düşük karışım hızında daha düşük iken karışım hızının artmasıyla artmaktadır (Şekil 4.9).

Mikrokapsül faz değiştiren malzeme katkılı karışımın da tüm hız değerlerinde sıcaklık artışı ile birlikte eşik gerilmesi doğrusala yakın bir artış göstermiştir. Mikrokapsüllenmiş %5 faz değiştiren malzeme katkı oranı ile hazırlanan karışım harçlarının eşik gerilmesi değerlerinin kontrol harcından daha düşük değer aldığı gözlenmiştir.

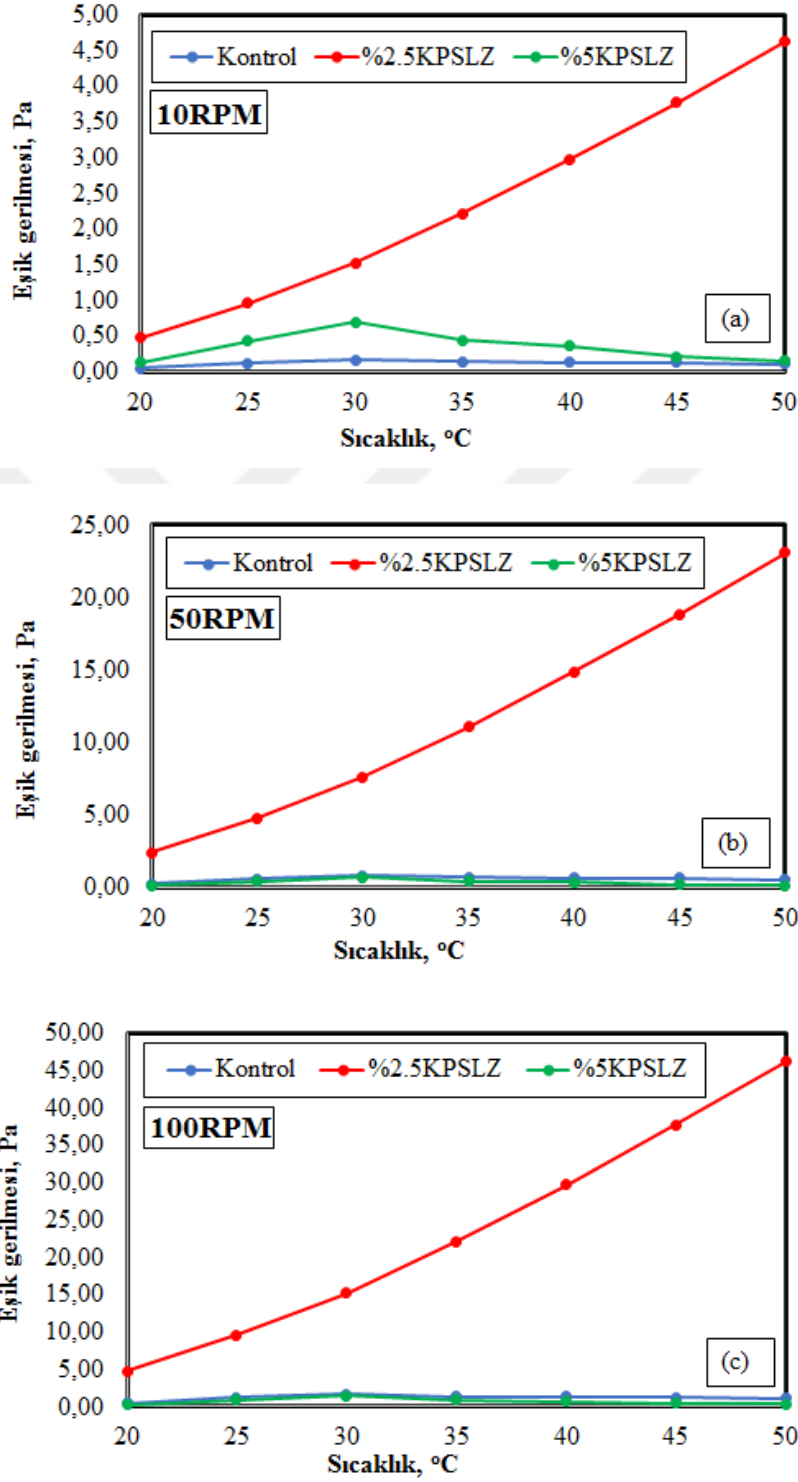
Farklı sıcaklık aralıklarında ve 100 rpm hız değerinde %2.5 mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı karışımın eşik gerilmesi değeri, kontrol harcın eşik gerilmesi değerinin yaklaşık 4-10 katı değerler almıştır. Aynı zamanda sıcaklığın 35 °C ve üstü değer alması durumunda eşik gerilmesi değeri azalmaya başlamıştır.



**Şekil 4.9** Mikrokapsüllü FDM katkılı çimento hamurlarının karıştırma hızına ve sıcaklığa bağlı eşik gerilmesi değerleri (a: 10 rpm; b: 50 rpm; c: 100 rpm)

Kapsülsüz FDM katkılı karışımın da tüm hız değerlerinde sıcaklık artışı ile birlikte sadece %2.5 kapsülsüz FDM katkılı numunelerde eşik gerilmesi doğrusala yakın bir artış göstermiştir. Kapsülsüz %5 faz değiştiren malzeme katkı oranı ile hazırlanan karışım

harçlarının eşik gerilmesi değerlerinin kontrol harcına yakın bir değer aldığı sadece 10 rpm hızında az da olsa daha yüksek değer aldığı gözlenmiştir (Şekil 4.10).

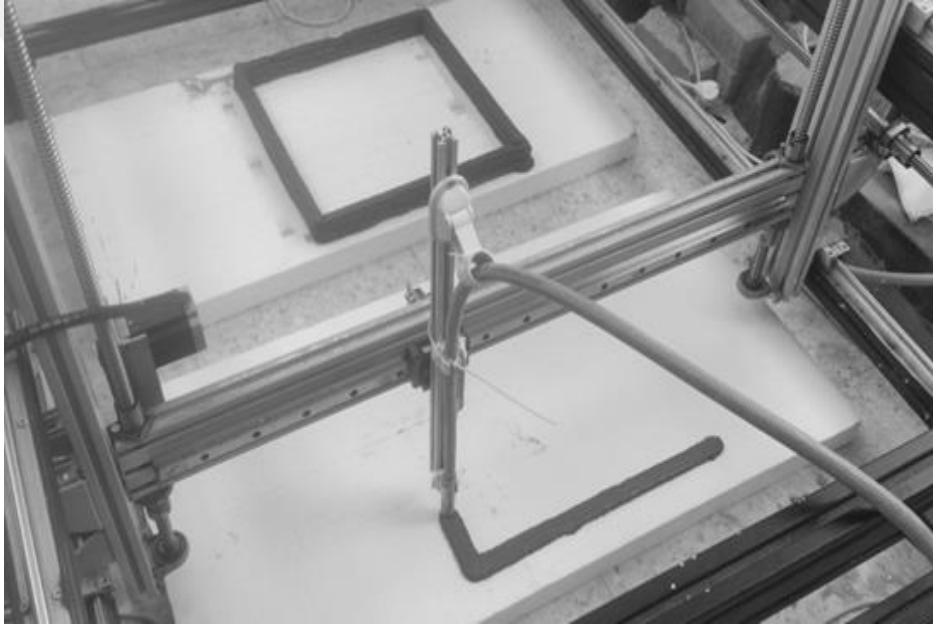


Şekil 4.10 Kapsülsüz FDM katkılı çimento hamurlarının karıştırma hızına ve sıcaklığa bağlı eşik gerilmesi değerleri (a: 10 rpm; b: 50 rpm; c: 100 rpm)

#### 4.1.4 3D Yazdırma

Kalibrasyonu yapılarak baskıya hazırlanan yazıcının baskı ayarlarının yapılabilmesi için öncelikle 3D baskı yazıcıda kuru baskı çalışmaları yapılmıştır. Kuru baskı işlemlerinde gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra yazıcıda kontrol harç karışım ile model kutu baskı denemelerine geçilmiştir.

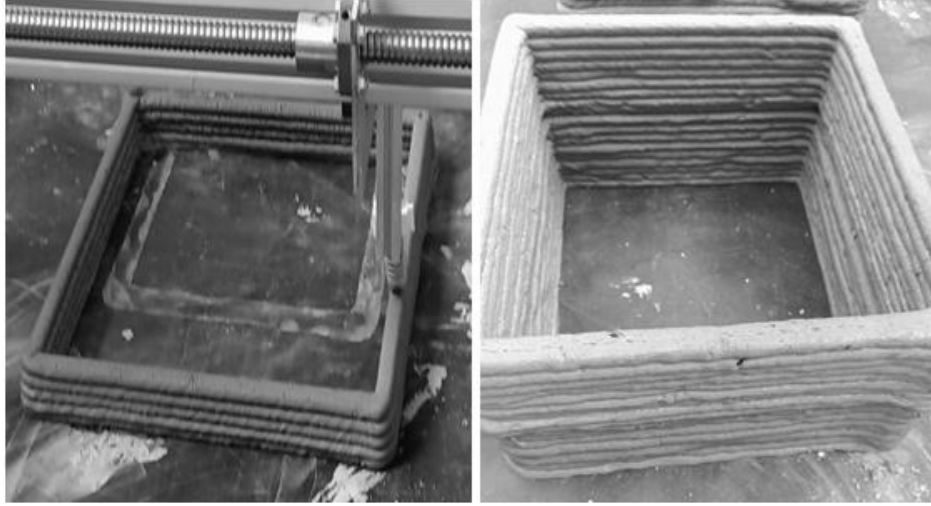
Kontrol harç ile model kutu baskı deneme çalışmalarında 3D baskı yazıcı ile üst üste gelen katmanların şekil değiştirme olmadan daha fazla katman taşıyabilecek şekilde yazdırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Resim 4.2).



**Resim 4.2** 3D baskı yazıcıda model kutu baskı deneme çalışmaları.

Isıl analiz deneylerinde kullanılacak olan kontrol model kutular, harç katmanlarının yazdırma genişlikleri 25 mm ve katman kalınlıkları 10 mm olacak şekilde 25 katman olarak yazdırılmıştır.

Kontrol model kutu için 25 katmanın şekil değiştirme olmadan baskı işlemi gerçekleştirildikten sonra, aynı ölçülerde faz değiştiren malzeme katkılı baskı işlemine geçilerek %5 mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı model kutuların yazdırma işlemi tamamlanmıştır (Resim 4.3).



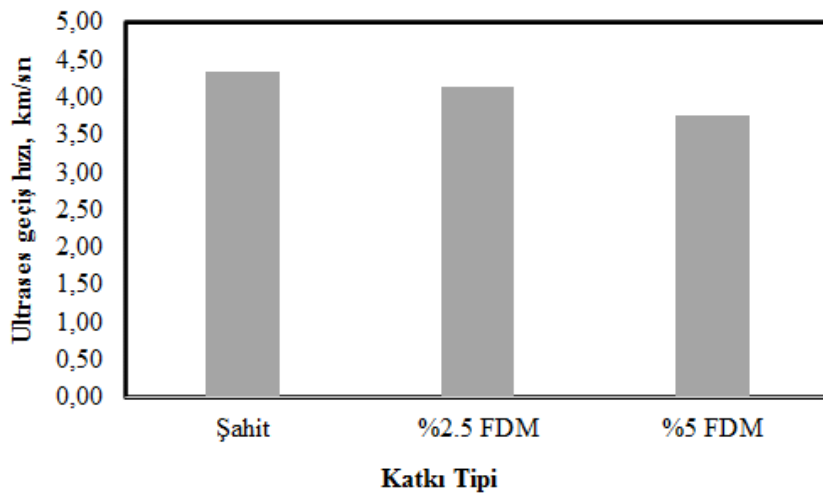
**Resim 4.3** 3D baskı yazıcıda kontrol ve %5 FDM model kutuların yazdırılması.

## 4.2 Sertleşmiş Harçlarda Yapılan Deneyler

### 4.2.1 Fiziksel Özellikler

#### 4.2.1.1 Ultrases Geçiş Süresi Deneyi

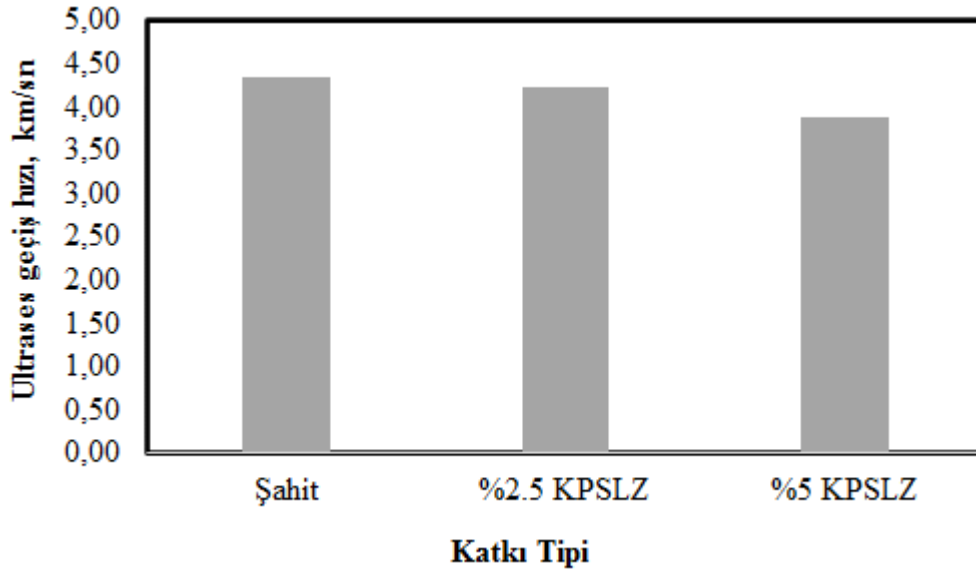
Mikrokapsüllenmiş FDM katkıli numuneler üzerinde ortam sıcaklığında yapılan ultrases geçiş süresi deneyi sonuçları incelendiğinde kontrol numuneye göre faz değiştiren katkıli numunelerde belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Kontrol numunede en yüksek geçiş hızı olarak 4.25 km/sn kaydedilirken, en düşük geçiş hızı 3.75 km/sn ile %5 mikrokapsüllenmiş FDM katkıli numunede elde edilmiştir (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11** Mikrokapsüllenmiş FDM katkıli prizma numunelerde ultrases geçiş hızı.

Benzer şekilde kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkılı numunelerin geçiş hızları kontrol numuneye göre daha düşük değer almıştır (şekil 4.12). Bununla birlikte katkı oranı arttıkça ultrases geçiş hızında azalma görölmüştür.

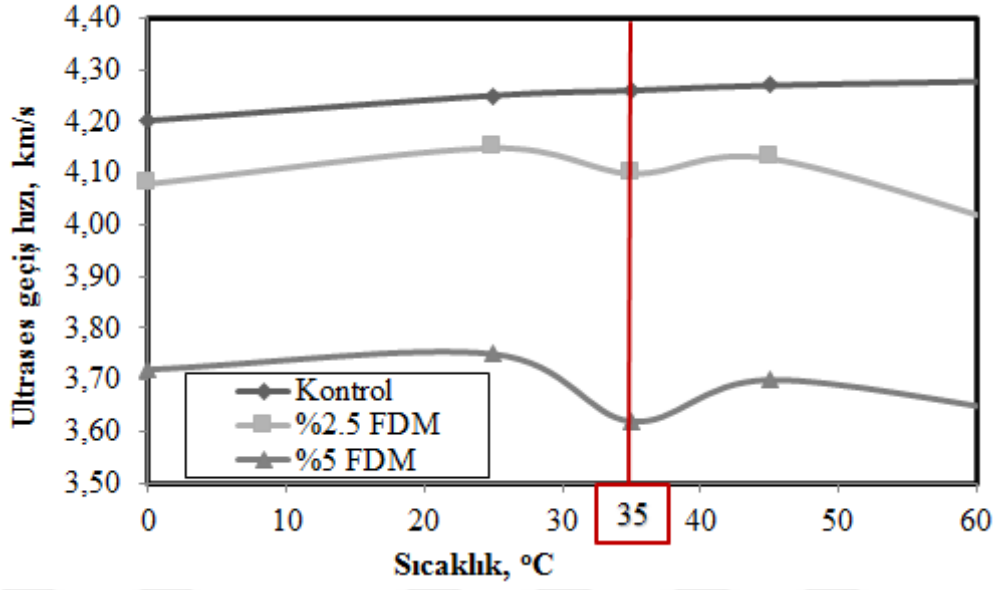
Çimento esaslı harçlarda yapılan ultrases geçiş süresi deneyi sonuçlarında ultrases geçiş hızının yüksek olması doluluk oranı yüksek bir yapıyı, düşük olması ise boşluklu bir yapıyı işaret etmektedir. Belirgin bir farklılık olmama nedeni çimento esaslı harçlardaki boşluklu yapının faz değiştiren malzeme katkılı harçlarda da çok fazla değişmemiş olmasıdır.



şekil 4.12 Kapsülsüz FDM katkılı prizma numunelerde ultrases geçiş hızı.

Isıl analiz deneyinde mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı harçlar kullanılacağı için karşılaştırma kontrol ve mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı harçlar üzerinde yapılmıştır. Kontrol numunelerin UPV değerlerinde 20 °C sıcaklık değerine kadar biraz artış olurken, sonraki sıcaklık değerlerinde belirgin bir değişiklik olmamıştır.

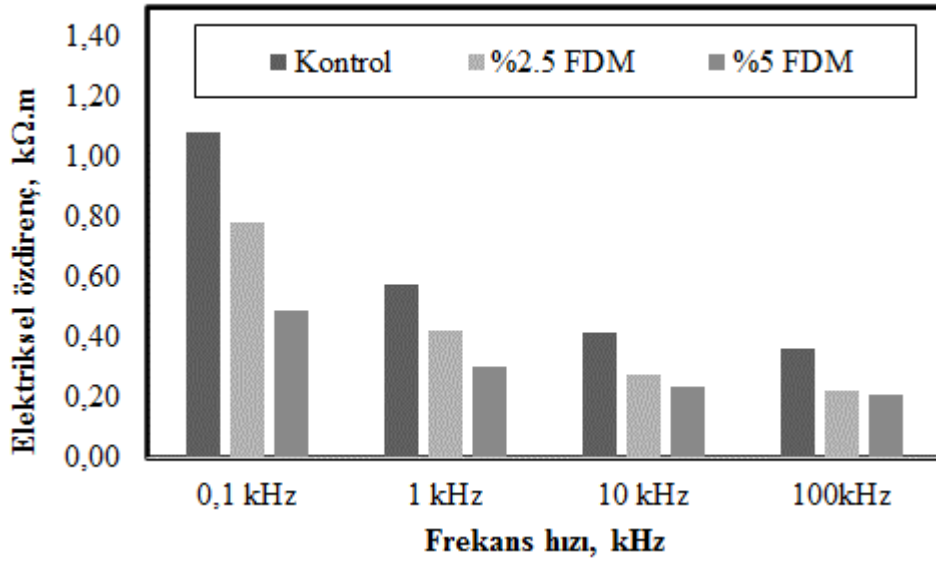
Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme içeren harçların UPV değerlerinde geçiş sıcaklığı olan 35 °C'den önceki düşüş geçiş sıcaklığından itibaren yükselişe dönmüştür. Bunun nedeni FDM'nin katı fazdan sıvı faza geçerken ultrasonik iletimin azalmasıdır.



Şekil 4.13 Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı harçların sıcaklığa bağlı UPV değerleri

#### 4.2.1.2 Elektriksel Özdirenç

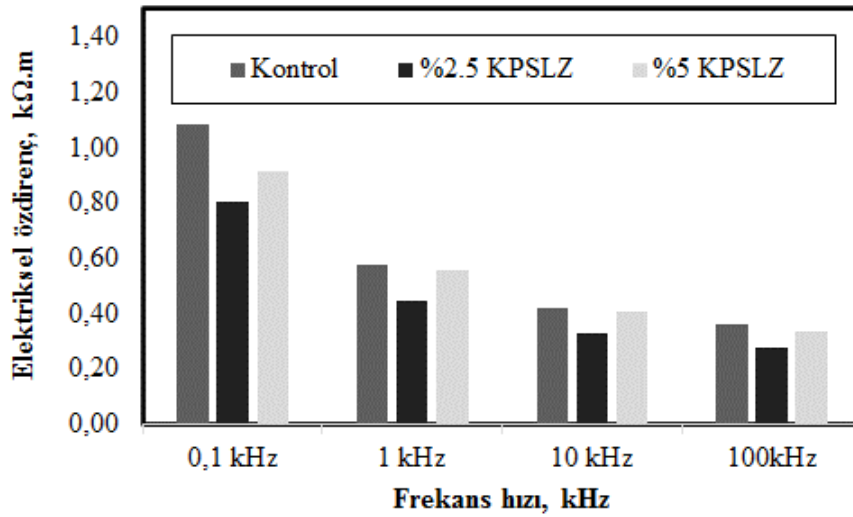
Çimento esaslı harçlarda %0, %2.5 ve %5 faz değiştiren malzeme katkı kullanımını ile elde edilen suya doymun numunelerin ortam sıcaklığındaki elektriksel özdirenç değerleri 0,1,1,10 ve 100 kHz frekansları için ölçülmüştür. Elde edilen direnç değerleri grafikte gösterilmiştir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Kontrol ve mikrokapsüllü FDM katkılı numunelerin elektriksel özdirençlerinin frekansa bağlı değişimi.

Tüm numunelerin farklı frekans değerleri için elektriksel özdirençleri incelendiğinde frekans artışına bağlı olarak direnç değerleri azalmıştır. En yüksek elektriksel özdirenç kontrol numunesinde 0.1 kHz frekans için 1.08 k $\Omega$ m olarak, en düşük değer de 100 kHz frekans değerinde 0.22 k $\Omega$ m olarak %5 mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı numunede elde edilmiştir. Harç içerisinde mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme oranı arttıkça elektriksel özdirenç azaldığı görülmektedir.

Kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkılı numunelerin elektriksel özdirenci tüm frekans değerleri için kontrol numuneye göre azalmaktadır (Şekil 4.15).

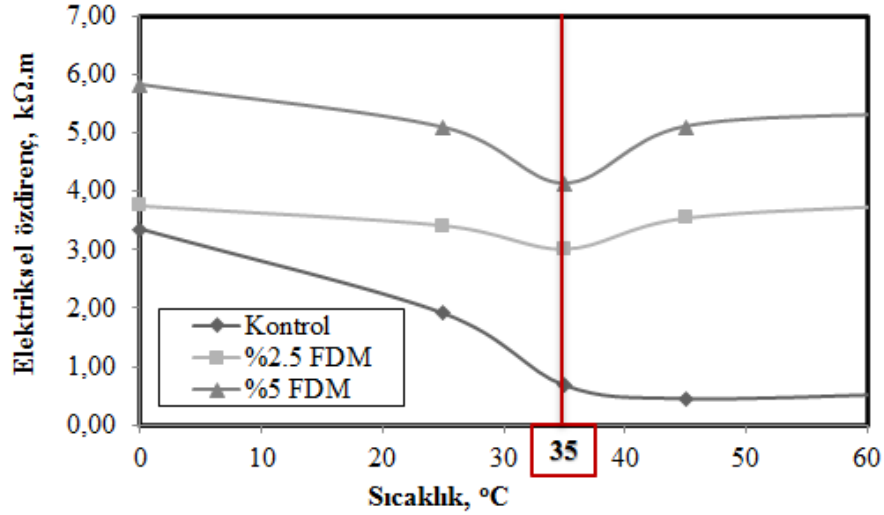


Şekil 4.15 Kontrol ve kapsülsüz FDM katkılı numunelerin elektriksel özdirençlerinin frekansa bağlı değişimi.

Numunelerde kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkı oranı arttıkça da elektriksel özdirenç artmaktadır. Çimento esaslı harçlarda frekans artışına paralel olarak iyon transferinin hızlanması daha düşük değerde elektriksel özdirenç elde edilmesine neden olmaktadır.

Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı etüv kurusu numunelerin sıcaklığa bağlı elektriksel özdirençleri incelendiğinde sıcaklığın artması ile birlikte tüm numunelerin direnç değerleri azalmıştır. Ancak sıcaklık değeri faz değiştiren malzemenin geçiş sıcaklığı olan 35 °C'ye ulaştığında FDM katkılı numunelerin direnç değerleri yeniden artışa geçerken kontrol numunelerin direnç değerlerinde bir değişiklik olmamıştır.

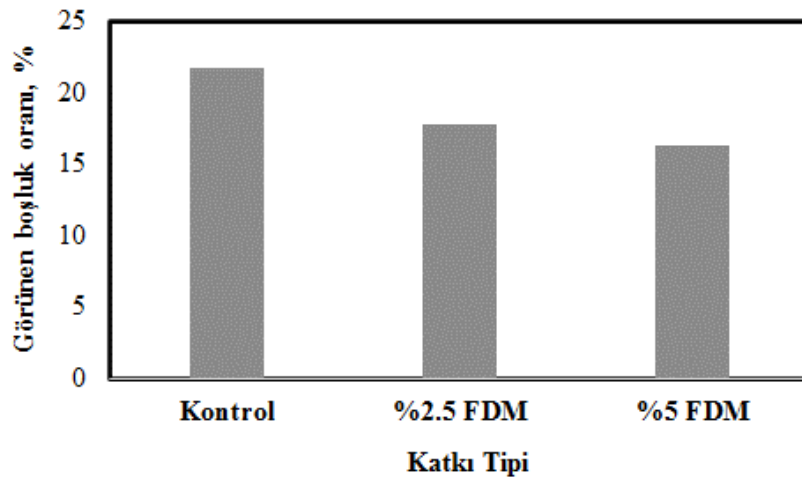
Numunelerin sıcaklığa bağlı en yüksek elektriksel özdirenç değerleri %5 mikrokapsüllenmiş FDM katkıli numunelerde elde edilmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Mikrokapsüllenmiş FDM katkıli çimento esaslı harçların sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç değerleri

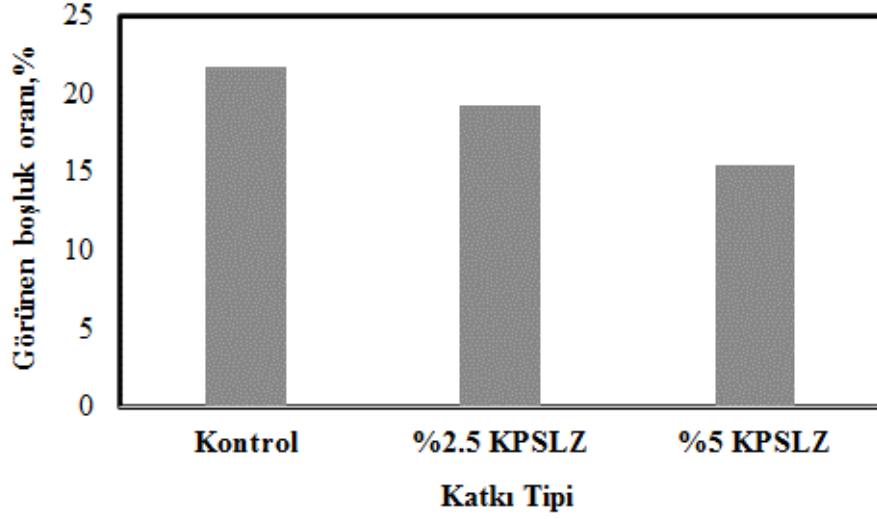
#### 4.2.1.3 Boşluk Oranı ve Su Emme

Deneyisel çalışmalarda çimento esaslı harç karışımların içerisine ilave edilen mikrokapsüllü faz değiştiren malzeme oranı (%2.5 ve %5) arttıkça, boşluk oranı değerlerinin kontrol numuneye göre sırasıyla %18 ve %30 oranında azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.17).



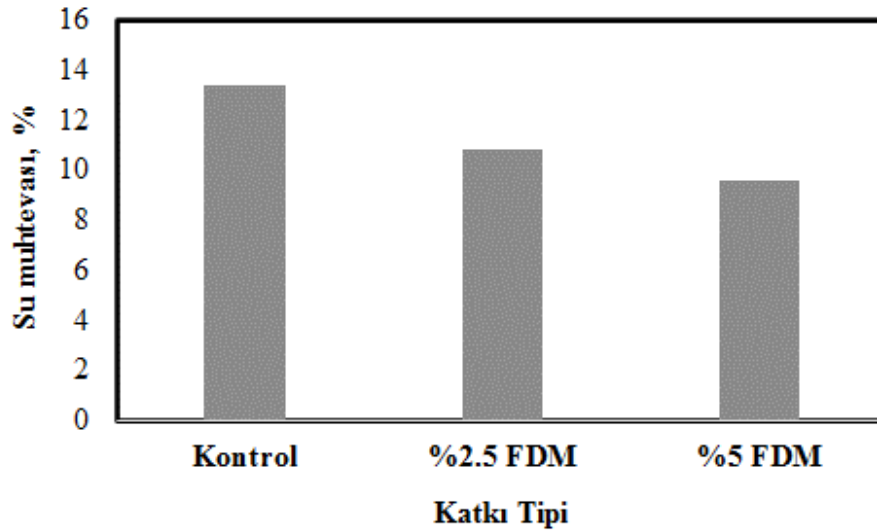
Şekil 4.17 Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkıli çimento esaslı harçların görünen boşluk oranı değerleri.

Kapsülsüz faz değiştiren malzeme oranı (%2.5 ve %5) arttıkça boşluk oranı kontrol numuneye göre sırasıyla %22 ve %34 oranında azalmıştır (şekil 4.18). Bunun nedeni ise faz değiştiren malzeme oranı artışının karışımdaki ince malzeme oranını arttırarak harçtaki boşluk miktarını azaltmasıdır.



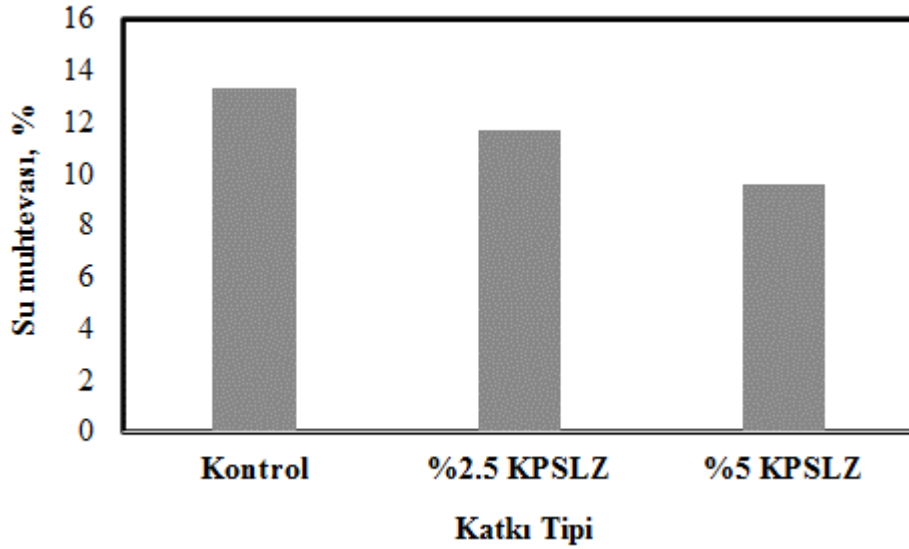
şekil 4.18 Kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların görünen boşluk oranı değerleri.

Deney numunelerinde mikrokapsüllü faz değiştiren malzeme katkı oranı (%2.5 ve %5) arttıkça kontrol numuneye göre su emme miktarlarında sırasıyla %17 ve %32 oranında azalma gözlemlenmiştir (şekil 4.19).



şekil 4.19 Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların su emme değerleri.

Kapsülsüz FDM katkılı numunelerin su emme değerleri kontrol numuneye göre %23 ve %34 oranında azalmıştır (Şekil 4.20). Bu davranış, faz değiştiren malzemenin harç gözenekleri içinde bulunduğunu ve emme kapasitesini sınırladığını göstermektedir.



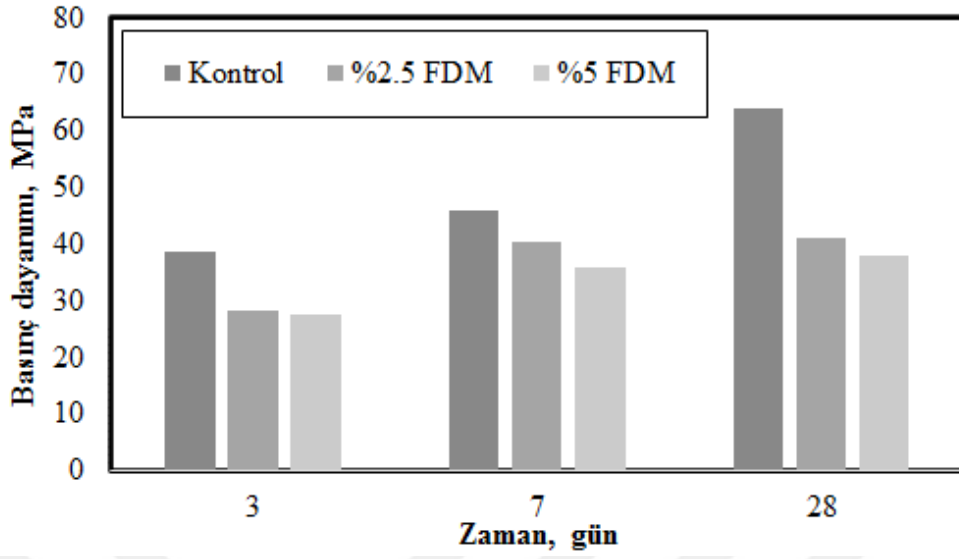
Şekil 4.20 Kapsülsüz faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harçların su emme değerleri.

## 4.2.2 Mekanik Özellikler

### 4.2.2.1 Basınç Deneyi

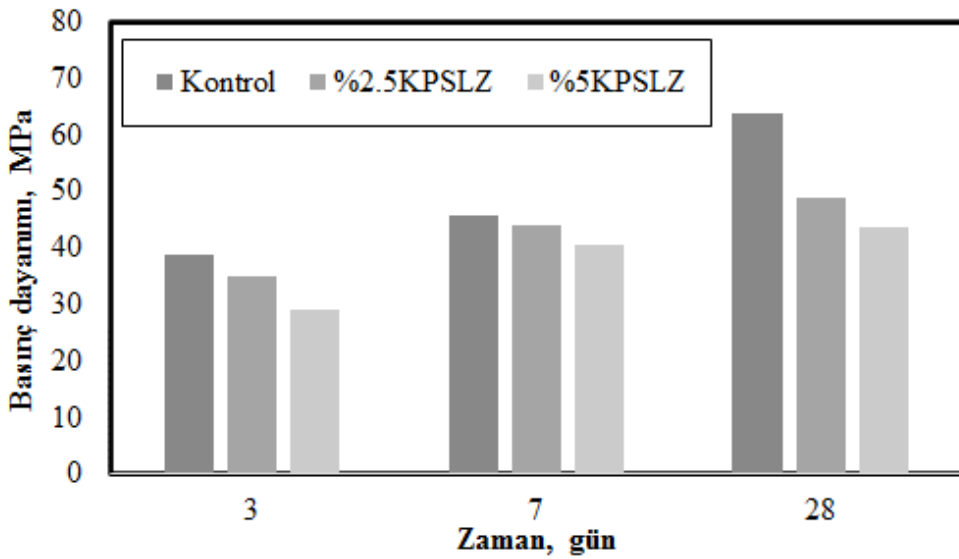
Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı deney numunelerinin tamamında basınç dayanımı sonuçları kontrol numune ile karşılaştırıldığında daha düşük değer elde edildiği görülmüştür. Mikrokapsüllenmiş %2.5 FDM katkılı numunelerde, %5 faz değiştiren malzeme katkılı numunelere göre erken ve ileri evre basınç dayanımında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Mikrokapsül malzemesi polimerik olarak üretilmektedir (Marani vd. 2023). Dolayısıyla çimentolu hidrasyon ürünleri arasında harç bileşenlerine göre buldukları bölgede zayıf alanlar oluşturmuşlardır ve yük altında bu zayıf bölgelerden dolayı harçların dayanımları azalmıştır (Şekil 4.21). Öte yandan kapsüllenmemiş faz değiştiren malzemenin harç üretimine dahil edilmesi, çimento sertleştirme sürecinde bir gecikmeye neden olabileceğinden kürlenme sürecini de etkilemektedir (Cunha vd. 2016).



Şekil 4.21 Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı deney numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.

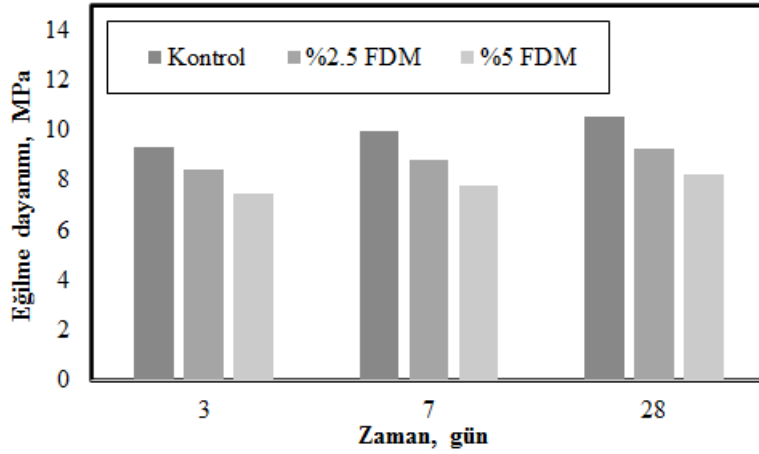
Benzer şekilde çimento esaslı harçlarda kapsülsüz FDM kullanım oranının %2.5'tan %5 oranına artırılmasıyla da basınç dayanımı azalmıştır. Kontrol numune ile kıyaslandığında kapsülsüz FDM katkılı (%2.5 ve %5) numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarında sırasıyla %38 ve %44 oranında azalma meydana gelmiştir. Kapsülsüz FDM katkılı numuneler ile kontrol numunelerin erken dayanımı arasındaki fark yaklaşık 10 MPa iken ileri evre dayanımında ki farkın yaklaşık 20 MPa çıktığı görülmektedir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22 Kapsülsüz FDM katkılı deney numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.

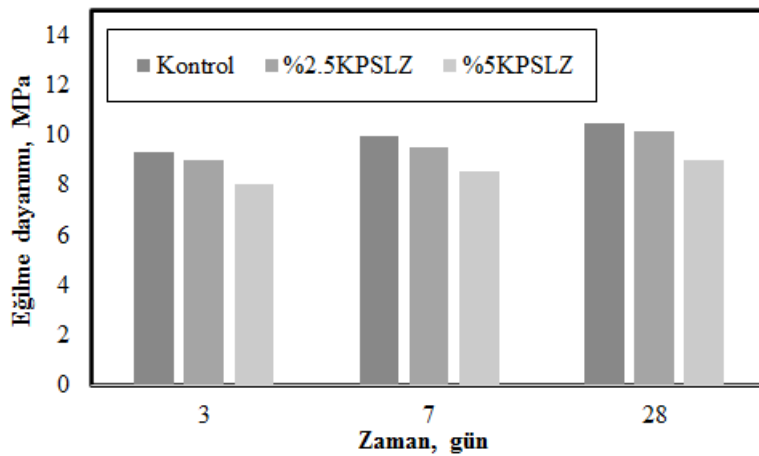
#### 4.2.2.2 Eğilme Deneyi

Eğilme dayanımında 3,7 ve 28 günlük numunelerde erken ve ileri yaş dayanımlarda en yüksek değerler kontrol numunede elde edilirken, en düşük değerler ise %5 mikrokapsüllenmiş FDM katkılı numunelerde elde edilmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23 Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı deney numunelerinin eğilme dayanımı sonuçları.

Eğilme dayanımı kapsülsüz FDM'lerde mikrokapsüllenmiş FDM'lere göre daha yüksek değer almakla beraber kontrol numuneye göre daha düşük bir eğilme dayanımı elde edilmiştir. FDM katkılı numuneler kendi aralarında karşılaştırıldıklarında %2.5 FDM içeren numuneler erken ve ileri yaş dayanımlarda %5 FDM katkılı numunelere göre eğilme dayanımında daha yüksek değerlere ulaşmıştır (Şekil 4.24).



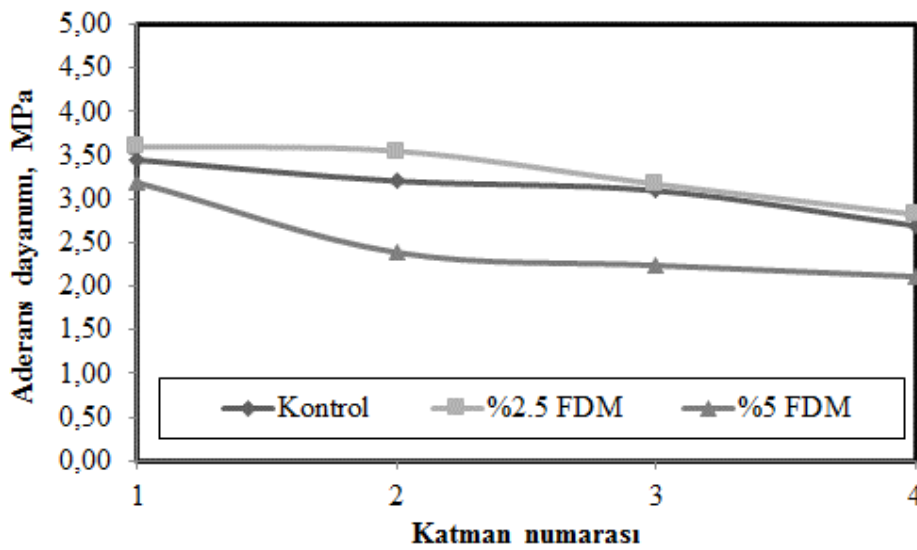
Şekil 4.24 Kapsülsüz FDM katkılı deney numunelerinin eğilme dayanımı sonuçları.

#### 4.2.2.3 Aderans Dayanımı

Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı (%0, %2.5, %5) çimento esaslı deney numunelerinin aderans dayanımı sonuçları kontrol numune ile karşılaştırıldığında tüm katmanlar için en yüksek aderans dayanımı %2.5 FDM katkılı numunelerde, en düşük aderans dayanımı %5 FDM katkılı numunelerde elde edilmiştir (Şekil 4.25).

Kontrol ve FDM katkılı 3D baskı deney numunelerinin tamamında en alttaki katmandan yukarıya doğru aderans dayanımının azaldığı görülmektedir. Temas yüzeyine yeni basılan katman ile birlikte kuvvet uygulanır ve bitişik katmanlar yakın temasa zorlanır. Bu da katmanlar arası bağ yapısının sıkıştırılmasına ve kusurların azalmasına neden olur ve böylece alttaki katmanlar arası aderans dayanımı artar.

3D baskı yazıcı da çimento esaslı harç ile yazdırılacak geometrinin oluşturulması her katmanın kendi kendini taşıması tekniğine dayanmaktadır. Bununla birlikte, 3D baskı yazıcıda kullanılacak olan çimento esaslı malzemelerin üretim yöntemine ve katkı malzemesine bağlı özel reolojik davranış göstermesinden dolayı farklı bir arayüz oluşmaktadır. Basılı numunenin, normal sıkıştırılmış numuneye göre daha zayıf katmanlar arası arayüze sahip olduğu ve bunun da 3D baskılı betonun mekanik performansını düşürdüğü bilinmektedir (Scrivener vd. 2019).

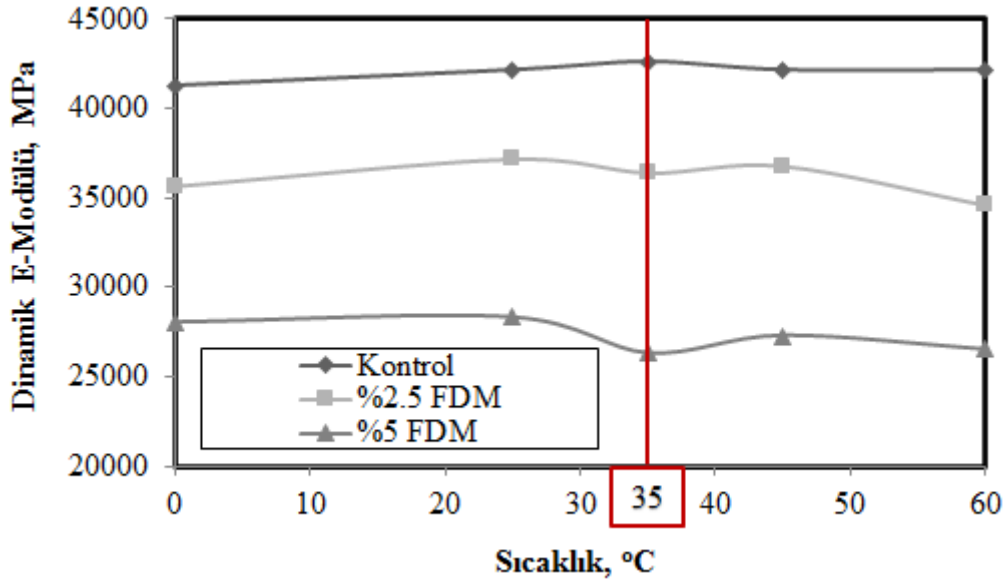


Şekil 4.25 Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı 3D baskı numunelerinin aderans dayanımı.

#### 4.2.2.4 Dinamik Elastisite Modülü

Deney numunelerinin E-modülünün sıcaklığa bağlı değişimi incelendiğinde, tüm sıcaklık değerleri için kontrol numunelerin dinamik E-modüllerinde bariz bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir.

Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı numunelerde ise geçiş sıcaklığı olan 35 °C sıcaklık değerine kadar mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı numunelerin E-modülü değerleri azalırken, 35-45 °C sıcaklık değeri arasında bir yükselme 45-60 °C arasında tekrar düşüş olmuştur (Şekil 4.26).



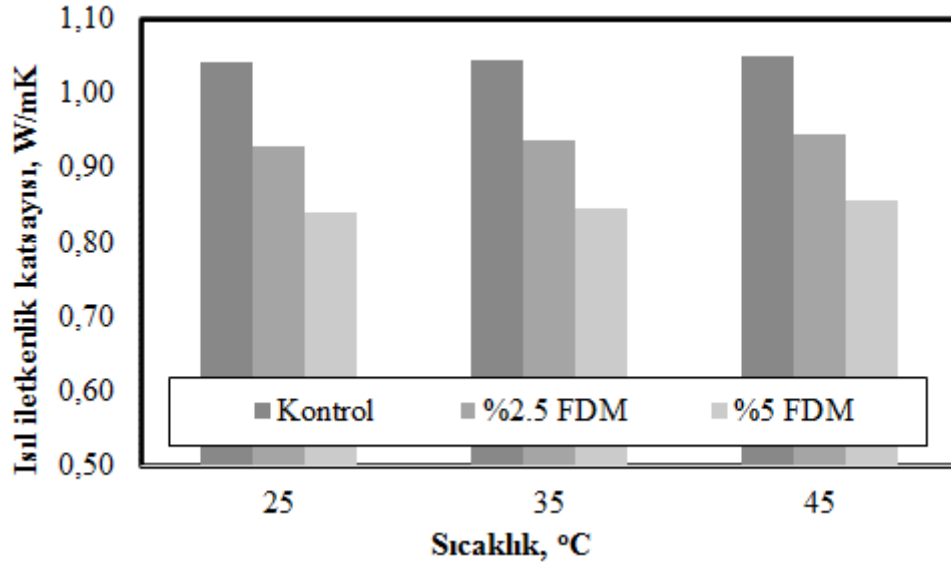
Şekil 4.26 Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı çimento esaslı numunelerin dinamik E-modülünün sıcaklıkla değişimi.

#### 4.2.3 Isıl Özellikler

##### 4.2.3.1 Isıl İletkenlik

Faz değiştiren malzeme katkılı harçların ısıl özelliklerinden biri olan ısıl iletkenlik katsayıları sıcaklığa bağlı olarak değişimleri Şekil 4.27’de verilmiştir. Isıl iletkenlik deneyleri 0 °C, 40 °C ve 50 °C’de gerçekleştirilmiştir. Kontrol numuneyle

karşılaştırıldığında mikrokapsüllenmiş FDM katkılı numunelerin farklı sıcaklık değerlerinde ölçülen ısı iletkenlik değerlerinde önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Eddhahak-Ouni vd. (2014), tarafından yapılan çalışmada da %0-5 oranında FDM içeren betonun sıcaklığa bağlı ısı iletkenliği araştırılmış ve çalışma sonucunda faz değiştiren malzeme katkılı numunelerin ısı iletkenlik değerinde sıcaklıkla birlikte yaklaşık %3 azalma kaydedilerek benzer sonuçlar elde edilmiştir. Diğer taraftan kontrol harcına faz değiştiren malzeme ilavesi ile tüm sıcaklık değerlerinde ısı iletkenlik katsayılarının azaldığı görülmüştür. Kontrol numunelerinin ısı iletkenlik değerleri 1.04 W/mK iken, %2.5 ve %5 faz değiştiren malzeme eklendiğinde mikro betonun ısı iletkenlik değerleri yaklaşık %10 ve %19 azalarak, sırasıyla 0.93 ve 0.84 W/mK'ye ulaşmıştır.

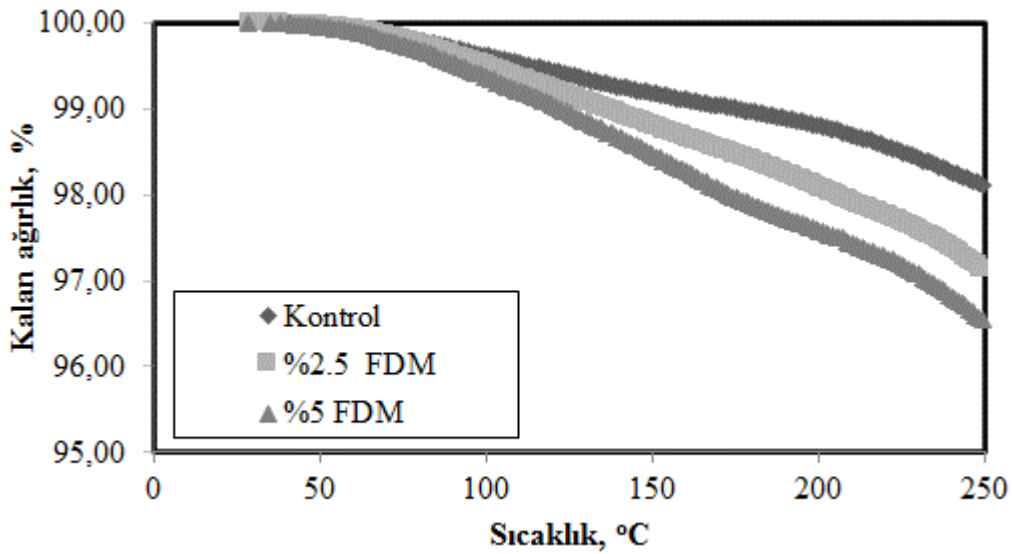


Şekil 4.27 FDM katkılı çimento esaslı harcın sıcaklığa bağlı ısı iletkenliği.

#### 4.2.3.2 DSC-TGA Analizleri

Faz değiştiren malzeme geçiş sıcaklığı olan 35 °C'de başlatılan deney sonuçlarında oluşan başlangıçtaki kütle kayıplarının numune bünyesinde bulunan nem kaybından kaynaklı olduğu kabul edilirse, sonrasında oluşan kayıplar faz değiştiren malzeme katkılı ve katkısız numunelerin farklı davranışlara sahip olduğunun göstergesi olmaktadır. Hem kontrol numunelerinde hem de faz değiştiren malzeme katkılı numuneler de bozunmanın tek bir aşamada gerçekteştiği gözlemlenmiştir.

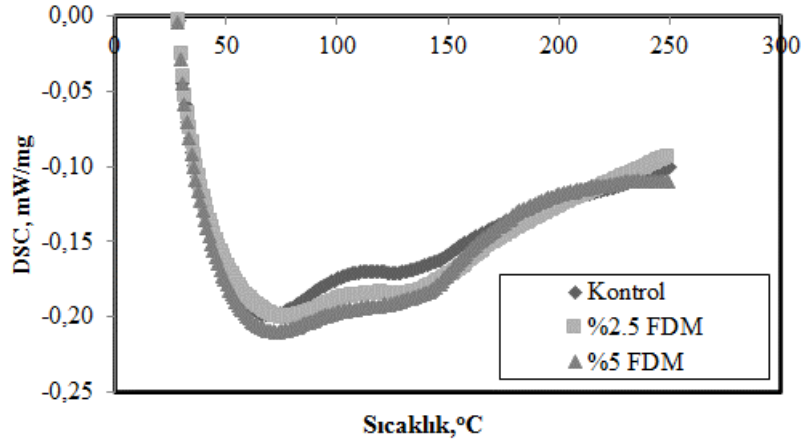
Kontrol ve faz değiştiren malzeme katkıli numunelerdeki kütle kaybı en yüksek sıcaklık değeri olan 250 °C'ye ulaşıldığında, kontrol numunede yaklaşık olarak %2; mikrokapsüldeki bozunmadan kaynaklı %2.5 faz değiştiren malzeme katkıli numunede %3; ve %5 faz değiştiren malzeme katkıli numunede %4 olmuştur. Çimento esaslı harç içerisindeki faz değiştiren malzeme katkı oranı arttıkça kütle kaybının da arttığı görölmektedir (şekil 4.28).



şekil 4.28 Mikrokapsülennmiş FDM katkıli çimento esaslı deney numunelerinin TGA analizi.

Sarcinella vd. (2023) de yaptıkları araştırmada benzer sonuçlar bildirmiştir; yani C-S-H'nin dehidrasyonu ve CH'nin dehidroksilasyonu 35 °C ile 540 °C aralığında gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, polimerik bir malzeme olan faz değiştiren malzemenin yüksek sıcaklıklarda harcın diğer bileşenlerine göre daha fazla ayrışarak ağırlık kaybına neden olmasıdır.

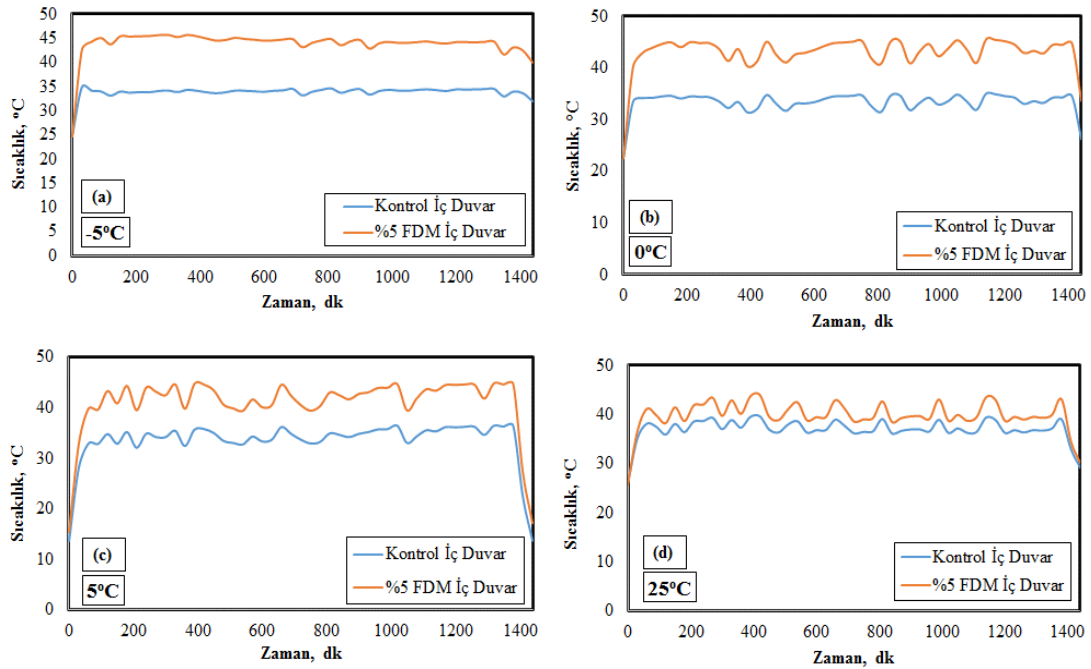
DSC (diferansiyel taramalı kalorimetre) analizinde numuneden gelen veya çıkan ısı akışının zamanla değişimi sıcaklığa bağlı güç farkı olarak kaydedilmektedir. Mikrokapsülennmiş faz değiştiren katkıli malzemelerde elde edilen ısı kapasitesi değişimi nedeniyle taban çizgisinin yer değiştirmesine yol açan camsı geçiş 35 °C, kristalizasyonu 65 °C ve son olarak ta erimesi 250 °C sıcaklık değerlerinde üç faz değişimi şeklinde gerçekleşmiştir ( şekil 4.29).



Şekil 4.29 Mikrokapsülennmiş FDM katkılı çimento esaslı deney numunelerinin DSC analizi.

#### 4.2.3.3 Enerji Performansı

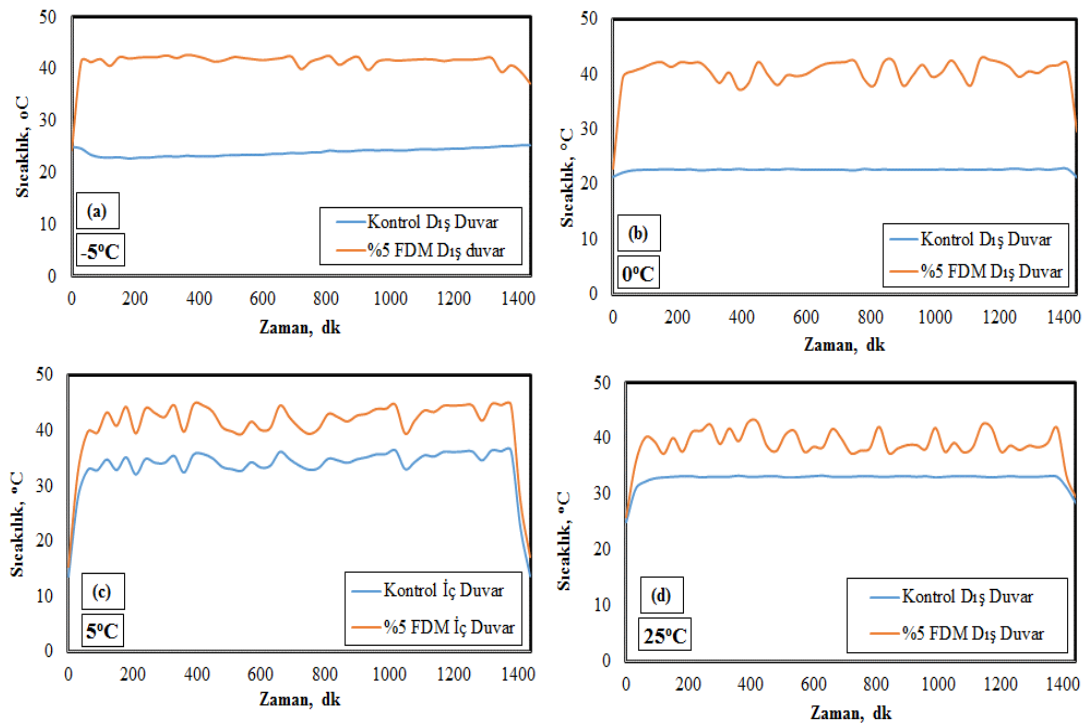
Kontrol ve %5 FDM katkılı numunelerden elde edilen model harç kutuların iklimlendirme kabini kullanılarak -5, 0, 5 ve 25 °C sıcaklık değerleri için 24 saat boyunca kaydedilen iç duvar yüzey sıcaklık değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi, Thermal History (T-History) deney yöntemiyle belirlenerek Şekil 4.30’da karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.30 Kontrol ve FDM’li model harç kutularının iç duvar yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması (a: -5 °C; b: 0 °C; c: 5 °C; d: 25 °C).

Dış ortam sıcaklığı 24 saat boyunca -5, 0, 5 ve 25 °C’de sabit tutulurken %5 faz değiştiren malzeme katkılı model harç kutusunun kontrol kutuya göre sıcaklık değeri farkı gün içinde ortalama olarak sırasıyla iç duvarda %29, %25, %22 ve %8 olarak ölçülmüştür.

Dış duvar yüzeyinde dış ortam sıcaklığı 24 saat boyunca -5, 0, 5 ve 25 °C’de sabit tutulurken %5 faz değiştiren malzeme katkılı model harç kutusunun kontrol kutuya göre sıcaklık değeri farkı gün içinde ortalama olarak sırasıyla %41, %78, %49 ve %18 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.31).

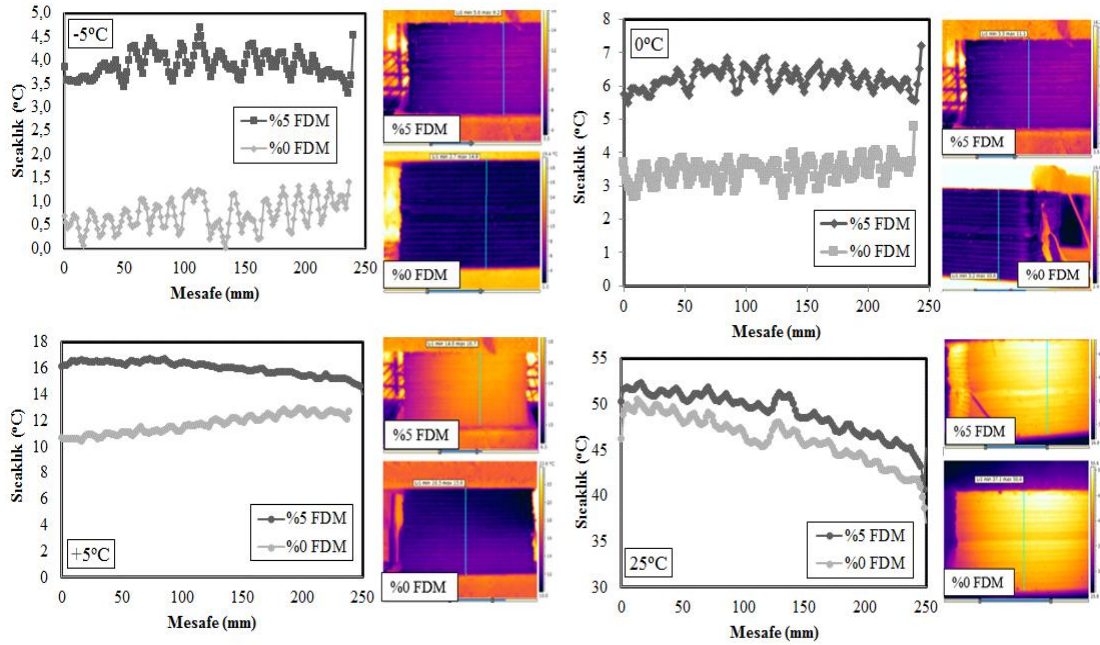


**Şekil 4.31** Kontrol ve FDM’li model harç kutularının dış duvar yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması (a: -5 °C; b: 0 °C; c: 5 °C; d: 25 °C).

İç ve dış duvar yüzeyleri karşılaştırıldığında en yüksek sıcaklık değeri farkı iç duvar yüzeyinde -5 °C’de, dış duvar yüzeyinde 0 °C’de elde edilmiştir. 25 °C ortam sıcaklığında hem iç hem de dış duvar yüzeyinde sıcaklık farkı en düşük değeri almıştır.

Model harç kutularının duvarları 25 mm kadar ince olmasına rağmen %5 faz değiştiren malzeme kullanıldığında kontrol duvarlarına göre ortalama %68 civarında sıcaklık farkı oluşmuştur.

Kontrol ve %5 faz değiştiren malzeme içeren model harç kutularının -5, 0, 5, ve 25  C ortam sıcaklıkları için kutu yüksekliği boyunca yüzey sıcaklık değerlerindeki değişim termal kamera ile ölçülüp Şekil 4.32’de karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.32** Kontrol ve FDM’li model harç kutularının yüksekliği boyunca sıcaklığının karşılaştırılması (a: -5 C; b: 0 C; c: 5 C; d: 25 C).

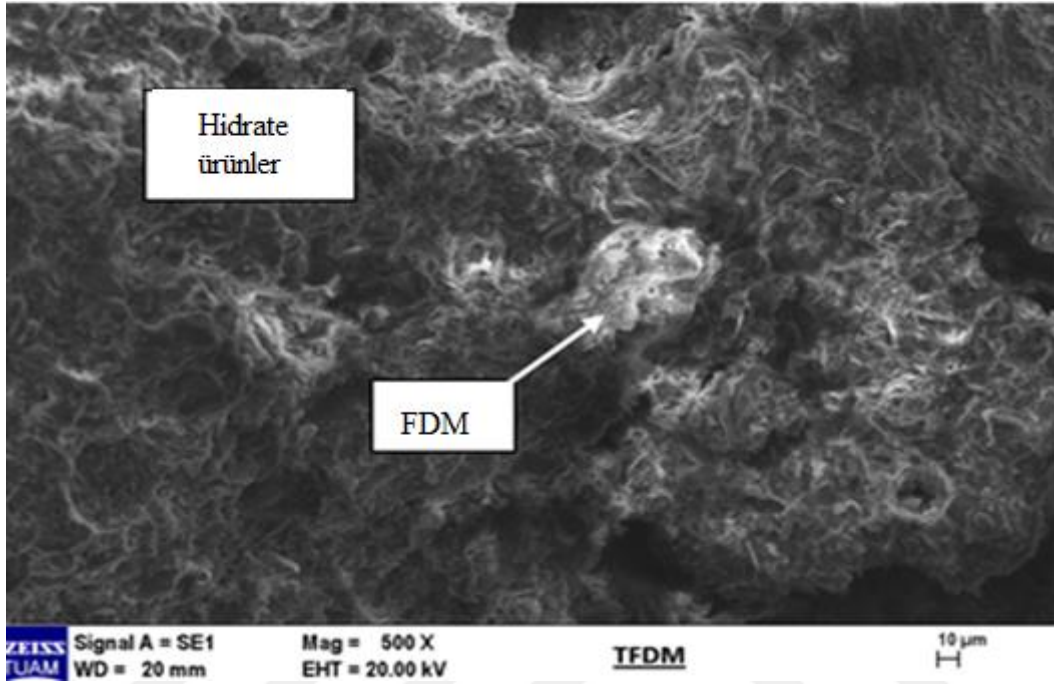
Faz değiştiren malzeme oranı %5 olan model kutu yüzeyinde kontrol model kutu yüzeyine göre -5, 0, 5 ve 25  C ortam sıcaklıkları için sırasıyla %81, %45 %27 ve %6 sıcaklık farkı oluşmuştur. Kontrol ve %5 faz değiştiren malzeme içeren model kutu yüzeyindeki sıcaklık farkı ortam sıcaklığının artışına bağlı olarak azalmıştır. Çimento esaslı harca faz değiştiren malzeme ekleyerek, faz değiştiren malzemenin dış sıcaklığa göre faz geçişi yeteneği nedeniyle ısıl davranışı değiştirilebilmektedir. Bu nedenle, uygun FDM’nin beklenen dış sıcaklıklara, yani bir coğrafi bölgeye özgü iklim koşullarına göre seçilmesi gerektiği sonucuna varılabilir (Liu vd. 2022).

## 4.2.4 Mikroyapı  zelikler

### 4.2.4.1 Mikroyapı Analizi

Çimento esaslı harç içerisindeki hidrate ürünlerin ve faz değiştiren malzemelerin dağılımını görüntülemek %5 faz değiştiren malzeme katkılı numuneden küçük bir parça

alınarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Faz değıştiren malzeme katkılı harçların mikroyapılarına bakıldığında agrega ve mikrokapsüllenmiş faz değıştiren malzeme çevresinde çimento hidratasyon ürünleri görülmektedir (Resim 4.4).



**Resim 4.4** FDM katkılı çimento esaslı harç mikroyapısı.

Faz değıştiren malzemedeki mikrokapsüllerinin matris içerisinde iyi ve homojen bir dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Taze betonun karıştırılması veya sıkıştırılması sırasında faz değıştiren malzemedeki ortaya çıkabilecek hasara dair doğrudan bir bulguya rastlanmamıştır. Ancak konu ile ilgili yapılan farklı çalışmalar incelendiğinde mikrokapsüllenmiş olarak kullanılan faz değıştiren malzemelerin kapsüllenmesi sırasında oluşabilecek farklılıklardan dolayı numune içerisinde benzer davranışlar sergilemediği de anlaşılmaktadır. Araştırmalarda faz değıştiren malzeme içeriğinin artması durumunda fazla sayıda dahil edilmiş mikrokapsüllenmiş malzemedeki kabuğun parçacığı kırılabileceğini ve bu durumun matrisin gözenekliliğinde bir artışa neden olacağını belirtilmiştir.

Bununla birlikte faz değıştiren malzemelerin kopma veya hasar olmaksızın iyi bir bütünlük göstermesinden dolayı mikrokapsüller harç karıştırma, uygulama ve kütleme işlemlerine yeterince direnç gösterebilmektedir (Aguayo vd. (2016).

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yapılan bu tez çalışmasında, 3D baskı yazıcıda kullanılacak çimento esaslı harçlara faz değiştiren malzeme ilave edilerek, bu harçların mühendislik özelliklerinin araştırılması hedeflenmiştir. Çalışma süresince faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı 3D baskı harçların fiziksel, mekanik ve ısıl özelliklerindeki değişimler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

- Mikrokapsüllenmiş ve kapsülsüz faz değiştiren katkılı (%0, %2.5, %5) çimento esaslı harçların yayılma değerleri incelendiğinde kapsülsüz FDM'lerde mikrokapsüllenmiş FDM'lere göre daha yüksek yayılma çapı değeri elde edilirken kontrol harçlara göre tüm FDM katkılı harçların yayılma çapının azaldığı gözlenmiştir. Kapsülsüz FDM katkılı harçların yayılma çapları mikrokapsüllenmiş FDM katkı içeren harçlara göre %3 oranında daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. Lecompte vd. (2019) yaptıkları çalışma da benzer sonuçlar elde ederek, çimento esaslı harca FDM ilave edilmesi durumunda kontrol harçtaki yayılma değerlerini elde edebilmek için harca ağırlıkça FDM'nin %10'u kadar ilave su eklenmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. Su talebindeki artış, mikrokapsüllerin polimerik kabuğu ve mikrokapsüllerin hidrojen bağları tarafından suyun emilmesiyle ilişkilendirilmiştir. Bununla birlikte Vieira vd. (2014), çimento esaslı harca FDM'lerin küresel parçacıklar şeklinde eklenmesi ile yüzey sürtünmesi önemli ölçüde azalacağı için, zamanla kontrol harçlara benzer işlenebilirlik sağlayabileceğini belirtmişlerdir.
- 3D baskı yazıcı da kullanılacak nozul uç şeklinin belirlenebilmesi ve ekstrüde edilebilirliği sağlayan s-ç oranını tespit etmek için yapılan ekstrüzyon cihazı deneylerinde ekstrüzyon hızı değerlerinin artmasıyla tüm s-ç oranlarındaki harçların akış uzunluğu da düzenli bir şekilde artmıştır. Tüm şekil değiştirme hızları için düşük s-ç oranlarında (0.33 ve 0.35) yakın değerler elde edilirken, s-ç oranının 0.37 olması durumunda harçların tanecikleri arasındaki iç sürtünmenin azalmasıyla daha düşük görünen viskozite değerleri elde edilmiştir. Ekstrüzyon hızının düşük olması, baskı sırasında harcın yavaş itilmesine, harç birim ağırlığı ile yerçekimi etkisiyle de belirli aralıklarla koparak akmasına neden olmaktadır.

Dikdörtgen kesitli uçlarda kesit alanının artması nedeniyle dairesel uçlara göre daha az akış uzunluğu elde edilmiştir. Paul vd (2018) benzer bir çalışmada nozul boyutu ve şeklinin ekstrüde edilebilirlik üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Nozul boyutu ne kadar büyükse, desteklenmesi gereken sonraki katmanların ağırlığı da o kadar fazla olmaktadır. Dairesel nozullarla basılan katmanlar arasında daha fazla temas alanı sağlandığı, dikdörtgen nozullarla basılan betona kıyasla dayanımda bir miktar azalmaya yol açtığı sonucunu elde etmişlerdir. Ancak dairesel nozulun farklı dönüş açılarında yazdırmada ve karmaşık geometrileri basma işleminde daha uygun olması nedeniyle 3D baskı yazıcıda öncelikle tercih edildiği vurgulanmıştır. Tran vd. (2021)'de düşük s-ç oranının yüksek viskoziteye sahip karışımlar elde edilmesini sağlarken nozulda tıkanmalara yol açabileceğini belirtmişlerdir. Bu kriterler değerlendirildiğinde 3D baskı yazıcıda kullanılacak en uygun nozul ucunun dairesel uç, s-ç oranının ise 0.37 olduğu sonucuna varılmıştır.

- Mikrokapsüllenmiş ve kapsülsüz FDM katkılı çimento esaslı harçların görünen viskozite değerlerine bakıldığında, harç karışımların tamamında şekil değiştirme hızının arttırılmasıyla birlikte görünen viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Kontrol numunede katkılı numunelere göre bütün şekil değiştirme hızları için daha düşük viskozite değeri elde edilmiştir. Mikrokapsüllenmiş ve kapsülsüz FDM katkılı numunelerde katkı oranı artışı viskozitenin de artmasına neden olmuştur. Ayrıca kapsülsüz FDM katkılı numunelerin mikrokapsüllenmiş FDM katkılı numunelere göre daha düşük viskoziteye sahip oldukları görülmüştür. Sonuçlar Liu vd. (2018) yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçlar ile örtüşmektedir. Liu vd. (2018) viskozitenin FDM katkılı harçlarda kontrol harca göre artmasını, mikro ölçekli katkıların parçacık boyutunun çimento parçacığı boyutundan çok daha küçük olmasına ve bunun sonucunda çimento parçacıkları arasındaki aralıkların azalması ile birlikte sürtünmenin artmasına dayandırmaktadır .
- FDM katkılı harç numunelerde gerçekleştirilen ultrases deney sonuçlarına bakıldığında kontrol numuneye göre biraz daha düşük UPV değerleri elde

edilmiştir. Kontrol numunelerin UPV değerlerinde 20 °C sıcaklık değerine kadar artış, sonraki sıcaklık değerlerinde belirgin bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Mikrokapsüllenmiş FDM içeren harçların UPV değerlerinde geçiş sıcaklığı olan 35 °C'deki artış, FDM'nin katı fazdan sıvı faza geçerken ultrasonik iletimin azalması ile gerçekleşmiştir. Ameri vd. (2019)'de, FDM katkılı numunelerin UPV değerlerinin sıcaklıkla birlikte azalmasını harçtaki süreksizliklere, yani artan gözenekliliğin ve mikro çatlakların gelişimine, geçiş sıcaklığından sonraki 35-45 °C sıcaklık aralığındaki artışı da FDM'nin faz değişikliğine bağlamışlardır.

- Çimento esaslı harç numunelerinin farklı frekans değerlerinde elektriksel özdirençleri frekans artışına bağlı olarak azalma gerçekleşmiştir. Tüm sonuçlar incelendiğinde frekans değerine bağlı olarak en yüksek elektriksel özdirenç 0.1 kHz frekans için kontrol numunesinde, en düşük değer de 100 kHz frekans için %5 mikrokapsüllenmiş FDM katkılı numunede elde edilmiştir. Harç içerisinde mikrokapsüllenmiş FDM oranı arttıkça elektriksel özdirenç azalmakta, kapsülsüz FDM oranı arttığında ise artmaktadır. Memon vd. (2014)'ne göre FDM katkının ortamın pH değerini azaltması da direnç değerlerinin azalmasında etkili olmuştur. Numunelerin sıcaklığa bağlı direnç değerleri, sıcaklık değeri faz değiştiren malzemenin geçiş sıcaklığı olan 35 °C'ye ulaştığında, FDM katkılı numunelerde yeniden artışa geçerken kontrol numunelerde bir değişiklik olmamıştır.
- Boşluk oranı ve su emme değerleri incelendiğinde tüm FDM katkılı numunelerde kontrol numuneye göre azalma meydana geldiği görülmüştür. FDM'ler gözeneksiz yapılarıyla karakterize edilir ve bu da kontrol harçlardan daha düşük gözenekliliğe sahip olmasına neden olur. Senthamarai vd. (2011) aynı noktaya dikkat çekerek kontrol harçlardaki su emme değerlerinin azalmasını, FDM'lerin boşluklara nüfuz etmesi ve kompozitin birincil su emici bileşeni olan çimento harcının gözenekli içeriğinin seyreltilmesi olarak belirtmişlerdir. FDM katkılı numuneler kendi aralarında karşılaştırıldığında mikrokapsüllenmiş FDM'li numunelerde kapsülsüz FDM'li numunelere göre boşluk oranı ve su emme değerleri daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum mikrokapsüllenmiş FDM'nin kapsül kabukları içerisinde hapsolması nedeniyle çimento matrisi içinde daha küçük boşlukları dolduramamasından kaynaklanmaktadır.

- Faz değiştiren malzemenin imento esaslı harca ilave edilmesiyle elde edilen harçların mekanik performansında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Tüm FDM tiplerinde katkı oranının artması ile birlikte basınç dayanımında azalma olmuştur. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımları kontrol numuneyle karşılaştırıldığında mikrokapsüllenmiş FDM (%2.5, %5) katkılı numunede %38 ve %44 oranında, kapsülsüz FDM (%2.5, %5) katkılı numunede %24 ve %33 oranında kayıp gözlenmiştir. Yine aynı şekilde eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde tüm katkılı numunelerde kontrol numuneye göre daha az dayanım elde edilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımı kontrol numuneye göre, mikrokapsüllenmiş FDM katkılı numunelerde %18 ve %27, kapsülsüz FDM katkılı numunelerde %8 ve %10 oranında azalmıştır. Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı imento esaslı harçlarda dayanım azalmasının nedeni olarak Dehdezi vd. (2013), karıştırma işlemi sırasında FDM kapsüllerinin kabuklarının kırılmasını göstermişlerdir. FDM kapsüllerin kabuklarının kırılmasıyla birlikte FDM sızıntısından dolayı boşluklar oluştuğunu ve bunun da dayanım kaybına neden olduğunu, FDM'nin ağırlıkça %20'den fazla eklenmemesi gerektiğini belirtmişlerdir. Yine benzer bir sonuç Nepomuceno vd.'nin (2014) yaptığı çalışmada elde edilmiştir. Nepomuceno vd. (2014) FDM harca eklendikten sonra taze betonun kürlenme süreci sırasında kabuğu kırılan FDM ile oluşan reaksiyonun çimentonun hidrasyonunu geciktirdiğini ve bunun sonucunda dayanımın azaldığını göstermişlerdir.
- Mikrokapsüllenmiş FDM katkılı numunelerin katkı oranındaki artışa bağlı olarak Dinamik E- modül değerinde %14 ve %32 oranında azalma gözlenmiştir. Faz geçiş sıcaklığı olan 35 °C sıcaklık değerinde E-modülü değerinde artış olurken sıcaklığın artması ile 45-60 °C arasında tekrar azalma olmuştur.
- FDM katkılı (%0, %2.5, %5) imento esaslı deney numunelerinin aderans dayanımı sonuçlarını incelediğimizde en alt katmanda (1) kontrol numunede 3.5 MPa, %2.5 FDM katkılı numunede 3.7 MPa ve %5 FDM katkılı numunede 3.2 MPa; en üst katmanda (4) kontrol numunede 2.8 MPa, %2.5 FDM katkılı numunede 3 MPa ve %5 FDM katkılı numunede 2.2 MPa dayanım belirlenmiştir.

Tüm katmanlar için en yüksek aderans dayanımı %2.5 FDM katkılı numunelerde, en düşük aderans dayanımı %5 FDM katkılı numunelerde elde edilmiştir. Kontrol ve FDM katkılı 3D baskı deney numunelerinin tamamında en alttaki katmandan yukarıya doğru aderans dayanımının azaldığı görülmektedir. Pan vd. yaptığı çalışma da bu sonucu desteklemektedir. Pan vd. (2022) baskı katmanının önceki basılan katmanlar üzerine birikmesi sonucunda iki katman arasında oluşan temas yüzeyi kuvvetleri ile katmanlar arası aderans dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir.

- FDM katkılı harçların sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik katsayıları incelendiğinde, ısı iletkenlik değerlerinde belirgin bir farklılık olmamakla birlikte kontrol harcına FDM ilavesi ile tüm sıcaklık değerlerinde ısı iletkenlik katsayılarının bir miktar azaldığı görülmüştür. Kontrol numunelerinin ısı iletkenlik değerleri %2.5 ve %5 FDM eklendiğinde yaklaşık %10 ve %19 azalarak, sırasıyla 0.93 ve 0.84 W/mK değerlerini almıştır. Velez vd. (2015) çalışmalarında erime sıcaklığına yakın bir yerde gözlemlenen ısı iletkenlikteki düşüşün nedenini tipik bir birinci dereceden faz geçişi olan FDM çekirdeğinin yoğunluğundaki değişim olarak belirtmişlerdir.
- TGA ve DSC analizlerini birlikte değerlendirdiğimizde mikrokapsüller ilk değişimi 35 °C-65 °C sıcaklık aralığında kütle kaybına yol açan ekzoterm bir pik ile yapmaktadır. Sharma vd. (2009) benzer değişimi gözlemlemişler ve bunu kimyasal bağlı suyun yapıdan uzaklaşması ile açıklamışlardır. İkinci değişim 65 °C-150 °C ve üçüncü değişim 150 °C-250 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmekte olup endoterm pik vermektedir. Bu değişim faz değiştiren malzeme parçacıklarının akrilik kabuğunun ayrışmasından dolayı gerçekleşmektedir. Faz değiştiren malzeme katkılı harcın 250 °C'da toplam kütle kaybı, en yüksek değerine %5 FDM katkılı harçlarda ulaşmıştır. FDM katkı oranı arttıkça sıcaklık artışına bağlı olarak kütle kaybında da artış meydana gelmektedir. Pires vd. (2013) bu durumu, yağ/su emülsiyonunu stabilize etmek için kullanılan yüzey aktif madde gibi mikrokapsülleme sürecinde kullanılan katkı maddelerinin bozulmasına bağlamışlardır.

- 3D baskı yazıcıda yazdırılan kontrol ve %5 FDM katkılı model kutuların iklimlendirme kabini içinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen zaman-sıcaklık eğrilerine bakıldığında, kontrol model duvarlarına göre faz değiştiren malzeme katkılı model duvar kutularda 25 mm inceklkteki duvarlara rağmen %68 civarında sıcaklık farkı elde edilmiştir. Konfor sıcaklıkları aralığının dışında daha yüksek bir depolama ve salınım enerjisinin ortaya çıkması faz değiştiren malzeme etkisinin doğrulanmasını sağlamaktadır. Abd Razak vd. (2020) yaptıkları çalışmaya göre de kontrol kutusu elemanlarında üretilen ısı, duvar vasıtasıyla dış ortama aktarılmaktadır. Diğer taraftan faz değiştiren malzeme takviyeli duvar elemanlarında üretilen ısı, duvar üzerinden aktarılırken faz değiştiren malzemeler tarafından tutulmuş ve ısı faz değiştirerek depolanmıştır. Bu nedenle duvar yüzey sıcaklık değerleri kontrol duvar yüzeylerine göre daha yüksek çıkmıştır.
- Kontrol ve %5 FDM içeren model harç kutularının farklı ortam sıcaklıkları için kutu yüksekliği boyunca yüzey sıcaklık değerlerindeki değişim karşılaştırıldığında, %5 FDM model kutu yüzeyinde kontrol model kutu yüzeyine göre , -5, 0, 5 ve 25 °C ortam sıcaklıkları için sırasıyla %81, %45, %27 ve %6 sıcaklık farkı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara paralel olarak Kheradmand vd. (2014) yaptıkları çalışmada faz değiştiren malzemenin iç kaplama harçlarında kullanılmasının enerji tüketimini, enerji talebini ve ısıtma-soğutma sistemleriyle ilişkili çevresel etkiyi azaltabileceği sonucuna varmışlardır.
- Mikroyapı incelemesi sonucunda çimento esaslı harç içerisindeki faz değiştiren malzemelerin tüm bileşenler ile arasında iyi bir etkileşim olduğu görülmektedir. Özellikle faz değiştiren malzemeler kapsül kabuğunda çatlakların olmaması mikrokapsüllerin dirençli olmasına dayanak sağlamaktadır. Benzer sonucu Meshgin vd. (2012)'de mikrokapsüllerin çevresindeki çimento hamuru ile arasındaki ara yüzey bağının çok iyi olduğunu görüntüleyerek elde etmişlerdir. Öte yandan, harçlara eklenen faz değiştiren malzemenin harç matrisi üzerinde bir kaplama oluşturarak kompakt bir mikro yapıya sahip olduğunu kanıtlamışlardır.

Çimento esaslı harçlara faz değiştiren malzeme eklenerek yapılan çalışmalar tamamlandığında mikrokapsüllenmiş ve kapsülsüz faz değiştiren malzemelerin harçların işlenebilirliğini azalttığı grlmştir. Bir harcın dayanımı, daha kompakt malzemelerin daha yüksek dalga yayılma hızları ve direnç değerleri sunduğu ilkesine dayanarak tahmin edilebilmektedir. Bu çalışmanın önemli bulgularından biri de UPV ve elektriksel özdirenç değerlerinin ölçülmesiyle FDM katkılı harçların farklı sıcaklıklardaki faz değişim özelliklerinin de elde edilebileceğidir. Mekanik zellikler açısından değerlendirdiğimizde kullanılan FDM ve miktarına bağlı olarak dayanımda artma ve azalma meydana gelebilmekte, ancak azalmanın binalarda gizli ısı depolama için gerekli faz değiştiren malzeme kullanımını engelleyecek düzeyde olmadığı sonucuna varılmıştır. 3D baskı yazıcıda kullanılacak imento esaslı harçlarda mikrokapsüllenmiş FDM kullanımı, binaların ısı yalıtımını geliştirme ve enerji kullanımını azaltma da oldukça etkili olduğu grlmştir.

## **6. KONU İLE İLGİLİ YAPILABİLECEK ALIşMALAR**

3D Baskı otomatik yapı üretim tekniğinin büyük ölçekli karmaşık yapıları daha az işçilik ve malzeme ile kısa sürede üretme potansiyeline sahip olduğu kabul grmştir. Ancak yapılan çalışmalar dayanım ve dayanıklılık açısından geleneksel inşaat yöntemi ile rekabet edecek noktada olmadığını ortaya koymuştur. Bu açıdan, gelecekte konuyla ilgili yapılabilecek çalışmalar öneri halinde sunulmuştur.

3D baskı betonda kullanılacak farklı harç karışım tasarımlarının sürekli geliştirilmesi, 3D baskı yapı elemanlarının mekanik özelliklerinin karşılaştırılması ve modellenmesi için standart deneyler üzerinde çalışmalar yapılabilir. 3D baskı yazıcıda kullanılacak imento esaslı harçlara katkı olarak kullanılan FDM'lerin kapsüllenmesini geliştirmek, harçlardaki dayanım kaybını azaltmak ve dayanıklılık sorunlarının üstesinden gelmek için enerji verimli ve düşük maliyetli yöntemler üzerinde çalışılmalıdır. Yapı retiminde uygulanacak FDM'lerin geleneksel yöntemle birlikte kullanılması ile ilgili ekonomik ve çevresel değerlendirmelere de odaklanması gerekmektedir. Çünkü bu konulardaki güncel durum henüz yeterli değildir. Sahada tam ölçekli yapı üretimi esnasında yapılacak deneyler ile FDM'nin gerçek performansı değerlendirilmelidir. FDM'li ve FDM'siz yapıların davranışını önceden belirlemek için sayısal modellemeler geliştirilebilir.

## 7. KAYNAKLAR

- Abd Razak R, Zhe A C K, Abdullah M M A B, Yahya Z, Junaidi S, Muhamad K, Mortar N A M, 2020, Paraffin as a phase change material in concrete for enhancing thermal energy storage. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 743(1), 012012.
- Abu Bakar N N, Hassan M Y, Abdullah H, 2015, Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: a review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 44, 1-11.
- Aguayo M, Das S, Maroli A, Kabay N, Mertens J C, Rajan S D, Sant G, Chawla N, Neithalath N, 2016, The influence of microencapsulated phase change material (PCM) characteristics on the microstructure and strength of cementitious composites: Experiments and finite element simulations, *Cement and Concrete Composites*, 73, pp.29-41.
- Aher S S, Desarda A, Shelke J A, and Chaudhari M, 2015, A review on smart materials: future potentials in engineering, 4(10), 7-16.
- Akeiber H, Nejat P, Majid M Z A, Wahid M A, Jomehzadeh F, Famileh I Z, Calautit J K, Hughes B R, Zaki S A, 2016, A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 60, 1470-1497.
- Alhumayani H, Gomaa M, Soebarto V, Jabi W, 2020, Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete, *J. Clean. Prod.*, 270, 122463.
- Alkhalidi A, Hatuqay D, 2020, Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study, *Journal of Building Engineering*, 30, 101286.
- Allouhi A, El Fouih Y, Kousksou T, 2015, Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends, *J. Clean. Prod.*, 109, 118-130.

- Al-Qutaifi S, Nazari A, Bagheri A, 2018, Mechanical properties of layered geopolymer structures applicable in concrete 3D-printing, *Construction and Building Materials*, 176, 690-699.
- Ameri F, Shoaie P, Zareei S A Behforouz B, 2019, Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars, *Construction and Building Materials*, 222, 49-63.
- Ashima R, Haleem A, Bahl S, Javaid M, Mahla S K, Singh S, 2021, Automation and manufacturing of smart materials in Additive Manufacturing technologies using Internet of Things towards the adoption of Industry 4.0. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5081-5088.
- ASTM C1760, 2012, Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete , ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C642, 2013, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA,.
- Attaran M, 2017, The rise of 3-D printing: the advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, *Bus. Horiz.*, 60, 677-688.
- Azhar S, Carlton W A, Olsen D, Ahmad I, 2011, Building information modelling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Autom Constr.*, 20, 217-224.
- Baduge S K, Navaratnam S, Abu-Zidan Y, McCormack T, Nguyen K, Mendis P, Zhang G, Aye L, 2021, Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods, *Structures*, 29, 1597-1609.
- Bahl S, Nagar H, Singh I, Sehgal S, 2020, Smart materials types, properties and applications: A review, *Materials Today: Proceedings*, 28(3),1302-1306.
- Berardi U, Gallardo A A, 2019, Properties of concretes enhanced with phase change materials for building applications, *Energy Build.*, 199, 402-414.
- Bhattacharjee S, Basavaraj A S, Rahul A, Santhanam M, Gettu R, Panda, B, Schlangen E, Chen Y, Copuroglu, O, Ma G, 2021, Sustainable materials for 3D concrete

- printing, *Cem. Concr. Compos.*, 122, 104156.
- Bock T, 2015, The future of construction automation: technological disruption and the upcoming ubiquity of robots. *Autom Constr.*, 59, 113-121.
- Bos F, Wolfs R, Ahmed Z, Salet T, 2016, Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing, *Virtual Phys. Prototyp.*, 11, 209-225.
- Buchli J, Gifftthaler M, Kumar N, Lussi M, Sandy T, Dorfler K, 2018, Digital in situ fabrication-challenges and opportunities for robotic in situ fabrication in architecture, construction and beyond, *Cem Concr Res.*, 112, 66-75.
- Buswell R A, Leal de Silva W R, Jones S Z, Dirrenberger J, 2018, 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, *Cem. Concr. Res.*, 112, 37-49.
- Cai S, Ma Z, Skibniewski M J, Bao S, 2019, Construction automation and robotics for high-rise buildings over the past decades: a comprehensive review, *Adv Eng Inform.*, 42, 100989.
- Carazo-Álvarez D, Herranz-Colomina P, Aranda-Martínez B, Ruiz-Canales J, 2019, Experimental behaviour of 3D-printed T-stub models, In: *Proc. Of XII Conference in Steel and Composite Construction. Coimbra Portugal: CMM*, 805-814.
- Choi M S, 2014, Numerical prediction on the effects of the coarse aggregate size to the pipe flow of pumped concrete, *J. Adv. Concr. Technol.*, 12(8), 239-249.
- Christopher S, Parham K, Mosaffa A H, Farid M M, Ma Z, Thakur A K, 2021, A critical review on phase change material energy storage systems with cascaded configurations, *J Clean Prod.*, 124653, 283.
- Conner B P, Manogharan G P, Meyers K L, 2015, An assessment of implementation of entry-level 3D printers from the perspective of small businesses, *Rapid Prototyp J.*, 21(5), 582-597.
- Cui H, Tang W, Qin Q, Xing F, Liao W, Wen H, 2017, Development of structural-functional integrated energy storage concrete with innovative macro-encapsulated PCM by hollow steel ball, *Appl. Energy*, 185, 107-118.

- Cunha S R L, Aguiar J L B, 2020, Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge, *Journal of Energy Storage*, 27, 101083.
- Cunha S, Aguiar J B, Tadeu A, 2016, Thermal performance and cost analysis of mortars made with PCM and different binders, *Constr. Build. Mater.*, 122, 637-648.
- Cunha S, Lima M, Aguiar J B, 2016, Influence of adding phase change materials on the physical and mechanical properties of cement mortars, *Construction and Building Materials*, 127, .1-10.
- Czarnowski J, Dabriwski A, Macias M, Glowka J, Wrona J, 2018, Technology gaps in human-machine interfaces for autonomous construction robots. *Autom Constr.*, 94, 179-190.
- Dakhli Z, Chaffar K, Lafhaj Z, 2019, The effect of phase change materials on the physical, *Therm. Mech. Prop. Cem. Sci.*, 1(1), 27, 10.3390.
- Dallasegaa P, Raucha E, Linderb C, 2018, Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: a systematic literature review. *Comput Ind.*, 99, 205–225.
- De Schutter G, Lesage K, Mechtcherine V, Nerella V N, Habert G, Agusti-Juan I, 2018, Vision of 3D printing with concrete-technical, economic and environmental potentials, *Cement Concr. Res.*, 112, 25-36.
- Dehdezi P K, Hall M R, Dawson A R, Casey S P, 2013, Thermal, mechanical and microstructural analysis of concrete containing microencapsulated phase change materials, *International Journal of Pavement Engineering*, 14(5), .449-462.
- Ding T, Xiao J, Qin F, Duan Z, 2020, Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages, *Constr Build Mater*, 248, 118654.
- Djamai Z I, Salvatore F, Larbi A S, Cai G, Mankibi M E, 2019, Multiphysics analysis of effects of encapsulated phase change materials (PCMs) in cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 119, 51-63.
- Duballet R, Baverel O, Dirrenberger J, 2017, Classification of building systems for concrete 3D printing, *Automation in Construction*, 83, 247-258.

- Eddhahak-Ouni A, Drissi S, Colin J, Neji J, Care S, 2014, Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated Phase Change Materials (PCMs), *Applied Thermal Engineering*, 64(1-2), 32-39.
- Fernandes F, Manari S, Aguayo M, Santos K, Oey T, Wei Z, Falzone G, Neithalath N, Sant G, 2014, On the feasibility of using phase change materials (PCMs) to mitigate thermal cracking in cementitious materials, *Cem. Concr. Compos.*, 51, 14-26.
- Figueiredo S C, Rodriguez C R, Ahmed Z Y, Bos D H, Xu Y, Salet T M, Copuroğlu O, Schlangen E, Bos F P, 2019, An approach to develop printable strain hardening cementitious composites, *Materials and Design* 169, 1-17, 107651.
- Gan V J L, Lo I M C, Ma J, Tse K T, Cheng J C P, Chan C M, 2020, Simulation optimisation towards energy efficient green buildings: current status and future trends, *J. Clean. Prod.*, 254.
- Gao W, Zhang Y, Ramanujan D, Zavattieri P D, 2015, The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *CAD Computer Aided Design*, 69, 65–89.
- Geissbauer R, Schrauf S, Koch V, Kuge S, 2014, Industry 4.0: Opportunities and challenges of the industrial internet, *PricewaterhouseCooper Aktiengesellschaft Wirtschaftsprüfungsgesellschaft*, 2(3), 52.
- Ghaffar S H, Corker J, Fan M, 2018, Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution, *Autom. Construct.*, 93, 1-11.
- Ghalambaz M, Chamkha A J, Wen D, 2019, Natural convective flow and heat transfer of nano-encapsulated phase change materials (NEPCMs) in a cavity, *International journal of heat and mass transfer*, 138, 738-749.
- Ghareeb N, Farhat M, 2018, Smart Materials and Structures: State of the Art and Applications. *Nano Tech Appl.*, 1(2), 1-5.
- Gisario A, Kazarian M, Martina F, Mehrpouya M, 2019, Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *J Manuf Syst.*, 53, 124-149.

- Gosselin C, Duballet R, Roux P, Gaudillière N, Dirrenberger J, Morel P, 2016, Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders, *Mater. Des.*, 100, 102-109.
- Hager I, Golonka A, Putanowicz R, 2016, 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction, *Procedia Eng.*, 151, 292-299.
- Hambach M, Rutzen M, Volkmer D, 2019, Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. In *3D concrete printing technology*, Butterworth-Heinemann, 73-113.
- Han Y, Yang Z, Ding T, Xiao J, 2021, Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete, *J. Clean. Prod.*, 278, 123884.
- He Y, Zhang Y, Zhang C, Zhou H, 2020, Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall, *Energy and Buildings*, 222, 110110.
- Christen H, Van Zijl G, Villiers W, 2022, The incorporation of recycled brick aggregate in 3D printed concrete, *Cleaner Materials*, 4, 100090.
- Hossain M U, S T Ng, Antwi-Afari P, Amor B, 2020, Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948.
- Hou S, Duan Z, Xiao J, Ye J, 2021, A review of 3D printed concrete: performance requirements, testing measurements and mix design, *Constr. Build. Mater.*, 273, 121745.
- Huang J, Lv H, Gao T, Feng W, Chen Y, Zhou T, 2014, Thermal properties optimization of envelope in energy-saving renovation of existing public buildings, *Construction and Building Materials* 68, 277–284.
- Huberman N, Pearlmutter D, 2008, A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert, *Energy Build.*, 40(5), 837-848.

- Hunger M, Entrop A G, Mandilaras I, Brouwers H J H, Founti M, 2009, The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials, *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 731-743.
- Huo X, Li W, Wang Y, Han N, Wang J, Wang N, 2018, Chitosan composite microencapsulated comb-like polymeric phase change material via coacervation microencapsulation. *Carbohydr Polym.*, 200, 602-610.
- Illampas R, Rigopoulos I, Ioannou I, 2021, Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar, *Journal of Building Engineering*, 40, 102328.
- Ingham J, Kennedy C J, 2013, Geomaterials under the microscope, *J. Archit. Conserv.*, 19, 178.
- Ismail A, Wang J, Salami B A, Oyedele L O, Otukogbe G K, 2023, Microencapsulated phase change materials for enhanced thermal energy storage performance in construction materials: A critical review, *Construction and Building Materials*, 401, 132877.
- Izadgoshasb H, Kandiri A, Shakor P, Laghi V, Gasparini G, 2021, Predicting Compressive Strength of 3D Printed Mortar in Structural Members Using Machine Learning. *Appl. Sci.*, 11, 10826.
- Izadgoshasb H, Kandiri A, Shakor P, Laghi V, Gasparini G, 2021, Predicting compressive strength of 3D printed mortar in structural members using machine learning, *Appl. Sci.*, 11, 10826.
- Jamekhorshid A, Sadrameli S M, Farid M, 2014, A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 31, 531-542.
- Jandyal A, Chaturvedi I, Wazir I, Raina A, Ul Haq M I, 2022, 3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0, *Sustainable Operations and Computers*, 3, 33-42.
- Jayalath A, Nicolas R S, Sofi M, Shanks R, Ngo T, Aye L, Mendis P, 2016, Properties of cementitious mortar and concrete containing micro-encapsulated phase change materials, *Construction and Building Materials*, 120, 408-417.

- Jayathilakage R, Rajeev P, Sanjayan J G, 2020, Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing, *Constr Build Mater*, 240, 117989.
- 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, *Cem Concr. Compos.*, 104152.
- Jo J H., Jo B W, Cho W, Kim J H, 2020, Development of a 3D printer for concrete structures: laboratory testing of cementitious materials, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14, 1-11.
- Jolin M, Burns D, Bissonnette B, Gagnon F., Bolduc L S, 2009, Understanding the pumpability of concrete, in *Proceedings Shotcrete for Underground Support XI, Engineering Conferences International*.
- Jouhara H, Żabnieńska-Góra A, Khordehghah N, Ahmad D, Lipinski T, 2020, Latent thermal energy storage technologies and applications: A review, *Int J Thermofluids*, 100039, 5-6.
- Karthikeyan M, Ramachandran T, 2014, Review of thermal energy storage of micro- and nanoencapsulated phase change materials,” *Materials Research Innovations*, vol. 18, no. 7, pp. 541-554.
- Kasaeian A, Pourfayaz F, Khodabandeh E, 2017, Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: a critical review, *Energy Build.*, 154, 96-112.
- Kazemian, A, Yuan X, Cochran E, Khoshnevis B, 2017, Cementitious materials for construction-scale 3D printing: laboratory testing of fresh printing mixture, *Construction and Building Materials*, 145, 639-647.
- Khadiran T, Hussein M Z, Zainal Z, Rusli R, 2016, Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 916-928.
- Kheradmand M, Aguiar J, Azenha M, 2014, Assessment of the thermal performance of plastering mortars within controlled test cells *Luso-Brazilian Conference on Sustainable Construction Materials*, 5–7 de Março, Guimarães, Portugal

- Khoshnevis B, 2004, Automated Construction By Contour Crafting -Related Robotics And Information Technologies, Published in Journal of Automation in Construction, 13(1), 5-19.
- Kim M J, Chi H L, Wang X, Ding L, 2015, Automation and robotics in construction and civil engineering. J Intell Robot Syst., 79, 347-350.
- Kloft H, Krauss H W, Hack N, 2020, Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP), Cem Concr Res, 134, 106078.
- Kneifel J, 2010, Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings, Energy Build 42(3), 333-340.
- Kusama Y, Ishidoya Y, 2017, Thermal effects of a novel phase change material (PCM) plaster under different insulation and heating scenarios, Energy Build., 141, 226-237.
- Labonnote N, Rønnquist A, Manum B, Rütther P, 2016, Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities, Automation in Construction, 72(3), 347-366.
- Le T T, Austin S A, Lim A, Buswell R A, Law R, Gibb A G F, Thorpe T T, 2012, Hardened properties of high-performance printing concrete", Cement and Concrete Research, 42(3), 558-566.
- Leal da Silva W R, 2017, 3D Concrete Printing-From material design to extrusion, Danish Technological Institute. <https://www.dti.dk/projects/3d-printed-buildings/36993>.
- Lecompte T, Le Bideau P, Glouannec P, Nortershauser D, Le Masson S, 2015, Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material, Energy and buildings, 94, 52-60.
- Li X, Zhou R, Yao W, Fan X, Flow characteristic of highly under expanded jets from various nozzle geometries, Appl. Therm. Eng., 2017, 125 (C), 240–253.
- Lim S, Buswell R, Le T, Wackrow R, Austin S A, Gibb A G F, Thorpe T, 2011, Development of a viable concrete printing process, In proceeding for 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2011), Seoul, 665-670.

- Liu L, Hammami N, Trovalet L, Bigot D, Habas J P, Malet-Damour B, 2022, Description of phase change materials (PCMs) used in buildings under various climates: a review, *Journal of Energy Storage*, 56, 105760.
- Liu Y, Han J, Li M, Yan P, 2018, Effect of a nanoscale viscosity modifier on rheological properties of cement pastes and mechanical properties of mortars, *Construction and Building Materials*, 190, 255-264.
- Lloret E, Shahab A R, Linus M, Flatt R J, Gramazio F, Kohler M, Langenberg S, 2015, Complex concrete structures: merging existing casting techniques with digital fabrication, *CAD Computer Aided Design*, 60, 40-49.
- Lu B, Qian Y, Li M, 2019, Designing spray-based 3D printable cementitious materials with fly ash cenosphere and air entraining agent, *Constr Build Mater*, 211, 1073-1084.
- Mahadevan M, Francis A, Thomas A, 2020, A simulation-based investigation of sustainability aspects of 3D printed structures, *Journal of Building Engineering*, 32, 101735.
- Malaeb Z, Hachem H, Tourbah A, Maalouf T, El Zarwi N, Hamzeh F, 2019, 3D Concrete Printing : Machine and Mix Design 3D Concrete Printing : Machine And Mix Design, 113-136.
- Manikandan K, Wi K, Zhang X, Wang K, Qin H, 2020, Characterizing cement mixtures for concrete 3D printing, *Manuf. Lett.*, 24, 33-37, 10.1016.
- Mankoc C, Janda A, Arevalo R, Pastor J M, Zuriguel I, Garcimartín A, Maza D, 2007, The flow rate of granular materials through an orifice, *Granular matter*, 9, 407-414.
- Marani A, Nehdi M L, 2019, Integrating phase change materials in construction materials: Critical review, *Constr. Build. Mater.*, 217, 36-49.
- Marani A, Zhang L, Nehdi M L, 2023, Design of concrete incorporating microencapsulated phase change materials for clean energy, A ternary machine learning approach based on generative adversarial networks, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 118, 105652.

- Mechtcherine V, Nerella V N, Kasten K, 2014, Testing pumpability of concrete using sliding pipe rheometer", *Construction and Building Materials*, 53, 312-323.
- Mechtcherine V, Nerella V N, Will F, Näther M, Otto J, Krause M, 2019, Large-scale digital concrete construction-CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing, *Autom. Constr.*, 107, 102933.
- Memon S A, 2014, Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review, *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 870-906.
- Meshgin P, Xi Y, Li Y, 2012, Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar, *Construction and Building Materials*, 28(1), 713-721.
- Meyer Y, Lachat R, Akhras G, 2019, A review of manufacturing techniques of smart composite structures with embedded bulk piezoelectric transducers. *Smart Materials and Structures*, 28(5), 053001.
- Muthukumarana T V, Arachchi M A V H M, Somarathna H M C C, Raman S N, 2023, A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 366, 130173.
- Navarrete I, Kurama Y, Escalona N, Lopez M, 2020, Impact of physical and physicochemical properties of supplementary cementitious materials on structural build-up of cement-based pastes, *Cement Concr. Res.*, 130, 105994.
- Nayak S, Lyngdoh G A, Das S, 2019, Influence of microencapsulated phase change materials (PCMs) on the chloride ion diffusivity of concretes exposed to Freeze-thaw cycles: Insights from multiscale numerical simulations, *Constr. Build. Mater.*, 212, 317-328.
- Nepomuceno M C. and Silva P D, 2014, Experimental evaluation of cement mortars with phase change material incorporated via lightweight expanded clay aggregate, *Construction and Building Materials*, 63, 89-96.
- Nerella, V N, Ogura, H, Mechtcherine, V, 2018, Incorporating reinforcement into digital concrete construction, *Proceedings of the IASS Symposium 2018 Creativity in Structural Design*, Boston.

- Neves J M, Ramanathan S, Suraneni P, Grugel R, Radlińska A, 2020, Characterization, mechanical properties, and microstructural development of lunar regolith simulants-portland cement blended mixtures, *Construction and Building Materials*, 258, 120315.
- Ng D Q, Tseng Y L, Shih Y F, Lian H Y, Yu Y H, 2017, Synthesis of novel phase change material microcapsule and its application, *Polymer*, 133, 250-262.
- Nodehi M, Aguayo F, Nodehi S E, Gholampour A, Ozbakkaloglu T, 2022, Gencil O, Durability properties of 3D printed concrete (3DPC), *Automation in Construction*, 142, 104479.
- Oesterreich T D, Teuteberg F, 2016, Understanding the implications of digitisation and automation in the context of industry 4.0: a triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry, *Comput Ind.*, 83, 121-139.
- Oliveira J P, Santos T G, Miranda R M, 2020, Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: from theory to practice, *Prog Mater Sci.*, 107, 100590.
- Pan T, Guo R, Jiang Y, Ji X, 2022, How do the contact surface forces affect the interlayer bond strength of 3D printed mortar?, *Cement and Concrete Composites*, 133, 104675.
- Panda B, Unluer C, Tan M J, 2018, Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing, *Cement and Concrete Composites*, 94, 307-314.
- Paparella G, and Percoco M, 2022, 3D Printing for Housing. Recurring Architectural Themes. In *International Conference on Technological Imagination in the Green and Digital Transition*, 309-319.
- Paul, S C, 2018, Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8, 311-319.
- Pielichowska K, Pielichowski K, 2014, Phase change materials for thermal energy storage,” *Progress in Materials Science*, 65, 67-123.

- Pires L, Silva P D, Gomes J C, 2013, Experimental study of an innovative element for passive cooling of buildings, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 4, 29-35.
- Primkulov B, Chalaturnyk J, Chalaturnyk R, 2018, 3D printed sandstone strength: curing of furfuryl alcohol resin-based sandstones, *3D Print. Addit. Manuf.*, 149-156.
- Puzatova A, Shakor P, Laghi Dmitrieva M, 2022, Large-scale 3D printing for construction application by means of robotic arm and Gantry 3D Printer: A Review, *Buildings*, 12(11), 2023.
- Rahul A V. and Santhanam M, 2020, Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 109, 103570.
- Ramesh T, Prakash R, Shukla K, 2010, Life cycle energy analysis of buildings: an overview, *Energy Build* 42(10), 1592–1600.
- Ramrez R R, Alarcón L F C, Knights P, 2004, Benchmarking system for evaluating management practices in the construction industry, *Journal of Management in Engineering*, 20 (3), 110-117.
- Rathore P K S, Shukla S K, 2019, Potential of macroencapsulated PCM for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review, *Constr Build Mater.*, 225, 723-744.
- Ribeiro F, Pires J, Azar A, 2019, Implementation of a robot control architecture for additive manufacturing applications. *Ind Robot*, 46, 73–82.
- Salet T A, Ahmed Z Y, Bos F P, Laagland H L, 2018, Design of a 3D printed concrete bridge by testing, *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 222-236.
- Salunkhe P B, Shembekar P S, 2012, A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5603-5616.
- Sarcinella A, Barroso de Aguiar J L, Jesus C, Frigione M, 2023, Thermal properties of PEG-based form-stable Phase Change Materials (PCMs) incorporated in mortars for energy efficiency of buildings, *Journal of Energy Storage*, 67,10754.

- Schuldt S J, Jagoda J A, Hoisington A J, Delorit J D, 2021, A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments. *Autom. Constr.*, 125, 103642.
- Scrivener K, Ouzia A, Juilland P, Mohamed A K, 2019, Advances in understanding cement hydration mechanisms, *Cement and Concrete Research*, 124, 105823.
- Senthamarai R M, Manoharan P D, Gobinath D, 2011, Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties, *Construction and Building Materials*, 25(5), 2413-2419.
- Shakor P, Nejadi S, Paul G, Malek S, 2019, Review of Emerging Additive Manufacturing Technologies in 3D Printing of Cementitious Materials in the Construction Industry, *Front. Built Environ*, 4.
- Shao L, Feng P, Liu Q, Chen C, Cai Y, Xu G, 2023, A review on performance improvement and multi-functionalization of cement composites using capsules, *Construction and Building Materials*, 409, 133977.
- Sharifi N P, Mahboub K C, 2018, Application of a PCM-rich concrete overlay to control thermal induced curling stresses in concrete pavements, *Constr. Build. Mater.*, 183, 502-512.
- Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, Buddhi D, 2009, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 13, 318-345.
- Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, Buddhi D, 2009, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), .318-345.
- Siddika A, Al Mamun M A, Ferdous W, Saha A K, Alyousef R, 2020, 3D-printed concrete: applications, performance, and challenges, *J. Sustain. Cem. Mater.*, 9, 127-164, 10.1080.
- Siemasz R, Tomczuk K, Malecha Z, 2020, 3D printed robotic arm with elements of artificial intelligence, *Procedia Comput. Sci.*, 176, 3741-3750.

- Sinsel S R, Riemke R L, Hoffmann V H, 2020, Challenges and solution technologies for the integration of variable renewable energy sources a review, *Renew Energy*, 145, 2271-2285.
- Soares N, Costa J J, Gaspar A R, Santos P, 2013, Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency, *Energy Build.*, 59, 82-103.
- Son H, Kim C H, Kim H, Han S H, Kim M K, 2010, Trend analysis of research and development on automation and robotics technology in the construction industry, *KSCE J Civ Eng.*, 14, 131-139.
- Souayfane F, Fardoun F, Biwole P H, 2016, Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: a review. *Energy Build.*, 129, 396-431.
- Su W, Darkwa J, Kokogiannakis G, 2015, Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 373-391.
- Sun C, Xiang J, Xu M, He Y, Tong Z, Cui X., 2020, 3D extrusion free forming of geopolymer composites: Materials modification and processing optimization, *Journal of Cleaner Production*, 258, 120986.
- Tahmasebinia F, Sepasgozar S M E, Shirowzhan S, 2020, Criteria development for sustainable construction manufacturing in Construction Industry 4.0: Theoretical and laboratory investigations, *Constr Innov*, 20, 379-400.
- Tankova T, Silva L S, 2020, Robotics and Additive Manufacturing in the Construction Industry, *Curr Robot Rep* 1, 13-18.
- Tao Y B, He Y L, 2018, A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system, *Renew Sustain Energy Rev.*, 93, 245-259.
- Tatsidjodoung P, Le Pierrès N, Luo L ,2013, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renew Sustain Energy Rev* 18, 327-349.
- Tay Y W D, Panda B, Paul S C, 2017, 3D printing trends in building and construction industry: a review, *Virtual Phys. Prototyp.*, 12, 261-276.

- Tay Y W D, Qian Y, Tan M J, Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test, *Composites Part B: Engineering*, 2019, 174, 106968, 1-9.
- Taylor M, Wamuziri S, Smith I, 2003, Automated construction in Japan, *Proceedings of the Institution of Civil - Civil Engineering*, 156 (1), 34-41.
- Thiele A M, Jamet A, Sant G, Pilon L, 2015, Annual energy analysis of concrete containing phase change materials for building envelopes, *Energy Conversion and Management*, 103, 374-386.
- Tittlein P, Gibout S, Franquet E, Johannes K, Zalewski L, Kuznik F., Dumas J P, Lassue S, Bédécarrats J P, David D, 2015, Simulation of the thermal and energy behaviour of a composite material containing encapsulated-PCM: influence of the thermodynamical modelling, *Appl. Energy*, 140, 269-274.
- Topçu İ B, Uygunoğlu T, 2010, Influence of mineral additive type on slump-flow and yield stress of self-consolidating mortar, *Scientific Research and Essays*, 5 (12), 1492-1500.
- Tran M V, Cu Y T, Le C V, 2021, Rheology and shrinkage of concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing, *Journal of Building Engineering*, 44, 103400.
- TS EN 12350-6, 2010, Beton – Taze beton deneyleri-Bölüm 6: Yoğunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2010, Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012, Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 934-2 + A1, 2014, Kimyasal katkıları – Beton, harç ve şerbet için- Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları- Tarifeler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 6126 EN ISO 2555, 2005, Plastikler-sıvı veya emülsiyon veya dispers halde reçineler- görünür viskozite tayini- Brookfield metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS ISO 8302, 2002, Isı Yalıtımı - Kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini - mahfazalı sıcak plaka cihazı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Umair M M, Zhang Y, Iqbal K, Zhang S, Tang B, 2019, Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage - a review. *ppl Energy*, 235,846-873.
- Urhal P, Weightman A, Diver C, Bartolo P, 2019, Robot assisted additive manufacturing: a review. *Robot Comput Integr Manuf.*, 59, 335-345.
- Uygunoğlu T, Özgüven S B, 2021, 3D yazıcılar için tasarlanan harçlarının ekstrüde edilebilirlikleri, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 410-420.
- Uygunoğlu T, Özgüven S B, 2019, İnşaat mühendisliği 3D teknolojisinde kullanılan harçların reolojik özelliklerinin araştırılması, *International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry*, 3(2) 189-197.
- Uygunoğlu T, Özgüven S, Topçu İ B, 2019, 3D teknolojisi ile yapı malzemesi üretimindeki gelişmeler, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3),279-288.
- Vaidya S, Ambad P, Bhosle S, 2018, Industry 4.0-A Glimpse, *Procedia Manufacturing*, 20, 233–238.
- Vats G, Vaish R, 2019, Smart materials selection for thermal energy efficient architecture, *Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. A Phys. Sci.*, 89, 11-21.
- Veerakumar C, Sreekumar A, 2016, Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications: A review, *Int J Refrig*, 67, 271-289.

- Vélez C, Khayet M, De Zárate J O, 2015, Temperature-dependent thermal properties of solid/liquid phase change even-numbered n-alkanes: n-Hexadecane, n-octadecane and n-eicosane, *Applied Energy*, 143, 383-394.
- Venkatesh N, Simone H, Viktor M, 2017, Micro-and macroscopic investigations on the interface between layers of 3D-printed cementitious elements. In *International Conference on Advances in Construction Materials and Systems*. Chennai.
- Vieira J, Senff L, Gonçalves H, Silva L, Ferreira V M, Labrincha J A, 2014, Functionalization of mortars for controlling the indoor ambient of buildings. *Energy and buildings*, 70, 224-236.
- Wahid M A, Hosseini S E, Hussien H M, Akeiber H J, Saud S N, Mohammad A T, 2017, An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region, *Appl. Therm. Eng.*, 112, 1240-1259.
- Wakisaka T, Furuya N, Inoue Y, Shiokawa T, 2000, Automated construction system for high rise reinforced concrete buildings, *Automation in Construction*, 9(3), 229-250.
- Wang L, Ma G, Liu T, Buswell R, Li Z, 2021, Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails, *Cem. Concr. Res.*, 148, 106535.
- Wei Z, Falzone G, Wang B, Thiele A, Puerta-Falla G, Pilon L, Neithalath N, Sant G, 2017, The durability of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials, *Cement and Concrete Composites*, 81, 66-76.
- Werner J, Aburaia M, Raschendorfer A, Lackner M M, 2021, A 3D-Printing software for printing 3D-models with a 6-axis industrial robot, *Procedia CIRP*, 99, 110-115.
- Wilkinson P, Smith K R, Beevers S, 2007, Energy, energy efficiency, and the built environment *Lancet*, 370, 1175-1187.
- Willmann J, Knauss M, Bonwetsch T, Apolinarska A A, Gramazio F, Kohler M, 2016, Robotic timber construction-expanding additive fabrication to new dimensions, *Autom Constr.*, 61, 16-23.
- Wilson T T, Mativenga P T, Marnewick A L, 2023, Sustainability of 3D Printing in Infrastructure Development, *Procedia CIRP*, 120, 195-200.

- Wu P, Wang J, and Wang X, 2016, A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry, *Automation in Construction*, 68, 21-31.
- Wu S, Yan T, Kuai Z, Pan W, 2020, Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review, *Energy Storage Materials*, 25, 251-295.
- Yang L, Yan H, Lam J C, 2014, Thermal comfort and building energy consumption implications – A review, *Applied Energy*, 115, 164-173.
- Yasser N, Abdelrahman A, Kohail M, Moustafa A, 2023, Experimental investigation of durability properties of rubberized concrete, *Ain Shams Engineering Journal*, 14(6),102111.
- Yeon J, Kang J, Yan W, 2018, Spall damage repair using 3D printing technology, *Autom Constr*, 89, 266-274.
- Youssef M, and Abbas L, 2023, Applying 3d Printing Technology In Constructing Sustainable Houses, *Architecture and Planning Journal (APJ)*, 29(1), 4.
- Yun B Y, Yang S, Cho H M, Chang S J, Kim S, 2019, Design and analysis of phase change material based floor heating system for thermal energy storage, *Environ. Res.*, 173, 480-488.
- Zhang X, Li M, Lim J H, Weng Y, Tay Y W D, Pham H, Pham Q C, 2018, Large-scale 3D printing by a team of mobile robots, *Autom. Constr.*, 95, 98-106.
- Zhou D, Zhao C Y, Tian Y, 2012, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, 92, 593–605.
- Zubair A Q, Hafiz M A, Shahab K, 2018, Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: A review, *Int. J. Heat. Mass. Tran.*, 127, 838-856.
- Zuriguel I, Garcimartín A, Maza D, Pugnali L A, Pastor J M, 2005, Jamming during the discharge of granular matter from a silo, *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(5), 051303.

Uygunoğlu T, Barlas Özgüven S, Yılmaz N, Alagöz O, Dilek M, 2021, Çimento Hamurunda Katkı Maddesi Olarak Çörekotu Posası Biyoyağı Kullanımının Reolojik Özelliklere Etkisi, El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8(3), 1521-1528.

Uygunoğlu T, Özgüven S, ve Topçu İ B, 2019, 3D Teknolojisi Ile Yapı Malzemesi Üretimindeki Gelişmeler, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 3(3), 279-288.

Uygunoğlu T, ve Barlas Özgüven S, 2019, İnşaat Mühendisliği 3D Teknolojisinde Kullanılan Harçların Reolojik Özelliklerinin Araştırılması, International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 3(2), 189-197.

Uygunoğlu T, ve Barlas Özgüven S, 2021, 3D Yazıcılar İçin Tasarlanan Harçlarının Ekstrüde Edilebilirlikleri, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 8(1), 410-420.

Bildiriler :

Uygunoğlu T, Barlas Özgüven S, 2019, Construction Materials And Properties Produced With 3D Printing Technology, 4th International Congress On 3D Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Digital Industry.

Uygunoğlu T, Barlas Özgüven S, 2019, Investigation of 3D Printed Construction Mortar Properties, 4th International Congress On 3d Printing (Additive Manufacturing) Technologies And Digital Industry.

Uygunoğlu T, Barlas Özgüven S, 2021, The Effect Of Nanocapsulated Phase-Changing Materials On Temperature-Dependent Viscosity In Cement-Based Mortars, 4th International New York Conference On Evolving Trends In Interdisciplinary Research & Practices, 285-292.

Uygunoğlu T, Barlas Özgüven S, Şimşek B, 2020, Çimento Esaslı Harçlarda Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Sıcaklığa Bağlı Viskoziteye Etkisi, 4. Uluslararası Asya Modern Bilimler Kongresi.

Uygunoğlu T, Topçu İ B, Barlas Özgüven S, 2015, Effect of Plaster Thickness on Exterior Claddings During Fire, 2nd International Sustainable Buildings Symposium.

Kitaplar :

Uygunoğlu T, Barlas Özgüven S, 2017, Dış cephe mantolama malzemeleri performans değerlendirmesi (Turkish Edition), LAP LAMBERT Academic Publishing.

Projeler :

20.FEN.BİL.34. numaralı Tübitak projesi

221M784, Ekolojik Pasif Yapılar İçin Nano-Kapsüllü Faz Değiştiren Malzemelerle 3D Yazıcı Mikro Betonu Tasarımı, ÇAYDAG - Çevre, Atmosfer, Yer Ve Deniz Bilimleri Araştırma Destek Grubu, 1002 , ARDEB.

YÖK100/2000 Doktora Projesi

BİDEB Destekleri :

2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Burs Programı.

2250-Lisansüstü Bursları Performans Programı.