T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SODYUM KARBONATLA AKTİVE EDİLEN REAKTİF MgO/CÜRUF ESASLI SİSTEMLERİN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE DİJİTAL TEKNOLOJİLERLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİ

Onur ERTUĞRUL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Malzemeleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Didem OKTAY

Eş Danışman

Doç. Dr. Büşra AKTÜRK

Mart, 2025

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SODYUM KARBONATLA AKTİVE EDİLEN REAKTİF MgO/CÜRUF ESASLI SİSTEMLERİN REOLOJİK ÖZELLİKLERİ VE DİJİTAL TEKNOLOJİLERLE ÜRETİLEBİLİRLİĞİ

Onur ERTUĞRUL tarafından hazırlanan tez çalışması 13.03.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Didem OKTAY Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Doç. Dr. Büşra AKTÜRK İstanbul Bilgi Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Didem OKTAY, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Huzeyfe AKCA, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Anıl NİŞ, Üye
İstanbul Gelişim Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Didem OKTAY sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Sodyum Karbonatla Aktive Edilen Reaktif MgO/Cüruf Esaslı Sistemlerin Reolojik Özellikleri ve Dijital Teknolojilerle Üretilebilirliği" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur ERTUĞRUL

İmza

Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FYL-2023-5439” numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Canım aileme…

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında büyük bir özveri ile ilgilenen, akademik bilgi ve birikimleri ile birlikte tecrübelerini paylaşan, gerek lisans gerekse lisansüstü eğitim sürecimde her zaman destek veren ve beni bu alanda uzmanlaşmam için cesaretlendiren, meslek hayatımın başlangıcında beni yalnız bırakmayan başta danışman hocam Doç. Dr. Didem OKTAY ve eş danışman hocam Doç. Dr. Büşra AKTÜRK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmada beni yalnız bırakmayan değerli arkadaşım Arş. Gör. Ömer Can ÖZEN'e, laboratuvar deney süreçlerinde desteklerini esirgemeyen Yıldız Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Teknisyeni sayın Halil YAVAŞÇI'ya, 3 Boyutlu Yazıcı denemelerinde destek veren İstanbul Bilgi Üniversitesi Mimarlık Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Tuğrul YAZAR ve Mimarlık Bölümü Teknisyeni sayın Rahman ÇELEBİ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Malzeme tedariği konusunda ve lisansüstü eğitim sürecime olan desteği için kıymetli şirketim AKÇANSA Çimento San. Ve Tic. A.Ş.'ye ve değerli hazır hazır beton satış departmanı yöneticilerim sayın İlker KOÇ başta olmak üzere, Emre AKINCI, H. Burak KUŞÇUOĞLU ve Korhan GÜZELARDA'ya ayrı ayrı teşekkür ederim.

Sektörel bilgi birikimini her zaman aktaran, sektör duayenlerinden birisi olan değerli mentörüm Yasin ENGİN'e, meslek hayatımda bana yol gösteren değerli mentörüm Cemre ŞALCI'ya, mesleki büyüğüm ve abim sayın M. Metin TÜRKKAN'a ve bu süreçte her daim destek olan başta Beyza TOKLU olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak buralara gelmemde tüm desteklerini her zaman hissettiğim canım ailem annem Sultan ERTUĞRUL, babam Hayati ERTUĞRUL, kardeşim Okan ERTUĞRUL ve teyzem Sahibe TÜRKER ile manevi ablam Rüya Rabia TÜRKER'e tüm kalbimle sonsuz teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Onur ERTUĞRUL

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ xi
TABLO LİSTESİ xiii
ÖZET xiv
ABSTRACT xvi
1 GİRİŞ 1
1.1 Genel 1
1.2 Tezin Amacı 4
1.3 Hipotez 6
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 8
2.1 Alkalilerle Aktive Edilmiş Malzemeler 8
2.2 Nano Malzemelerin İnşaat Sektöründe Kullanımı 16
2.3 Alkalilerle Aktive Edilen Malzemelerin Reolojik Özellikleri 22
2.3.1 Reolojik Modeller 22
2.3.2 AAM'lerin Reolojik Özellikleri Açısından Literatür İncelemesi 27
2.4 İnşaat Sektöründe Dijital Teknolojilerin Kullanılması 31
2.4.1 Yapı Malzemeleri ve 3B Yazıcının Kullanılması 32
3 DENEYSEL ÇALIŞMA 44
3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 44
3.2 Numune Hazırlama 46
3.3 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 48
3.3.1 Yayılma Testi 48
3.3.2 Priz Süresi Tayini 49
3.3.3 Reolojik Deneyler 50
3.3.4 3 Boyutlu Yazıcı Deneyleri 54
3.4 Sertleşmiş Hal Özellikleri 57

3.4.1 Basınç Dayanımı Testi 57

3.4.2 Eğilme Dayanımı Testi 58

4 BULGULAR VE TARTIŞMA 60

4.1 Yayılma Testi 60

4.2 Priz Süresi 62

4.3 Reolojik Özellikler 65

4.3.1 Akış Eğrileri ve Dinamik Kayma Gerilmesi 65

4.3.2 Statik Kayma Gerilmesi 69

4.3.3 Viskozite Toparlanması 72

4.4 3B Yazdırılmış Hamur Karışımlarının Yazdırılabilirliği ve Üretilebilirliği 75

4.4.1 Yazdırılabilirlik (Printability) 75

4.4.2 Üretilebilirlik (Buildability) 78

4.5 Mekanik Özellikler 80

4.5.1 Basınç Dayanımı 80

4.5.2 Eğilme Dayanımı 83

4.6 3B Yazıcı ile Üretilebilen Karışımların CO2 Emisyonları ve Enerji Tüketimlerinin Karşılaştırılması 86

5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER 90

KAYNAKÇA 92

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 116

SİMGE LİSTESİ

H	25 mm ‘den az olan ilk batma derinliğinin dk cinsinden süresi
E	25 mm’demn büyük son batma deinliğinin dk cinsinden süresi
n	Akış İndeksi
θ	Difraksiyon Açısı
C	E zamanındaki batma derinliği miktarı
τ_0	Eşik Kayma Gerilmesi
D	H zamanındaki batma derinliği miktarı
τ	Kayma Gerilmesi
$\dot{\gamma}$	Kayma Hızı
KHz	Kilohertz
kPa	Kilopascal
R	Korelasyon katsayısı
L	Litre
MPa	Mega pascal
MJ	Megajul
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
d_{50}	Ortalama Tane Boyutu
Pa	Pascal
Pa.s	Pascal.saniye
µp	Plastik Viskozite
no	Plastik Viskozite
rpm	Revolutions Per Minute (Dakikada devir sayısı)
s^{-1}	Saniye
Cs	Sezyum
K	Tutarlılık Katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

3B	3 Boyutlu
AAM	Alkalilerle Aktive Edilmiş Malzeme
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
A-NK	Attapulgit nano-kili
C–(A)–S–H	Kalsiyum (alüminyum) silikat hidrat
C_3S	Trikalsiyum Silikat
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
CO_2	Karbondioksit
FA	Flay Ash (Uçucu Kül)
FDM	Fused Deposition Modeling
Fe_2O_3	Demir Oksit
GGBFS	Ground Granulated Blast-Furnace Slag
GGBS	Ground Granulated Blast Slag
Grasshopper	Görsel planlama platformu
H_2O	Di Hidrojen Mono Oksit (Su)
IoT	Nesnelerin İnterneti
K_2CO_3	Potasyum Karbonat
K_2SiO_3	Potasyum Silikat
K_2SO_4	Potasyum Sülfat
KOH	Potasyum Hidroksit
KRL	KUKA Robot Language
LiOH	Lityum Hidroksit
$Mg(OH)_2$	Magnezyum Hidroksit (Brusit)
MgO	Magnezyum Oksit
MK	Metakaolin
M-S-H	Magnezyum Silikat Hidrat
Na_2CO_3	Sodyum Karbonat

Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
Na_2SO_4	Sodyum Sülfat
NaOH	Sodyum Hidroksit
NC	Sodyum Karbonat
NM	Nano Malzemeler
NS	Nano Silika
OPC	(Ordinary Portland Cement) Sıradan Portland Çimentosu
PÇ-N	Nano silikalı Portland çimentolu karışım
PLA	Polilaktik Asit
r-MgO	Reaktif Magnezyum Oksit (Manyezit)
SD	Silis Dumanı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SF	Silica Fume (Silis Dumanı)
SiO_2	Silisyum Di Oksit (Nano Silika)
SLA	Stereolitografi
SLS	Selective Laser Sintering
UHPC	(Ultra High Performance Concrete) Ultra Yüksek Performanslı Beton
UK	Uçucu Kül
WF-UD2	Weightlab Instruments Ultrasonik Banyo
YFC	Granüle Yüksek Fırın Cürufu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Deneysel çalışma akış şeması **6**

Şekil 2.1 Tek bileşen yöntemi üretim şeması **11**

Şekil 2.2 Çift bileşen yöntemi üretim şeması **12**

Şekil 2.3 2013 ve 2022 yılları arasında yapılan AAM'ler ile ilgili detaylı bir çalışmanın yüzdeleri [52] **19**

Şekil 3.1 Cüruf ve r-MgO'nun tane boyutu dağılımı **44**

Şekil 3.2 a) Cüruf ve r-MgO'nun XRD grafiği b) Nano-silika'nın XRD grafiği .. **46**

Şekil 3.3 Hamur ve harç karışımlarının üretim diyagramı **48**

Şekil 3.4 (a) Yayılma testi deney düzeneği ve (b) deney sonrasında gözlemlenen yayılmış taze harç karışımı **49**

Şekil 3.5 Priz süresi testinde kullanılan otomatik Vicat aleti **50**

Şekil 3.6 a) Reolojik ölçümlerin yapıldığı reometre cihazı b) Ölçümler esnasında kullanılan 4 kanatlı ölçüm ucu **51**

Şekil 3.7 Reolojik parametreler için uygulanan ölçüm prosedürü, kayma hızı-zaman ilişkisi **51**

Şekil 3.8 Statik kayma gerilmesi ölçüm prosedürü, kayma hızı-zaman ilişkisi **53**

Şekil 3.9 Viskozite toparlanma ölçüm prosedürü, kayma hızı-zaman ilişkisi..... **54**

Şekil 3.10 a) KUKA KR-20 robot kolu, b) kiriş numuneleri üretmek için baskı işlemi, c) hamur ve harç karışımları için nozullar **56**

Şekil 3.11 Basınç dayanımını belirlemek için 3B yazıcılı numunelerin numune hazırlanması ve test edilmesi **58**

Şekil 3.12 Basınç dayanımını belirlemek için kiriş örneklerinin ve yükleme yönünün yönelimlerinin yazdırılması **58**

Şekil 3.13 Eğilme dayanımı testi için yükleme yönlerinin şematik gösterimi **59**

Şekil 3.14 Eğilme dayanımı testi **59**

Şekil 4.1 NS'siz ve NS'li karışımların yayılma testi sonuçları **61**

Şekil 4.2 a) NS'siz b) NS'li karışımların priz süresi sonuçları **64**

Şekil 4.3 (a) NS'siz ve (b) NS'li karışımların akış eğrileri **67**

Şekil 4.4 (a) NS'siz karışımların kayma gerilimi – zaman grafiği, (b) NS'li karışımların kayma gerilimi – zaman grafiği, (c) tüm karışımların statik kayma gerilimi değerleri, (d) karışımların statik ve dinamik kayma gerilimi karşılaştırması **71**

Şekil 4.5 NS'siz (a) ve NS'li (b) karışımların viskozite toparlanma grafikleri **73**

Şekil 4.6 (a) Ref, (b) 5Mg, (c) 10Mg ve (d) 15Mg karışımlarının yazdırılabilirlik sonuçları **77**

Şekil 4.7 (a) Ref-N, (b) 5Mg-N, (c) 10Mg-N ve (d) 15Mg-N karışımlarının yazdırılabilirlik sonuçları **77**

Şekil 4.8 (a) Ref, (b) 5Mg, (c) 10Mg ve (d) 15Mg karışımlarının üretilebilirlik sonuçları **79**

Şekil 4.9 (a) Ref-N, (b) 5Mg-N, (c) 10Mg-N ve (d) 15Mg-N karışımlarının üretilebilirlik sonuçları **79**

Şekil 4.10 (a) 3B yazıcı ve (b) geleneksel kalıp döküm karışımlarının basınç dayanımı sonuçları **82**

Şekil 4.11 (a) 3B yazıcı, (b) geleneksel kalıp döküm karışımlarının eğilme dayanımı sonuçları **84**

Şekil 4.12 Eğilme dayanımı testinden sonra 3B numunelerin kırılma görüntüleri **85**

Şekil 4.13 a) 3B yazıcı ile üretilen 10Mg serisinin eğilme dayanımı testi sonrası kesit görüntüleri (b) Geleneksel kalıp döküm yapılan10 Mg serisinin eğilme dayanımı testi sonrası kesit görüntüleri **85**

Şekil 4.14 (a) 3B yazdırılabilir tek bileşen yöntemiyle üretilmiş sodium karbonatla aktive edilen r-MgO cüruf esaslı karışımların ve çimento esaslı karışımların toplam CO2 emisyonu (b) 3B yazdırılabilir tek bileşen yöntemiyle üretilmiş sodium karbonatla aktive edilen r-MgO cüruf esaslı karışımların ve çimento esaslı karışımların toplam enerji tüketimi **88**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşimi **45**
Tablo 3.2 Hamur serilerin karışım oranları **47**
Tablo 4.1 Karışımların reolojik parametreleri **68**
Tablo 4.2 Malzemelerin tipik CO_2 emisyonları ve gömülü enerji değerleri **87**
Tablo 4.3 1 m3 harç karışımları için CO_2 emisyonları ve enerji tüketim değerleri **88**

ÖZET

Sodyum Karbonatla Aktive Edilen Reaktif MgO/Cüruf Esaslı Sistemlerin Reolojik Özellikleri ve Dijital Teknolojilerle Üretilebilirliği

Onur ERTUĞRUL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Programı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Didem OKTAY

Eş-Danışman: Doç. Dr. Büşra AKTÜRK

Beton, günümüzde en yaygın yapı malzemesidir; ancak ana bileşeni çimentonun üretimi yüksek CO_2 salımı ve enerji tüketimine yol açmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir alternatiflere olan ihtiyacı artırmıştır. Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcı sistemler (AAM), düşük karbon salımı ve enerji gereksinimiyle çevresel açıdan öne çıkarken; uzun priz süresi, düşük erken yaş dayanımı ve reolojik özelliklerdeki zorluklar nedeniyle yaygın kullanımı sınırlıdır.

Bu çalışmada, reaktif MgO (r-MgO) ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) esaslı bağlayıcı sistemler geliştirilerek, tek bileşen yönetimiyle kuru bileşenlere su eklenerek aktive edilen karışımların üretilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede, üretim sürecinin daha uygulanabilir hale getirilmesi ve sodyum karbonat (NC) kullanılarak daha çevreci bir aktivasyon mekanizması sağlanması hedeflenmiştir. Çalışmada, r-MgO farklı oranlarda (%0 - %15) YFC ile ikame edilmiş ve nano-silika (NS) katkısı cüruf ile ağırlıkça %1 oranında yer değiştirilerek

kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında üretilen karışımlar, yayılma çapı ve priz süresi, reolojik özellikler, mekanik özellikler ve 3 boyutlu yazıcı teknolojisiyle üretilebilirlik açısından incelenmiş ve çevresel etkiler açısından karşılaştırma yapılmıştır.

Deneysel sonuçlar, %10 r-MgO kullanımının basınç dayanımını artırdığını, NC ve r-MgO'nun priz süresini kontrol ederek işlenebilirliği iyileştirdiğini göstermiştir. NS katkısı viskoziteyi dengelerken, en iyi baskı performansı %10 r-MgO içeren karışımlarda elde edilmiştir. Çalışma, OPC yerine çevreci ve enerji açısından verimli sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada geliştirilen NC ile aktive edilmiş, r-MgO ve NS katkılı bağlayıcı sistemler; sürdürülebilir, uygun priz süresine ve reolojik özelliklere sahip, 3B yazıcıyla üretilebilen alternatif yapı malzemeleri sunmaktadır. Çalışma, OPC'ye çevreci bir alternatif olarak endüstriyel yan ürünlerin etkin kullanımına katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alkalilerle Aktive Edilmiş Malzemeler (AAM), Reaktif Magnezyum Oksit (r-MgO), 3B Yazdırılabilirlik, Sodyum Karbonat ile Tek Bileşenli Aktivasyon, Reolojik Özellikler

ABSTRACT

Rheological Properties and Manufacturability of Sodium Carbonate-Activated Reactive Mgo/Slag-Based Systems With Digital Technologies

Onur ERTUĞRUL

Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Didem OKTAY

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Büşra AKTÜRK

Concrete is the most widely used construction material today; however, the production of its main component, cement, results in high CO_2 emissions and significant energy consumption. This has increased the need for sustainable alternatives. Alkali-activated binder systems (AAMs) stand out environmentally due to their low carbon emissions and energy requirements, yet their widespread use is limited by factors such as long setting times, low early-age strength, and rheological challenges. In this study, binder systems based on reactive MgO (r-MgO) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) were developed with the aim of producing mixtures activated by simply adding water to the dry components using a one-part activation approach. This method targets a more practical production process and a more environmentally friendly activation mechanism through the use of sodium carbonate (NC). In the mixtures, r-MgO was substituted for GGBFS at varying ratios (0%–15%), and nano-silica (NS) was incorporated by replacing 1% of the slag by weight. The mixtures were evaluated

in terms of flowability, setting time, rheological and mechanical properties, 3D printability, and environmental impact.
Experimental results showed that using 10% r-MgO improved compressive strength, while NC and r-MgO helped control the setting time and enhanced workability. NS contributed to viscosity recovery and layer stability, yielding the best print quality in mixtures with 10% r-MgO.
The NC-activated binder systems developed in this study, incorporating r-MgO and NS, offer sustainable alternative construction materials with appropriate setting behavior and rheological properties, suitable for 3D printing. The study contributes to the development of eco-friendly systems as alternatives to OPC through the efficient use of industrial by-products.

Keywords: Alkali-Activated Materials (AAM), Reactive Magnesium Oxide (r-MgO), 3D Printability, One-Part Activation with Sodium Carbonate, Rheological Properties.

1
GİRİŞ

1.1 Genel

Dünya geneline bakıldığında inşaat sektörü medeniyetlerin en temel ihtiyacını karşılamak üzere geçmişten günümüze tarihin her aşamasında var olmuştur ve olmaya devam etmektedir.

Betonun tarihi oldukça eskiye dayanmaktadır. Ancak modern anlamda betonun bulunuşu ve geliştirilmesiyle ilgili en önemli katkılar Roma İmparatorluğu dönemine kadar uzanmaktadır. Modern betonun gelişmesi ise 19. yüzyılın başlarında Fransız mühendis Joseph Aspdin'in Portland Çimentosunu icat etmesiyle başlamıştır.

Betonun dünyada en çok kullanılan yapı malzemesi olmasının başlıca birkaç sebebi vardır. Bunlar; içerisindeki hammaddelerin ulaşılabilir olması, kolay işlenebilir formda olması, dayanım ve dayanıklılık açısından mühendislik uygulamalarında elverişli olması ve diğer yapı malzemelerine kıyasla ekonomik olmasıdır. Tüm bu sebepler betonu dünyada sudan sonra en çok tüketilen ikinci malzeme yapmaktadır [1-4].

Günümüzde beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu (OPC) tercih edilmektedir. Çimento üretimi süreçlerine bakıldığında, klinker üretimi sırasında önemli ölçüde enerji tüketimi ve buna bağlı olarak CO_2 emisyonu gerçekleşmektedir [5]. Çimento üretimi aynı zamanda dünya çapındaki küresel CO_2 emisyonlarının çoğunluğundan sorumlu dört sektörden biridir [5]. Küresel CO_2 emisyon çalışmaları incelendiğinde, çimentonun toplam emisyonun yaklaşık %7-%8'inden sorumlu olduğu görülmektedir [6-7]. Her 1 ton çimento üretimi nedeniyle dolaylı ve doğrudan olmak üzere yaklaşık 1 ton CO_2 gazı açığa çıkmaktadır [8-9].

Dünya çimento üretimi son 10 yıllık dönemde yılda ortalama 4,1 milyar ton seviyesinde gerçekleşmiştir [10].

CO_2 emisyonu azaltmak adına, dünya çapında inşaat endüstrisinde çimentoya alternatif sürdürülebilir olarak nitelendirilebilecek bağlayıcı yapı malzemeleri çalışmalarının ve kullanımının arttığı görülmektedir.

Bu malzemeler arasında puzolanik özellik gösteren metakaolin (MK), silis dumanı (SD) gibi malzemelerin yanı sıra, yaygın olarak uçucu kül (UK) ve granüle yüksek fırın cürufu (YFC) gibi endüstriyel yan ürünler de bulunmaktadır. Bu malzemeler kullanım amacına göre çimento ile belirli oranlarda ikame edilerek ve/veya çimento kullanmadan direkt bağlayıcı malzeme olarak kullanılmaktadır [11].

Günümüzde, çimentoya alternatif sürdürülebilir malzemeler ile ilgili çalışmalar incelendiğinde endüstriyel yan ürün olan ve amorf haldeki silikat ve kalsiyum esaslı malzemelerin (öğütülmüş yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb.) alkalilerle aktivasyonu sonucunda bağlayıcı sistem oluşturarak çimentosuz beton, diğer adıyla alkalilerle aktive edilmiş malzemeler (AAM) üretilmektedir.

AAM'lerin üretiminde endüstriyel atık veya yan ürünlerin ve/veya doğal puzolanların bağlayıcı olarak kullanılması, AAM'lerin OPC kullanılan sistemlere göre daha çevreci ve sürdürülebilir hale getirmektedir [8,9,11]. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda AAM'lerin taze hal ve sertleşmiş durumdaki özelliklerinde geleneksel betona kıyasla gelişmeler gözlenmiş olmakla birlikte sülfat etkisi, yüksek sıcaklık etkisi, asit etkisi gibi çevresel etkilere karşı da daha dayanıklı olduğu birçok çalışma sonucu ortaya konmuştur [12-15].

AAM'ler, üretimi sırasında kullanılan bağlayıcı malzemenin kimyasal bileşiminden, özgül yüzey alanlarından, kullanılan aktivatör tipinin özelliklerinden, aktivatör kullanım yoğunluğundan, üretim sırasındaki ortam koşulları ile üretim süreçlerinden, üretim sonrası kür koşullarından (kür sıcaklığı, kullanılan kür yöntemleri vb.) etkilenmektedir [12-18].

AAM'lerin alkali aktivasyonunda genellikle NaOH, Na_2SO_4, K_2CO_3, KOH, K_2SO_4 gibi malzemeler aktivatör olarak kullanılmaktadır. Bu aktivatörlerin yaygın olarak kullanılması üretim sırasında kullanılan bağlayıcı malzemenin çözünmesini kolaylaştırmanın yanında pH değerini arttırması olarak söylenebilir. Ancak bu tip

aktivatörlerin üretimleri sırasında yüksek enerji ihtiyacının olması ve hızlı priz süreleri ile çatlak oluşturmaya yatkınlıkları olumsuz özelliklerindendir [19-21].

Sodyum karbonat (Na_2CO_3) diğer aktivatörlere kıyasla doğal yollarla elde edilebilir olması, yapay olarak üretilecek ise üretimi sırasında diğer aktivatörlere kıyasla daha az enerjiye ihtiyaç duyması nedeniyle daha ekonomik ve çevre dostu bir ürün olarak sınıflandırabilir. Ayrıca, Türkiye'deki rezervler açısından zengin olması nedeniyle de alternatif bir malzeme olarak düşünülebilir [22]. Ancak NC'nin düşük pH değerine sahip olması ve yapı malzemesinin pH değerini düşürmesi, geç priz alma özelliğinden dolayı betonun erken yaş dayanımını düşürmesi gibi olumsuz özelliklerin olduğu göz ardı edilmemelidir [22-23].

Literatürdeki birçok çalışmada, AAM'lerin üretim sürecinde alkali aktivatörlerin karışım suyunda çözünmesiyle solüsyon hazırlandığı ve bu solüsyon ile toz malzemelerin karıştırılmasıyla üretimlerin yapıldığı görülmektedir. Bu solüsyon hazırlama işlemi çimento esaslı malzemelere kıyasla ek bir süreç gerektirdiği için AAM'lerin gerçek hayattaki uygulamalarında sorun teşkil etmektedir. Bu süreçler irdelendiğinde dolaylı/doğrudan CO_2 emisyonu gerçekleşmekte ve sürdürülebilirlik çalışmaları açısından yeterli verim alınamamaktadır.

Daha önce yapılan çalışmalarda reaktif MgO ikamesinin sodyum karbonatla aktive edilmiş cürufun reaksiyon kinetiklerini hızlandırdığı ifade edilmiştir [24-28]. Yapılan bir çalışmada r-MgO ile yüksek fırın cürufunun %10 ikame edilmesi sonucunda hidratasyonu hızlandırdığı ve hidratasyon ısısı sonuçlarına göre r-MgO'nun genel hidratasyon süreçlerini önemli ölçüde arttırdığı sonucuna varılmıştır. Basınç dayanımı açısından irdelendiğinde ise AAM'lerde r-MgO kullanılmasının olumlu etkileri görülmüştür [29].

Nano silika (SiO_2) son zamanlarda beton ve çimento endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir katkı malzemesidir. Amorf yapısı sayesinde iyi puzolanik özellik sergilemektedir. Bunun yanı sıra betonda filler özellik göstermekte; betonun reolojik, mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmektedir [30-35].

AAM'lerin üretim süreçlerinde; jeopolimerizasyon süreçlerini hızlandırması, priz süresini azaltması, aktivasyonu iyileştirmesi, hidratasyon işlemlerini ve ürünlerini arttırması gibi nedenler dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır [30,31,36,37].

Çimento ve beton sektörü açısından reolojik özellikler malzemenin üretim aşamasından kalıba yerleşme aşamasına kadarki süreçlerde (üretim, taşıma, pompalama, enjeksiyon, kalıplama, sıkıştırma vb.) önemli etkiye sahiptir. Eşik kayma gerilmesi, plastik viskozite, yapısal toparlanma gibi parametre değerleri özellikle son zamanlarda çalışılmakta olan yeni bir üretim yöntemi olan 3 Boyutlu (3B) yazıcıların kullanılması ile beton üretimi konusunda mutlaka belirlenmesi gereken özelliklerdendir. Uygun reolojik özellik gösteren malzemelerin uygun taze hal özellikleri (işlenebilirlik, priz süresi vb.) ve üstün mekanik performans sergilediği yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur [38-44].

Teknolojinin gelişmesi her sektörde olduğu gibi inşaat sektöründe de kolaylıklar sağlamakla birlikte farklı bakış açıları geliştirmiştir. Son yıllarda dijital teknolojilerin sağladığı avantajlardan büyük ölçüde faydalanılmaktadır. Buna örnek olarak, bina bilgi modellemesi, yapay zekâ destekli tasarım ve proje yönetimi yazılımları gösterilebilir. Bu teknolojiler; inşaat projelerinin planlanması, tasarımı, izlenmesi ve yönetilmesinde büyük kolaylık sağlamaktadır [45].

Son teknolojik gelişmeler arasında 3 Boyutlu (3B) yazıcı teknolojisinin inşaat sektöründe kullanılmaya başlaması örnek verilebilir. 3B yazıcı teknolojisinin inşaat süreçlerinde kullanılması farklı bir bakış açısı kazandırmanın yanı sıra birçok fayda sağlamakta ve süreçleri iyileştirmektedir. Sürdürülebilir yapı malzemelerinin 3B yazıcı teknolojisi ile kullanılması ile sektörün ortaya çıkardığı olumsuz çevresel etkilerin büyük bir bölümünün ortadan kalkacağı düşünülmektedir. Geleneksel inşaat yöntemlerinin karşılaştığı zaman, maliyet ve sürdürülebilirlik gibi zorlukları aşmak için 3B yazıcılar, çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar arasında inşaat süresinde kısalma, maliyet avantajı, inşaat sürecindeki çevreye verilen zararın azaltılması, mimari tasarım açısından özgünlük, iş gücü tasarrufu örnek verilebilir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın genel amacı; bağlayıcı malzeme olarak cüruf ve cürufla ikameli olarak düşük sıcaklıkta kalsine edilen manyezitin (r-MgO) ve nano-silikanın (NS), aktivatör olarak ise sodyum karbonatın (NC) kullanıldığı, daha sürdürülebilir, uygulanabilir, uygun priz süresi ve dayanım değerlerine sahip, ilaveten reolojik özelikler bakımından elverişli ve 3B yazıcılar ile üretilebilen bir yapı malzemesi

elde etmektir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, mevcut çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada NC'nin (aktivatör) solüsyon hazırlanmaksızın kuru karışıma ilave edilmesiyle tek-bileşenli (one-part mixing) karışımlar üretilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, çalışmanın amacına ulaşmak için aşağıdaki hedefler belirlenmiştir:

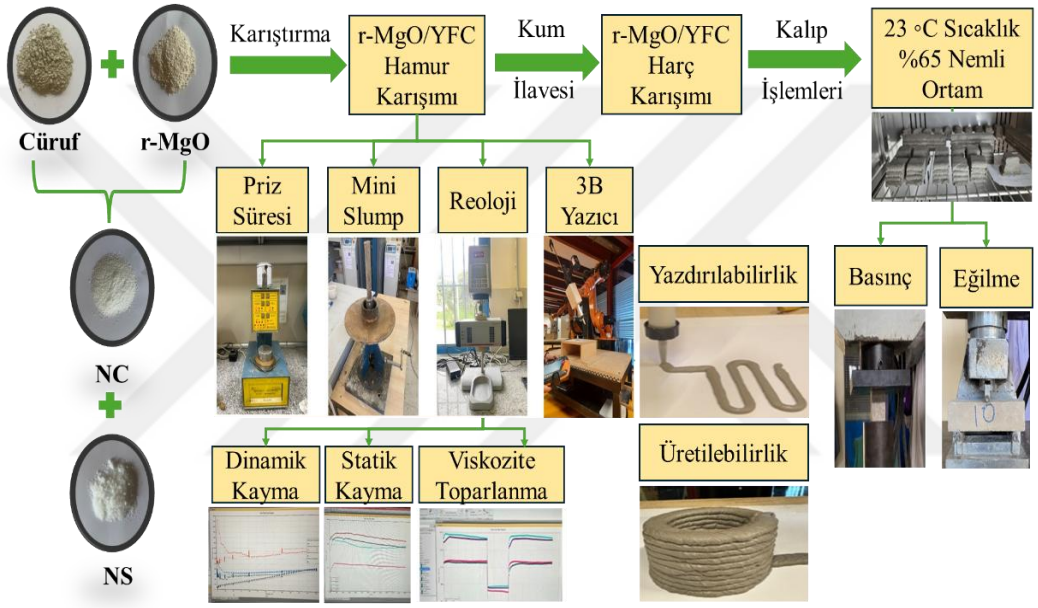
1. Çimento üretimindeki yüksek enerji ihtiyacını ve üretim aşamasında ortaya çıkan CO_2 emisyonunu azaltarak çimentoya alternatif ve sürdürülebilir, cüruf/r-MgO esaslı bir bağlayıcı sistem geliştirilmesi,
2. Kullanılan diğer aktivatörlerle kıyaslandığında daha sürdürülebilir ve maliyet açısından daha avantajlı aktivatör olan sodyum karbonatın kullanılması,
3. Türkiye'deki rezervler düşünüldüğünde sodyum karbonatı aktivatör olarak kullanarak ayrıca ülke ekonomisine bir katma değer katması.
4. Bağlayıcı malzemeler (cüruf ve r-MgO) ile sodyum karbonatın kuru olarak karıştırılmasıyla tek bileşenli üretim yapılması,
5. Kuru karışım olarak hazırlanan malzemenin uygun priz süresi, yeterli dayanım, uygun reolojik özellikler göstermesi,
6. Cüruf ile r-MgO'nun farklı oranlarda ikame edilmesiyle üretilen karışımların dayanım gelişimi ve reolojik özelliklerinin belirlenmesi ve 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilebilirliğinin araştırılması,
7. Nano silikanın, üretilen karışımlar üzerindeki reolojik, mekanik ve 3B yazdırılabilirlik özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi,
8. Hazırlanan karışımların mekanik, reolojik ve 3B yazıcılar ile üretilebilirlik özellikleri arasında ilişki kurulması,
9. Çalışma sonucunda yapılacak yayınlar ile literatüre katkıda bulunulması.

Yukarıda belirtilen amaçları gerçekleştirmek için aktivatör oranı ve NS sabit oranlarda kullanılırken, r-MgO, cüruf ile farklı oranlarda (%5-10-15) ikame edilmiştir. NC, toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %10'u kadar, NS ise toplam bağlayıcının %1'i oranında cüruf ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Karışımların reolojik, mekanik ve 3B yazıcı ile üretilebilirliğine ilişkin ayrıntılı açıklamalar aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.

Bu tez 5 bölümden oluşmaktadır. 1. Bölüm tezin amacı ve hedeflerine ilişkin genel bir bakış sunmaktadır. Çalışma kapsamındaki alkalilerle aktive edilen malzemeler

ile ilgili genel bilgilerin yanı sıra yapı malzemeleri ve alkalilerle aktive edilen malzemelerin reolojik özellikleri ve 3B yazıcılarla bu malzemelerin üretilebilirliğine dair detaylı literatür araştırması 2. Bölüm'de verilmektedir. 3. Bölüm'de çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri, karışım oranları ve seriler üzerinde yapılan deneyler ve yöntemleri verilmiştir. 4. Bölüm'de, karışımın taze ve sertleşmiş hal özellikleri, reolojik ölçüm sonuçları ve 3B yazıcılarla üretilebilirlik sonuçlarına yer verilmiştir. Son olan 5. Bölüm'de ise elde edilen tüm sonuçlar birlikte değerlendirilerek gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında iş akış şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1.1 Deneysel çalışma akış şeması

1.3 Hipotez

Literatürde, AAM'ler ile ilgili oldukça kapsamlı çalışmalar mevcuttur. İlgili çalışmalar incelendiğinde genellikle NaOH, KOH, Na_2SO_4, K_2CO_3, K_2SO_4 gibi malzemelerin aktivatör olarak kullanıldığı görülmektedir. NC'nin aktivatör olarak kullanıldığı çalışmalarda ise uzun priz süreleri, düşük pH değeri ve erken yaş dayanımlarının düşük olması nedeniyle özellikle 3B yazıcı teknolojisi çalışmalarında daha az tercih edilmiştir. Cüruf ile ikameli olarak kullanılan r-MgO'un NC ile aktive edilen cüruf esaslı karışımların reolojik özelliklerini, 3B yazıcılar ile üretilebilirlik özelliklerini ve dayanım gelişimini olumlu etkileyeceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan NS'nin ultra ince yapısı

filler etki yaratarak daha az boşluklu yapıya sahip karışımlar üretilmesini sağlayacak, karışımların basınç dayanımını arttıracak ve 3B yazdırılabilme özelliklerini iyileştirici özellik gösterecektir.

2
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Alkalilerle Aktive Edilmiş Malzemeler

Alkalilerle aktive edilen malzemeler (AAM'ler), çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik avantajlar açısından geleneksel Portland çimentosuna (OPC) önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu malzemeler, genellikle silika ve alümina esaslı hammaddelerin alkali çözeltilerle aktive edilmesi sonucu oluşan inorganik ve polimerik yapılar olarak tanımlanmaktadır. AAM ve OPC üretim süreçleri kıyaslandığında, AAM'lerin düşük karbon emisyonu ve enerji tüketiminin yanı sıra uzun servis ömürleri ve durabilite özellikleri de dikkat çekmektedir. Hem ekonomik hem de sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda, AAM'ler ile ilgili yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır [46-47].

OPC, küresel karbon emisyonlarının yaklaşık %7-8'sinden sorumlu olup, üretiminde yüksek sıcaklık ve enerji gereksinimi ihtiyaç duymaktadır. Buna karşın, AAM'lerin üretimi daha düşük sıcaklıklarda ve daha az enerjiyle gerçekleşmektedir. YFC, UK ve cam atıkları gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanılması, hem doğal kaynak tüketimini azaltmakta hem de endüstriyel atıkların geri dönüşümüne katkı sağlamaktadır [48,49]. Yapılan bir çalışmada UK ve YFC kullanımının çimento üretimi sırasında ortaya çıkan karbon emisyonunu %50'ye kadar azalttığı saptanmıştır [50,51].

AAM'lerin mekanik dayanıklılığı ve kimyasal direnci, onları zorlu çevre koşullarında kullanım için ideal kılmaktadır. Özellikle suya ve kimyasallara karşı dayanıklılıklarının yüksek olması, bu malzemelerin yapı sektöründe daha geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımıştır. Ayrıca, nano-silika gibi katkı maddeleri, AAM'lerin reolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirerek performanslarını artırmaktadır [52].

AAM'lerin üretiminde kullanılan alkali aktivatörlerin seçimi, çevresel etkileri ve maliyetleri doğrudan etkilemektedir. Sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) gibi güçlü alkali aktivatörler yüksek performans sağlasa da, çevresel açıdan daha az sürdürülebilir olabilmektedir. Buna karşılık, sodyum karbonat (Na_2CO_3) ve kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) gibi çevre dostu alternatifler, düşük maliyetleri ve sürdürülebilir özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar [53,54]. Bu aktivatörlerin kullanımı, karbon emisyonunu azaltırken üretim süreçlerini daha ekonomik hale getirmektedir.

Ekonomik açıdan, AAM'lerin üretim maliyetleri kullanılan hammaddelere ve tedarik zincirine bağlıdır. Endüstriyel yan ürünlerin kullanımı, maliyetlerin düşürülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bununla birlikte, güçlü alkali aktivatörlerin yüksek maliyetleri, özellikle büyük ölçekli üretimlerde ekonomik sürdürülebilirlik açısından zorluklar yaratmaktadır [55].

AAM'lerin çevresel faydaları, yalnızca düşük karbon emisyonu ve enerji tüketimi ile sınırlı değildir. Bu malzemelerin dayanıklılığı ve düşük bakım gereksinimi, yaşam döngüsü boyunca çevresel faydalarını artırmıştır. Ayrıca, geri dönüştürülebilir özellikleri sayesinde, atık yönetimi açısından da avantaj sağlamaktadır [56]. Bu bağlamda, AAM'ler yalnızca ekonomik bir alternatif değil, aynı zamanda çevre dostu bir çözüm sunmaktadır.

Alkalilerle aktive edilen malzemeler (AAM'ler), yüksek dayanıklılık, kimyasal direnç ve düşük karbon ayak izi gibi özellikleri sayesinde yapı malzemeleri sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Beton üretimi, yol yapımı, zemin iyileştirme ve nükleer atık depolama gibi alanlarda AAM'ler, OPC'ye kıyasla çevresel ve ekonomik açıdan önemli bir seçenek sunmaktadır [57,58].

Özellikle suya ve kimyasallara karşı dayanıklılıkları, bu malzemeleri deniz yapıları, köprüler ve tüneller gibi zorlu çevre koşullarında kullanılabilir hale getirmektedir [52]. Ayrıca, 3B yazıcı teknolojileri ile entegrasyonu, karmaşık geometrilere sahip özelleştirilmiş yapıların ekonomik ve çevresel olarak sürdürülebilir bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır [56,59].

Alkalilerle aktive edilen malzemelerin (AAM'lerin) geliştirilmesi, modern beton teknolojisinin tarihsel evrimi ile doğrudan ilişkilidir. 19. yüzyılda Joseph Aspdin tarafından Portland çimentosunun icat edilmesi, inşaat sektöründe bir devrim

yaratmış ve betonun yaygın olarak kullanılmasına zemin hazırlamıştır. Ancak, yüksek karbon emisyonu ve doğal kaynak tüketimi gibi çevresel etkiler, OPC'ye alternatif arayışlarını hızlandırmıştır [57,58]. 20. yüzyılın ortalarından itibaren, özellikle Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'da sürdürülebilir bağlayıcı malzemeler üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiştir.

AAM'ler üzerine yapılan ilk çalışmalar, 1950'li yıllarda endüstriyel atıkların değerlendirilmesiyle başlamıştır. Bu süreçte, UK ve YFC gibi malzemelerin bağlayıcı özellikleri üzerinde deneyler yapılmıştır [58]. Davidovits'in 1970'lerde jeopolimer kavramını geliştirmesi, bu alandaki çalışmalara teorik bir temel kazandırmıştır [51]. Özellikle Avrupa ülkelerinde, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak amacıyla AAM'lerin dayanıklılık ve çevresel etkileri üzerine kapsamlı çalışmalar yapılmıştır [60].

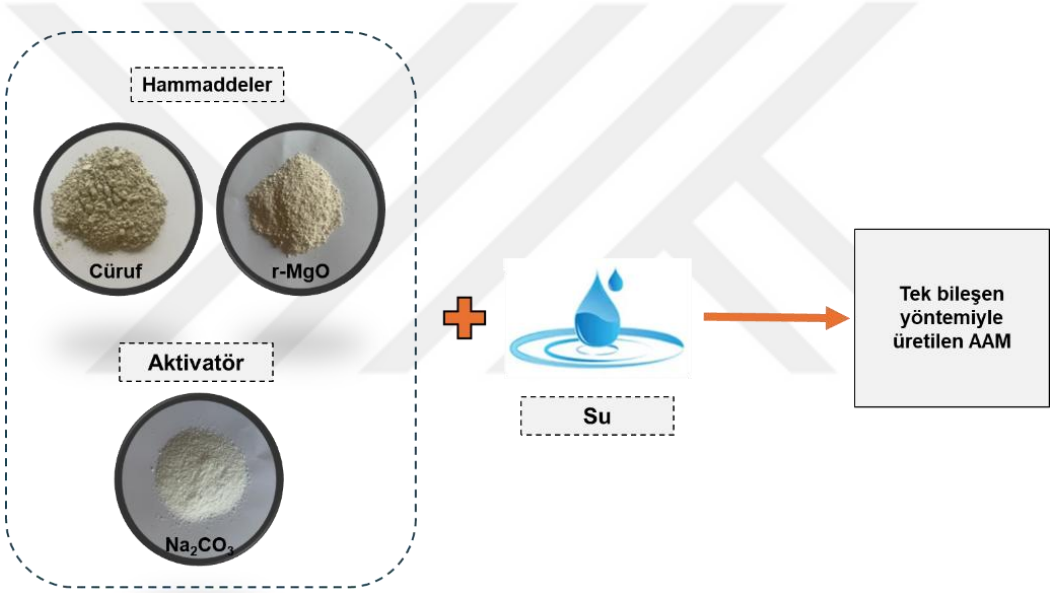
2000'li yılların başında, enerji tasarrufu ve karbon ayak izinin azaltılması hedefleri doğrultusunda, AAM'ler üzerine yapılan araştırmalar önemli ölçüde artmıştır. Çin ve Hindistan gibi ülkeler, endüstriyel atıkların geri dönüşümü ve çevresel sürdürülebilirlik konularına öncülük etmiştir [61-64]. Aynı dönemde, Kuzey Amerika'da yapılan çalışmalar, AAM'lerin yapısal dayanıklılığı ve kimyasal direnç özelliklerini vurgulamış, bu malzemelerin beton endüstrisinde uygulanabilirliğini artırmıştır [65-67].

Teknolojik gelişmelerle birlikte, AAM'lerin üretim süreçleri ve özellikleri üzerine daha kapsamlı araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Özellikle, 3B yazıcı teknolojilerinin geliştirilmesi, AAM'lerin üretim yöntemlerini çeşitlendirmiş ve bu malzemelerin modern inşaat uygulamalarındaki rolünü artırmıştır [56]. Ayrıca, 21. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, düşük maliyetli ve çevre dostu alkali aktivatörlerin geliştirilmesi, AAM'lerin endüstriyel kullanımını daha erişilebilir hale getirmiştir [68].

Alkalilerle aktive edilen malzemelerin (AAM'ler) üretim süreçleri ve alkali aktivasyon teknikleri, bu malzemelerin performansını, dayanıklılığını ve uygulama alanlarını belirlemede kritik bir öneme sahiptir. AAM'ler, genellikle alümina ve silika içeren hammaddelerin alkali çözeltilerle reaksiyona girmesiyle üretilmektedir. Bu süreçte UK, YFC, MK ve cam atıkları gibi endüstriyel yan ürünler yaygın olarak kullanılmaktadır [50, 69]. Bu hammaddelerin seçimi,

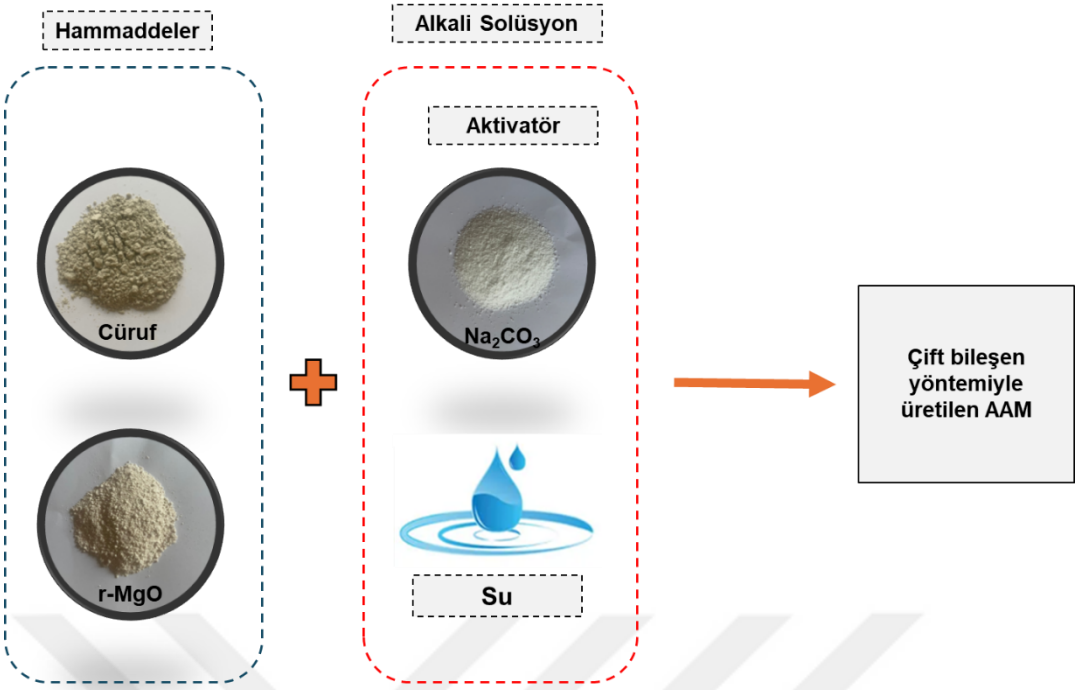
yalnızca çevresel sürdürülebilirliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda atık yönetimine de katkı sağlamaktadır.

AAM üretiminde iki ana teknik öne çıkmaktadır. Bunlar: tek bileşenli (one-part) ve çift bileşenli (two-part) yöntemlerdir. Tek-bileşen yöntemi, alkali çözeltiler ve bağlayıcı malzemelerin toz formunda birleştirildiği ve kuru olarak karıştırıldığı, ardından bu karışıma su eklenerek reaksiyonun başlatıldığı süreç olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.1'de tek bileşen yönteminin şematik üretim süreci verilmiştir. Bu yöntem, düşük ekipman maliyeti ve hızlı üretim avantajları sunmaktadır. Ancak, tek-bileşen yöntemi mekanik dayanıklılık ve kimyasal direnç açısından sınırlı performans sağlayabildiği için genellikle düşük gereksinimli uygulamalarda tercih edilmektedir [50, 70].



Şekil 2.1 Tek bileşen yöntemi üretim şeması

Çift-bileşenli yöntemde ise, alkali çözeltilerin bağlayıcı malzemelerle ayrı ayrı hazırlanıp karıştırıldığı bir süreçtir. Bu yöntem, reaksiyon kinetiği ve ürün özellikleri üzerinde daha fazla kontrol sağlayarak yüksek dayanıklılık ve uzun ömürlü performans sunmaktadır [71-73]. Şekil 2.2'de çift bileşen yönteminin şematik üretim süreci verilmiştir.



Şekil 2.2 Çift bileşen yöntemi üretim şeması

Alkali aktivasyon sürecinde kullanılan aktivatörlerin türü ve özellikleri, üretilen malzemenin nihai performansını belirleyen en önemli faktörlerden biri olduğu bilinmektedir. Güçlü alkali aktivatörler; sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) hızlı reaksiyon ve yüksek mukavemet sağlarken, çevre dostu seçenekler olan kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ve sodyum karbonat (Na_2CO_3) düşük çevresel etkileriyle öne çıkmaktadır [68,59]. Aktivasyon sırasında alkali çözeltinin konsantrasyonu, reaksiyon süresi ve kür koşulları, malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerini şekillendiren önemli parametreler arasında sayılmaktadır [52].

Alkalilerle aktive edilen malzemelerin (AAM'ler) üretiminde kullanılan bağlayıcı malzemeler, genellikle alümina ve silika açısından zengin endüstriyel yan ürünler ve doğal hammaddelerden oluşmaktadır. Bu malzemeler, kimyasal içerikleri, reaktiviteleri ve çevresel faydaları nedeniyle AAM'lerin performansı ve sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Yaygın olarak kullanılan bağlayıcı malzemeler arasında uçucu kül (UK), granüle yüksek fırın cürufu (YFC), metakaolin (MK), cam atıkları, silis dumanı (SD) ve reaktif magnezyum oksit (r-MgO) yer almaktadır.

Uçucu kül (UK), termik santrallerden elde edilen, silika ve alümina açısından zengin bir malzeme olarak bilinmektedir. UK, düşük maliyeti ve geniş

erişilebilirliği nedeniyle AAM'lerin üretiminde sıkça tercih edilmektedir [74]. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkali aktivatörlerle kullanıldığında, yüksek mekanik dayanıklılık ve düşük karbon ayak izi sağlamakla birlikte, mikro yapısı sayesinde yoğun bir matris oluşturarak malzemenin dayanıklılığını artırmaktadır [75, 76].

Granüle yüksek fırın cürufu (YFC), demir çelik endüstrisi yan ürünü olup, yüksek oranda reaktif silika ve alüminyum içermektedir. Yapılan bir çalışmada YFC'nin, sodyum silikat ile aktive edildiğinde erken priz ve yüksek mukavemet özellikleri gösterdiği saptanmıştır [48]. Shi vd. YFC'nin kimyasal dayanıklılık ve düşük su emilimi özellikleri nedeniyle zorlu çevresel koşullarda üstün performans sergilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, YFC'nin çevresel etkilerinin düşük olması, sürdürülebilir bir bağlayıcı olarak önemini artırmaktadır [69].

Metakaolin (MK), yüksek sıcaklıkta pişirilen kaolin kilinden elde edilir ve yüksek alümina ve silika içeriği sayesinde güçlü bağlayıcı özellikler göstermektedir [46]. MK, düşük su emilimi ve yüksek mekanik dayanıklılık sağlasa da üretim sürecinin yüksek enerji gereksinimi nedeniyle maliyet açısından bazı sınırlamaları bulunmaktadır [77]. Bununla birlikte, MK'nin üstün mekanik performansı, özel projelerde tercih edilmesini gerektirmektedir [78].

Cam atıkları, yüksek silika içeriği sayesinde alkali aktivasyon süreçlerinde bağlayıcı olarak kullanılan bir diğer malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Yeniden kullanıldığında, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlayarak sürdürülebilir bir malzeme alternatifi sunmanın yanı sıra cam atıklarının düşük reaktiviteye sahip olması nedeniyle genellikle diğer bağlayıcı malzemelerle birlikte kullanılması önerilmektedir [59, 79].

Silis dumanı (SD), silika bakımından zengin mikron boyutundaki parçacıklardan oluşan bir yan ürün olarak tanımlanabilir. Bu malzeme, betonun dayanıklılığını artırmak ve alkali aktivasyon süreçlerinde bağlayıcılığı güçlendirmek için kullanılmaktadır [80]. SD, özellikle suya ve kimyasal etkilere dayanıklılık gerektiren projelerde önemli bir avantaj sunmaktadır.

Reaktif MgO (r-MgO), alkali aktivasyonlu bağlayıcı malzemelerin üretiminde son yıllarda artan bir şekilde kullanılmaktadır. r-MgO, düşük sıcaklıklarda bile yüksek reaktiviteye sahip olması ve silika ile alüminyum içeren malzemelerle kimyasal

olarak kolayca birleşerek bağlayıcı özellikler oluşturması nedeniyle dikkat çekmektedir [81]. Bu malzeme, özellikle mekanik dayanıklılık ve termal kararlılık gerektiren projelerde avantaj sağlamaktadır [78]. Ayrıca, çevre dostu ve ekonomik bir seçenek sunarak sürdürülebilir yapı projelerinde tercih edilmektedir. r-MgO, karbon ayak izini önemli ölçüde azaltması ve düşük sıcaklıktaki etkinliği ile AAM'lerin üretimi sırasında kullanılan bağlayıcı malzemeler içerisinde öne çıkmaktadır.

Alkalilerle aktive edilen malzemelerin (AAM'ler) üretiminde kullanılan aktivatörler, bağlayıcı malzemelerin reaksiyonunu başlatan ve bu malzemelerin performansını, dayanıklılığını ve reolojik özelliklerini belirleyen temel bileşenlerin başında gelmektedir. Aktivasyon süreçleri genellikle alkali çözeltilerle gerçekleşmekte ve bu süreçte sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$), sodyum karbonat (Na_2CO_3), potasyum karbonat (K_2CO_3), lityum hidroksit (LiOH) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) gibi çeşitli aktivatörler kullanılır. Her bir aktivatör, farklı reaktivite seviyeleri ve kimyasal özellikler sunmaktadır bu da malzemenin nihai performansını doğrudan etkilemektedir.

Sodyum Hidroksit (NaOH), AAM üretiminde en yaygın kullanılan aktivatörlerin başında gelmektedir. NaOH, bağlayıcı malzemelerin çözünürlüğünü artırarak hızlı reaksiyon süreçlerini tetiklemektedir. Düşük maliyetli olması ve kolay erişilebilirliği nedeniyle endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmekle birlikte aşındırıcı etkileri ve çevresel riskleri, üretim süreci sırasında dikkatli olunmasını gerektirir [68, 73].

Potasyum Hidroksit (KOH), NaOH'a kıyasla daha güçlü bir alkali aktivatör olmakla birlikte yüksek pH değerlerinde daha etkili çalışmaktadır. KOH, özellikle yüksek mekanik dayanıklılık ve termal kararlılık gerektiren projelerde tercih edilmektedir. Bununla birlikte, KOH'ın yüksek maliyeti, büyük ölçekli projelerde kullanımını sınırlayan bir faktör olarak öne çıkmaktadır [82].

Sodyum Silikat (Na_2SiO_3), mekanik dayanıklılığı artıran ve bağlayıcı matrisinin sertleşmesini hızlandıran bir aktivatör olarak bilinmektedir. Na_2SiO_3, NaOH ile kullanıldığında bağlayıcı malzemenin performansını önemli ölçüde

iyileştirmektedir [72]. Çevre dostu özelliklere sahip olmasına rağmen, yüksek maliyetleri büyük ölçekli üretimlerde bir dezavantaj yaratmaktadır [59].

Kalsiyum Hidroksit ($Ca(OH)_2$), çevresel sürdürülebilirlik ve düşük maliyet avantajlarıyla dikkat çeken bir aktivatördür. Düşük sıcaklıklarda etkin bir şekilde çalışabilmesi, karbon emisyonunu azaltması ve organik atıklarla uyumlu olması, $Ca(OH)_2$'yi sürdürülebilir inşaat projelerinde ideal bir seçenek haline getirmektedir [68, 59].

Sodyum Karbonat (Na_2CO_3), enerji tasarrufu ve çevre dostu özellikleri ile öne çıkmaktadır. Na_2CO_3, düşük sıcaklıklarda etkin bir şekilde çalışmanın yanı sıra karbon emisyonunu azaltmasıyla bilinmektedir [83]. Ancak, Na_2CO_3'ün reaksiyon süresi NaOH ve KOH'ye kıyasla daha uzun olduğundan, genellikle düşük hızlı üretim süreçlerinde tercih edilmektedir [52].

Potasyum Karbonat (K_2CO_3), Na_2CO_3'e benzer özellikler göstermesine rağmen, daha yüksek termal dayanıklılık sağlayabilmektedir. Yüksek sıcaklık koşullarında dayanıklı yapılar üretmek için kullanılmakta, ancak maliyeti nedeniyle sınırlı uygulamalarda tercih edilmektedir [83].

Lityum Hidroksit (LiOH), son yıllarda AAM üretiminde kullanılan yeni nesil bir aktivatördür. LiOH, yüksek çözünürlük kapasitesi ve düşük sıcaklıklarda etkin çalışma özelliği ile dikkat çekmektedir [56]. Özellikle zorlu çevre koşullarında dayanıklı malzemeler üretmek için tercih edilmektedir. Ancak, LiOH'nin yüksek maliyeti ve sınırlı bulunabilirliği, geniş ölçekli kullanımını kısıtlamaktadır.

Sodyum Sülfat (Na_2SO_4), AAM üretiminde daha az olarak kullanılmasına rağmen, çevre dostu özellikleri ve düşük aşındırıcılığı nedeniyle bazı projelerde tercih edilmektedir. Yapılan bir çalışmada Na_2SO_4 ‘ün, özellikle düşük çevresel etkilerle dayanıklı malzeme üretimi için uygunluğunu kanıtlamıştır [59].

AAM’lerin reolojik ve mekanik özellikleri, bu malzemelerin uygulama alanlarını ve performansını doğrudan etkileyen kritik faktörler arasında yer almaktadır. Reolojik özellikler, özellikle üretim süreçlerinde malzemenin taze hal özelliklerinden olan işlenebilirliği, viskozitesi ve akış davranışı ile ilişkilendirilmektedir. AAM'ler, geleneksel bağlayıcı malzemelere kıyasla daha düşük viskozite ve yüksek akışkanlık gösterme potansiyeline sahiptir. Bu özellik,

malzemenin kolay bir şekilde şekillendirilmesini ve karmaşık geometrik yapıların oluşturulmasını mümkün kılmaktadır [72,84].

Reolojik davranışların optimize edilmesinde nano katkı maddeleri önemli bir rol oynamaktadır. Nano-silika gibi malzemeler, AAM'lerin viskozitesini artırırken akışkanlık özelliklerini iyileştirebilmekte ve homojen bir yapı oluşturarak mekanik dayanıklılığı artırmaktadır [52,73]. Ayrıca, bu nano katkılar, karışımın stabilitesini artırarak ayrışmayı engellemekte ve uzun ömürlü yapı malzemelerinin üretilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda, nano malzemelerin reolojik özellikler üzerindeki etkisi üzerine yapılan kapsamlı çalışmalar, bu tür katkıların gelecekteki potansiyelini ortaya koymaktadır [59].

2.2 Nano Malzemelerin İnşaat Sektöründe Kullanımı

Nano-malzemeler (NM), inşaat sektöründe son yıllarda büyük ilgi gören ve yapı malzemelerinin performansını önemli ölçüde iyileştiren bileşenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Genellikle 100 nanometreden daha küçük boyutlara sahip olan bu malzemeler, organik ve inorganik bileşenlerden oluşan ince tozlar şeklindedir ve üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleriyle dikkat çekmektedirler [85]. NM'lerin kullanımı, yapı malzemelerinin dayanıklılığını artırmanın yanı sıra, çevresel etkilerini de azaltma potansiyeline sahiptir [86].

Nano-malzemelerin en belirgin özelliklerinden biri, yüksek yüzey alanı ve kimyasal reaktivitesidir. Bu özellik, onların beton gibi yapı malzemelerine dahil edilerek mikro yapılarının güçlendirilmesine olanak tanımaktadır. Örneğin, nano-silika, nano-alümina ve nano-titanyum dioksit gibi malzemeler, akışkanlık, kıvam ve viskozite gibi özelliklerini iyileştirerek, malzemelerin daha homojen olmasını sağlamakla birlikte işlenebilirliğini artırmaktadır. Çimento matrisinin; sertleşme sürecini hızlandırır ve durabilitesini iyileştirmektedir [87-90].

Bu iyileştirmeler, betonun yerleştirilmesini kolaylaştırmakla birlikte yüksek performanslı betonların üretimini desteklemektedir. Yapılan çalışmalar, nano-silikanın çimento esaslı malzemelerin mekanik özelliklerini ve reolojik davranışlarını iyileştirdiğini göstermektedir. Özellikle nano-silika, betonun çekme dayanımını artırarak mikro yapısını güçlendirmektedir. [91,92]

NM’ler ilgili yapılan çalışmalar hem PÇ esaslı hem de alkaliyle aktive edilmiş bağlayıcı sistemler üzerinde yapılmış olsa da, AAM’lerde kullanımına yönelik çalışmalar nispeten daha yeni olup, son on yılda büyük ilgi görmüştür [93]. NM’lerin AAM’lere eklenmesi, bu malzemelerin mekanik özelliklerini ve kimyasal direncini, böylece daha dayanıklı ve servis ömrü uzun yapılar inşa edilmesini sağlamaktadır [94,95].

Nano-malzemeler, AAM'lerde diğer özelliklerin yanı özellikle 3B dijital teknolojiler açısından reolojik iyileştirmeler sağlayarak malzemenin işlenebilirliğini olumlu yönde etkilemektedir. NS ve diğer nano-malzemeler, AAM'lerin mikro yapısında ince taneli ve güçlü bir yapı oluşturarak, yerleştirilme sürecinde daha verimli sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Bu iyileştirmeler, aynı zamanda AAM’lerin çevresel etkilerden daha az etkilenmesine de olanak sağlamaktadır. Reolojik iyileştirmeler, sadece malzemenin işlenebilirliğini değil, aynı zamanda son üründeki yapısal bütünlüğü de etkilemektedir [96]. NS’nın AAM'lerin reolojik özellikleri üzerindeki etkisinin, malzemenin dayanıklılığını ve servis ömrünü artırmada etkili olduğu vurgulanmıştır [96]. Özellikle AAM'lerin agresif çevresel koşullara karşı direncini artıran bu iyileştirmeler, yapıların performansını uzun vadede artırabilir.

NS, bu malzemelerin çevresel sürdürülebilirliğini artırmaktadır çünkü atık ürünlerden elde edilebilen bir malzeme olarak geri dönüşüm potansiyeline sahiptir [97]. Bu durum, AAM’lerin çevre dostu bir alternatif olarak daha geniş bir kullanım alanı bulmasını mümkün kılmaktadır.

NM’lerin beton ve çimento sektörlerindeki etkileri yalnızca mekanik ve fiziksel özelliklerle sınırlı kalmamaktadır. Nanoteknoloji, aynı zamanda daha verimli, çevre dostu ve uzun ömürlü yapıların inşasına olanak sağlamaktadır [98]. Kimyasal özellikleri iyileştiren bu malzemeler, enerji verimli yapıların inşasına katkıda bulunmakta, düşük maliyetli onarım imkanları sunmakta ve içyapıların uzun ömürlü olmasını mümkün kılmaktadır [99].

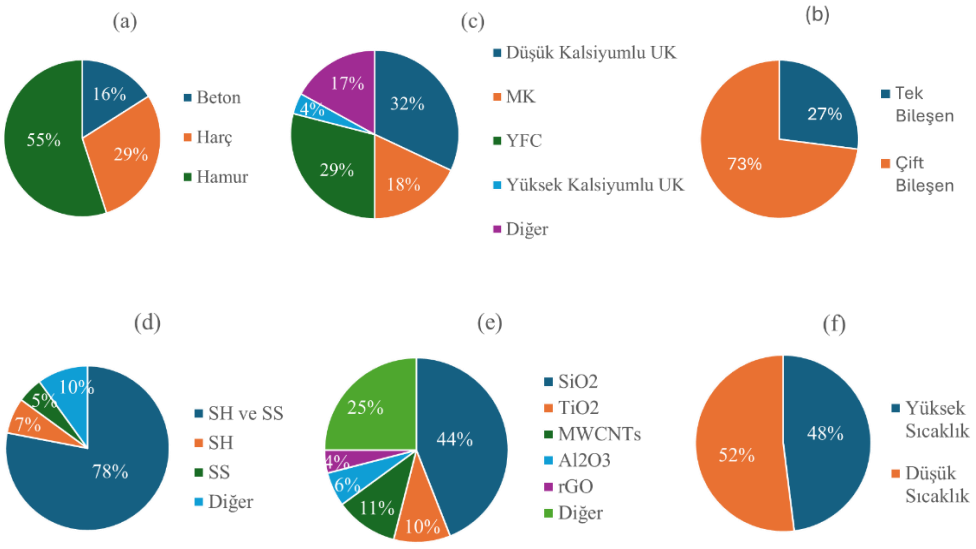
İnşaat sektöründeki kullanımları açısından NM’ler, yüksek mekanik dayanım, çevresel etkilere karşı yapıyı koruma, yapının servis ömrünü artırma, malzeme yönetim süreçlerinde verimliliği artırma ve enerji kullanımını azaltma gibi birçok parametreye katkı sağlamaktadır [100,101].

Son yıllarda ise gelişen teknoloji ile bu malzemelerin 3 boyutlu yazıcı teknolojisi aracılığıyla inşaat malzemelerinde kullanımı, ayrı bir araştırma konusu olarak öne çıkmaktadır [102]. NM'ler, 3B yazıcı teknolojisinin gelişiminde önemli bir rol üstlenmektedir. Bu malzemeler, yapı malzemelerinde yazıcıdan çıkan yapıların mekanik dayanımını, sertliğini, su geçirmezliğini ve diğer birçok özelliğini iyileştirmekte; malzeme performansını optimize ederek daha verimli sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır [103,104].

Ancak, NM'lerin maliyetinin yüksek olması ve üretim süreçlerinin hala geliştirilmesi gerektiği unutulmamalıdır. Bu malzemelerin büyük ölçekli uygulamalarda kullanımı, günümüzde sınırlı kalmaktadır; ancak gelecekte bu malzemelerin kullanımının yaygınlaşacağı ve maliyetlerinin düşeceği öngörülmektedir [103]. Yapılan araştırmalar neticesinde NM'lerin, AAM'lerin özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, insan sağlığı ve çevre üzerindeki etkileri henüz tam anlamıyla ele alınmamış olup, uygulamada karşılaşılan bazı sorunlar ve yüksek maliyet nedeniyle NM'lerin kullanıldığı büyük ölçekli uygulamalar hayata geçirilememektedir [105-107].

Nano-malzemelerin sahip olduğu yüksek yüzey alanı/hacim oranı, önemli ölçüde kimyasal reaktivite sağlamaktadır. Bu durum, NM'lerin olağanüstü fiziksel ve kimyasal özelliklerle öne çıkmasına neden olmaktadır [52], [108]. Literatürde, NS'nin AAM'ler üzerindeki başlıca etkilerinin, aktivasyon süreçlerini hızlandırması, reolojik özellikleri iyileştirmesi, 3B yazıcı teknolojilerinde malzeme özelliklerini geliştirmesi ve mekanik performansı artırması olduğu belirtilmektedir [52], [109], [110].

M. van den Heever ve arkadaşlarının yapmış oldukları bir çalışmada, önceki araştırmalarda kullanılan NM'ler arasında, %50'den fazla oranda NS'nin tercih edildiği ve dolayısıyla hakkında en fazla yayın yapılan nano-malzeme olduğu vurgulanmıştır [105].



Şekil 2.3 2013 ve 2022 yılları arasında yapılan AAM'ler ile ilgili detaylı bir çalışmanın yüzdeleri [52]

NS, geniş bir yüzey alanına ve yüksek reaktiviteye sahip olup, bu özellikleri sayesinde kimyasal reaksiyonlarda oldukça aktif bir bileşen olarak öne çıkmaktadır. NS'nin AAM'lere eklenmesi, bu malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmelere neden olmaktadır. Özellikle NS, AAM'lerin dayanıklılığını ve çevresel sürdürülebilirliğini artırırken, reolojik özelliklerini de iyileştirmektedir. Viskozite, akışkanlık, yerleştirilebilirlik ve su emme gibi faktörler üzerinde belirgin etkiler gösteren NS, AAM'lerin işlenebilirliğini geliştirerek yapı malzemelerinin kalitesini artırmaktadır [88], [94].

Literatürdeki bazı çalışmalarda NS için, gelecekte daha çevre dostu, dayanıklı ve verimli inşaat malzemelerinin üretimini mümkün kılacak önemli bir bileşen olduğu iade edilmektedir [103, 111, 112].

NS, yüksek puzolanik reaktivitesi ve sahip olduğu incelik sayesinde gösterdiği gözenek doldurma etkisinin bir sonucu olarak, sertleşmiş haldeki özellikleri iyileştirmek amacıyla karışımlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır [113]. NS'nin ince ve küresel yapısı, polimerizasyon reaksiyonlarındaki yüksek reaktivitesini açıklamaktadır [114].

NS, küçük parçacık boyutları ve yüksek yüzey alanı sayesinde alkali aktivasyonlu malzemelerin (AAM'ler) mekanik ve reolojik özelliklerini önemli ölçüde geliştirmektedir. Song ve Zeng, NS'nin geleneksel silika kaynaklarına göre daha reaktif olduğunu ve bu nedenle AAM'lerin mekanik özelliklerinde belirgin bir artış

sağladığını belirtmişlerdir [115]. NS, daha ince taneli olduğu için filler özellik göstermekte, dayanıklılığı artırmakta ve uzun ömürlü malzemeler üretilmesini sağlamaktadır.

Zhang ve Li, NS'nin alkali çözeltisiyle çok hızlı bir kimyasal etkileşim sağladığını ve bu sürecin AAM'lerin erken aşamalarda yüksek dayanım kazanmalarına olanak tanıdığını ifade etmişlerdir [92]. Bu hızlandırılmış reaksiyon süreci, özellikle 3B yazıcı teknolojisi ile yapılan üretim sürelerini kısaltarak enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Ayrıca Tayeh ve Wong, NS'nin AAM'lerin kimyasal dayanıklılığını artırarak suya ve kimyasallara karşı direnç kazandırdığını vurgulamışlardır [116].

Literatürde, NS'nin farklı malzemelerle birlikte farklı oranlarda (%0-10 arası) kullanıldığı birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak malzeme kompozisyonlarına bağlı olarak optimum NS oranı değişkenlik göstermektedir. Optimum oran üzerinde NS kullanımının mekanik özelliklerde zayıflamaya neden olduğu, önceki araştırmalarda ortaya konulmuştur [52], [117], [118]. Optimum orandan daha yüksek miktarlarda kullanıldığında veya uygun şekilde dağılmadığında, NS'lerin sahip olduğu incelik ve yüksek özgül ağırlık nedeniyle su ihtiyacı artmakta, önemli miktarda serbest su emilerek işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir [52], [119-122].

Zhang vd. yaptığı bir literatür taraması çalışmasında, NM'ler kullanılarak yapılan önceki deneysel çalışmaların %73'ünün çift-bileşen yöntemiyle yapıldığını ortaya koymuştur [50]. NS'nin ıslak ve kuru karışım yöntemleriyle ilavesinin mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği bir çalışmada, ıslak karışımla elde edilen numunelerdeki düşük mekanik özellikler sergilediğini saptamıştır. Ancak yine de hem ıslak hem de kuru karışım yöntemleriyle referans numunelerden daha iyi mekanik performans gözlemlenmiştir [119].

Nano-silika, AAM'lerin reolojik özelliklerini iyileştirmekte önemli bir rol oynamaktadır. Alonso ve Palomo, nano-silikanın AAM'lerin akışkanlık özelliklerini iyileştirdiğini ve reolojik stabilite sağladığını ifade etmişlerdir [96]. NS, parçacık boyutunun küçüklüğü sayesinde karışımın daha az su ile daha güçlü hale gelmesine katkı sağlamakta ve homojen karışımların elde edilmesine yardımcı

olmaktadır. Liu vd., nano-silikanın viskoziteyi artırarak malzemenin daha homojen hale gelmesine yardımcı olduğunu belirtmişlerdir [123].

Malkawi ve arkadaşları, NS'nin mikro yapıyı homojenleştirerek karışımın yapısal bütünlüğünü güçlendirdiğini ifade etmişlerdir. Bu özellik, yerleştirme ve döküm işlemleri sırasında daha az pürüz ve çatlak oluşmasını sağlamaktadır. Ayrıca, NS karışımın viskozitesini artırarak 3B yazıcı teknolojisi için gerekli olan daha sıkı bir yapısal bağ oluşturulmasına olanak tanımaktadır [124].

3B yazıcılarla üretilen yapıların başarılı olabilmesi için kullanılan malzemelerin belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Akışkanlık, viskozite, yazdırılabilirlik ve üretilebilirlik gibi faktörler, malzemenin yazıcıyla uyumlu bir şekilde işlenmesini ve yüksek performans göstermesini sağlamaktadır. Nano malzemeler, özellikle NS, bu parametrelerin iyileştirilmesinde etkili bir çözüm sunmaktadır.

Nano-silika, 3B yazıcılarla üretilen yapıların mekanik dayanımını artırabilmektedir. Zhang ve Li, nano-silika eklemesinin beton karışımının mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ve özellikle çekme dayanımını artırarak malzemenin daha sağlam hale geldiğini ifade etmişlerdir. Bu durum, yazıcıdan çıkan yapıların daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, NS, betonun mikro yapısındaki boşlukları doldurarak daha kompakt ve homojen bir yapı oluşturmaktadır. Bu özellik, yapıların uzun vadeli dayanıklılığını artırmaktadır [97].

3B yazıcı teknolojisinde kullanılan malzemelerin reolojik özellikleri, yazıcının işleyişini doğrudan etkilemektedir. Malzemenin doğru akışkanlık ve viskoziteye sahip olması, yazıcının malzemeyi düzgün bir şekilde uygulamasını sağlamaktadır. NS, betonun viskozitesini artırarak daha düzgün ve homojen karışımlar elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Liu ve arkadaşları, NS'nin beton karışımının akışkanlık ve reolojik özelliklerini iyileştirdiğini ve yazıcıdan çıkan yapıların kalitesini artırdığını belirtmişlerdir. Bu iyileşme, özellikle ince detaylı ve karmaşık yapıların yazıcılardan doğru bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır [123].

Nano-silika, 3B yazıcılarla üretilen yapıların suya karşı dayanıklılığını da artırmaktadır. Zhang ve çalışma arkadaşları, NS ile takviye edilmiş betonların su emme oranlarının düşürüldüğünü ve böylece su geçirmezlik sağlandığını ifade

etmişlerdir [125]. Bu özellik, özellikle dış mekân yapılarında suyun ve nemin malzeme üzerinde olumsuz etkiler yapmasını engellemektedir. Su geçirmezlik, yapıların uzun vadeli dayanıklılığını artırmakta ve bakım gereksinimlerini azaltmaktadır. Ayrıca, su geçirmez özellikler, yapıların dış etkilere karşı dirençli hale gelmesini sağlamaktadır.

Nano-silika, betonun erken aşamalarındaki sertleşme sürecini de hızlandırabilmektedir. Bu özellik, yazıcıdan çıkan yapıların hızlı bir şekilde dayanıklılık kazanmalarını sağlamaktadır. Song ve Zeng, NS eklemesinin, malzemenin erken dayanımını artırarak yapıların baskı işleminden sonra hızla katılaşmasını sağladığını belirtmişlerdir [115]. Bu durum, yazıcının üretim sürecini hızlandırmakta ve daha verimli bir üretim sürecine olanak tanımaktadır.

Nano-silikanın 3B yazıcı teknolojisi ile üretim süreçlerine olan katkıları, yalnızca mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ile sınırlı kalmamaktadır. NS kullanımı, yazıcıların hızını artırmakta, malzemenin dayanıklılığını yükseltmekte, su geçirmezliği sağlamakta ve çevre dostu yapıların üretimini teşvik etmektedir. Bu özellikler, 3B yazıcı teknolojisinin inşaat sektöründe yaygınlaşmasına ve sürdürülebilir inşaat çözümlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Nano-silikanın amorf yapısı sayesinde iyi puzolanik özellikler sergilediği bilinmektedir. Bunun yanı sıra, betonda filler özellik göstermekte; betonun reolojik, mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmektedir. Bu çalışmada üretilecek alkali aktivasyonlu malzemelerin (AAM); jeopolimerizasyon süreçlerini hızlandırması, priz süresini azaltması, aktivasyonu iyileştirmesi, hidratasyon işlemlerini ve ürünlerini artırması, ayrıca reolojik özellikler üzerinde iyileştirici etkilere sahip olması ve 3B yazıcı teknolojisi için gerekli olan özellikler üzerinde olumlu etkiler sağlayacağı öngörülmektedir [126,127,36,37].

2.3 Alkalilerle Aktive Edilen Malzemelerin Reolojik Özellikleri

2.3.1 Reolojik Modeller

Reoloji; her türlü malzemenin yük, akış, deformasyon ve zamana bağlı olarak davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Malzemelerin reolojik özellikleri, akış hızı, sıcaklık, basınç gibi faktörler başta olmak üzere aktivatörün tipine, kimyasal birleşimine, konsantrasyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Reolojik

özellikler malzemelerin akış davranışlarını anlayabilmek açısından önem arz etmektedir.

Son yıllarda, 3B yazıcı teknolojisi kullanımının artması ile eşik kayma gerilmesi, plastik viskozite, viskozite toparlanması gibi reolojik parametreler mutlaka belirlenmesi gereken özellikler olarak ön plana çıkmaktadır. [128,129].

Literatürde, çimento esaslı malzemelerin reolojik davranışlarını tanımlamak ve buna bağlı olarak reolojik parametrelerin belirlenmesi için çeşitli reolojik modeller kullanılmaktadır. Her bir malzeme için uygun olan reolojik model, malzemeden elde edilen akış eğrisi dikkate alınarak seçilmektedir. Çimento esaslı karışımlar, genellikle Bingham modelini sergiler. Bu modelde, malzemenin akmaya başlaması için belirli bir kayma gerilmesi gereklidir [130]. 3B yazıcı uygulamaları için bu model, baskı sürecinde malzemenin nasıl akış davranışı göstereceği hakkında bilgi verir. Bu tip malzemelerde viskozite, akış hızına bağlı olarak değişmektedir. Power-Law ve Herschel-Bulkley modelleri, bu tür malzemelerin reolojik davranışlarını daha doğru şekilde tanımlamak için kullanılır [131]. Bu modeller, 3B yazıcı ile üretilecek malzemenin davranışını tahmin etmemize yardımcı olmaktadır [132].

Çimento esaslı sistemlerin reolojik davranışlarını tanımlamak için sıklıkla Bingham ve Herschel-Bulkley modelleri kullanılır [133].

Bingham modeli, malzemenin akmaya başlaması için belirli bir eşik kayma gerilmesi (τ_0) gerektiğini ve bu eşiğin aşıldıktan sonra kayma gerilmesinin (τ), kayma hızı ($\dot{\gamma}$)ile doğrusal bir ilişki içinde olduğunu varsayar [134].

Bingham modeli şu şekilde ifade edilir:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \qquad \text{(Denklem 2.1)}$$

Burada: μ_p, plastik viskoziteyi temsil etmektedir.

Bu model, çimento hamurlarının ve betonların reolojik davranışlarını basit ve etkili bir şekilde tanımlamada kullanılır [135]. Ancak, bazı durumlarda malzemelerin davranışı bu modelin öngördüğünden daha karmaşık olabilir.

Herschel-Bulkley Modeli, Bingham modelinin daha genel bir versiyonudur ve viskoziteyi hem akış hızına hem de akış gerilmesine bağlı olarak tanımlar. Herschel-Bulkley modeli, çimento ve beton karışımlarında zamanla değişen

viskoziteyi ve akışkanlık özelliklerini dikkate alır. Çimento harçlarının yerleşmesi ve betonun işlenebilirliği ile ilgili hesaplamalarda kullanılır.

Bu model, eşik kayma gerilmesi (τ_0) aşıldıktan sonra kayma gerilmesinin (τ), kayma hızının ($\dot{\gamma}$) bir kuvvetine bağlı olduğunu varsayar ve şu şekilde ifade edilir:

$$\tau = \tau_0 + K.\dot{\gamma}^{n} \qquad \text{(Denklem 2.2)}$$

Burada K, kıvam katsayısını ve n ise akış davranış indeksini temsil eder. Eğer, $n = 1$ ise model Bingham modeline indirgenir, $n < 1$ ise malzeme kayma incelmesi (pseudoplastik davranış), $n > 1$ ise kayma kalınlaşması (dilatant davranış) sergiler [134]. Herschel-Bulkley modeli, çimento esaslı malzemelerin reolojik davranışlarını daha doğru bir şekilde tanımlamada etkilidir [136].

Çimento esaslı malzemelerin 3B baskıda kullanımına yönelik yapılan çalışmalar, reolojik modellerin malzemenin ekstrüzyon sürecinde nasıl akacağını anlamak için kritik olduğunu göstermektedir [133]. Roussel bir çalışmasında, baskıya uygun betonların reolojik gereksinimleri belirlenmiş ve bu gereksinimlerin Bingham ve Herschel-Bulkley modelleriyle nasıl ilişkilendirildiği analiz etmiştir [135].

Çimento esaslı sistemlerde kullanılan katkı maddeleri, malzemenin reolojik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Shahsavari & Behfarnia, nano-silika katkısının kendiliğinden yerleşen betonlarda viskoziteyi nasıl değiştirdiğini analiz etmiş ve bu tür katkıların Bingham modeline olan etkisini incelemiştir [137]. Benzer şekilde, Assaad, aminosilikon esaslı katkı maddesi içeren çimento hamurlarının reolojik karakterizasyonunu Herschel-Bulkley modeli kullanarak analiz etmiştir [136].

Bu çalışmalar, çimento esaslı malzemelerin taze hal davranışlarının anlaşılmasına ve optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Özellikle, farklı katkı maddelerinin ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin malzemenin reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmede bu modeller önemli araçlar sunmaktadır [134].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde reolojik ölçümlerin standart bir metodu bulunmamakla birlikte, malzemenin cinsine, fiziko-kimyasal yapısına, aktivatörün tipine, konsantrasyonuna, çalışmanın amacına göre ölçüm yöntemlerinin çeşitlendiği görülmüştür. Alghamdi vd., çalışmalarında bağlayıcı malzeme olarak; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, sıradan Portland çimentosu, kireç taşı ve alümina tozu gibi malzemeler kullanılmıştır. NaOH ve Na_2SO_4 ile hazırlanan karışımların

reolojik özelliklerini ölçmek için TA Inst. AR 2000EX model reometre cihazı kullanılmıştır. Reolojik ölçüm prosedüründe, karışımın homojenleşmesi için yaklaşık 80 saniyelik bir ön kayma gerilmesi uygulanmış ve ardından çıkış ve iniş eğrilerini gerçekleştirerek çalışmalarına devam etmişlerdir [138].

Guo ve diğ., 3B yazıcı teknolojisi için hazırlanan karışımların reolojik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, uçucu kül, cüruf, silis dumanı ve sodyum silikat tozu kullanmışlardır. Hazırlanan karışımların reolojik özelliklerini belirlemek için RVDV-2 tip rotasyonel viskometre cihazı kullanılmışlardır. Ölçüm prosedüründe, viskometre ile sabit kayma hızlarında 12 kez ölçüm yapılarak, ölçüm sonuçlarının ortalamaları alınmış ve bu veriler kullanılarak farklı reolojik modellerle eşik kayma gerilmeleri ve plastik viskozitelerini hesaplamışlardır. Çalışma sonucunda, Herschel-Bulkley modelinin, uçucu kül esaslı jeopolimerlerin reolojisini açıklamada Bingham modeline göre daha üstün olduğunu ortaya koymuşlardır [139].

Kondepudi ve Subramaniam, alkali-aktif uçucu kül ve cüruf esaslı karışımların 3B yazıcılarda kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada, ana bağlayıcı malzemelerin yanı sıra, mikro silika ve kil gibi bağlayıcı malzemeler NaOH ile aktive edilerek üretimler gerçekleştirilmiştir. Reolojik ölçümler, AR-G2 gerilme kontrollü reometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kalıp içerisinde döner kanat uç kullanılarak plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi ölçülmüştür. Ölçümde kayma hızı 40 s^{-1}'ye çıkarılmış ve ardından sıfıra düşürülmüştür. Çalışma, yapının üretilebilirliğinin sağlanabilmesi için eşik kayme gerilmesi değerinin 500 Pa'nın altına düşmemesi gerektiğini vurgulamamıştır [140].

Kondepudi ve ark., AAM'lerin 3B yazıcılarda reolojik gereksinimlere uygunluğunu incelemişlerdir. Reolojik ölçümler sırasında Viskomat XL reometre ile yapılan ölçümlerle, kayma hızları belirli aralıklarla arttırılıp düşürülerek reolojik parametreler elde edilmiştir. Çalışmada Bingham modeli kullanılmış ve reolojik parametrelerin 3B yazıcılar için uygunluğunu analiz etmişlerdir [141].

Ma ve arkadaşları, çelik cürufu eklenmiş jeopolimerlerin 3B yazdırılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, reolojik ölçümler Viskomat NT reometre ile yapılmıştır. Kayma hızı, sıfırdan 50 s^{-1}' ye çıkarılmasıyla birlikte bir ön kayma evresi gerçekleşmiş ve sonra kayam hızı artırılmış ve azaltılmıştır. Plastik viskozite

ve eşik kayma gerilmesi ölçümleri ile birlikte, statik kayma gerilmesi farklı zaman aralıklarında test edilmiştir. Bingham modeli reolojik model olarak kullanılmış ve karışımların 3B yazıcılar için uygunluğu değerlendirilmişlerdir [142].

Panda ve Tan, uçucu kül, cüruf ve silis dumanı kullandıkları bir çalışmalarında aktivatör olarak K_2SiO_3 ve NaOH çözeltisiyle karışımları hazırlamışlardır. Anton Par MCR 102 rotasyonel reometre cihazı ile reolojik ölçümler yapılmış ve eşik kayme gerilmesi, plastik viskozite ve statik kayma gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Kayma hızı, 60 rpm'ye çıkarılarak 1 dakika boyunca devam etmiş sonra kayma hızı sıfıra düşürülmüştür [143].

Paul ve arkadaşları, 3B yazdırılabilir yapı malzemelerinin taze ve sertleşmiş özelliklerini inceledikleri çalışmalarında, cüruf, uçucu kül ve silis dumanı gibi bağlayıcılar kullanmışlardır. K_2SiO_3, KOH ve sodyum lignosülfonat gibi aktivatörler ile karışımlar hazırlanmış ve Schleibinger Viskomat XL reometre cihazı kullanılarak akış eğrisi testi yapmışlardır. Kayma hızı, 60 rpm'ye hızlandırıldıktan sonra 2 dakika sabit tutulmuş ve ardından sıfıra indirilmiştir [144].

Albar ve arkadaşları, bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül, cüruf ve silis dumanı kullanarak 3B yazdırılabilir jeopolimer karışımlarının reolojisini incelemişlerdir. Na_2SiO_3 ve NaOH solüsyonu ile hazırlanmış olan karışımların reolojik özellikleri, KinexusLab+ reometre ile ölçülmüştür. Reolojik ölçümler sırasında, görünür viskozite (viskozite toparlanma) ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarından hareketle modifiye Bingham modeli uygulanmıştır. Kayma hızları 0.1 s^{-1} ile 30 s^{-1} arasında ölçülmüş ve çalışmada 25 katmanlı 250 mm yüksekliğinde bir yapı başarıyla üretilebilmiştir [145].

Sun ve arkadaşları, cüruf, kalsiyum karbonat ve CMS gibi malzemeleri kullanarak 3B yazdırılabilir jeopolimer kompozitlerini inceledikleri çalışmada, Na_2O ve SiO_2 konsantrasyonları üzerine odaklanmışlardır. Anton Par MCR 301 rotasyonel reometre cihazı ile yapılan ölçümlerde, kayma hızı 100 s^{-1}'ye kadar artırılmış ve çeşitli testler ile reolojik parametreler belirlenmiştir. Herschel-Bulkley modeli kullanılarak plastik viskozite ve eşik kayma gerilmeleri hesaplanmış, ardından elde edilen verilerle 200 mm yüksekliğinde bir vazo modeli başarıyla basılmıştır [146].

İnşaat sektöründe son yıllarda büyük ilgi gören ve yapı malzemelerinin performansını önemli ölçüde iyileştiren bileşenler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Genellikle 100 nanometreden daha küçük boyutlara sahip olan bu malzemeler, organik ve inorganik bileşenlerden oluşan ince tozlar şeklindedir ve üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleriyle dikkat çekmektedirler [85]. NM'lerin kullanımı, yapı malzemelerinin dayanıklılığını artırmanın yanı sıra, çevresel etkilerini de azaltma potansiyeline sahiptir [86].

2.3.2 AAM'lerin Reolojik Özellikleri Açısından Literatür İncelemesi

Yapı malzemeleri, son yıllarda sürdürülebilirlik, verimlilik ve inovasyon talepleri doğrultusunda büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Bu dönüşümde, malzemelerin akışkanlık ve deformasyon özelliklerini anlamak için yapılan reolojik çalışmalar kritik bir rol oynamaktadır. Reoloji, malzemelerin akış ve şekil değiştirme özelliklerini inceleyen bir bilim dalı olarak, çimento esaslı sistemler ve alkalilerle aktive edilen malzemelerin üretim aşamasından kalıba yerleşme aşamasına kadarki süreçlerde (üretim, taşıma, pompalama, enjeksiyon, kalıplama, sıkıştırma vb.) üzerinde önemli etkiye sahiptir [147].

Reolojik özelliklerin belirlenmesi, yapı malzemelerinin akış davranışlarının belirlenmesi, farklı katkı maddelerinin çimento esaslı malzemelerin ve alkalilerle aktive edilen malzemelerin taze hal özellikleri üzerindeki etkinin araştırılması ve karşılaştırılması açısından kritik öneme sahiptir. Yapı malzemelerinin taze hal özelliklerinden sayılabilecek; işlenebilirlik, pompalanabilirlik ve yerleştirilebilirlik gibi özelliklerin daha iyi anlaşılması ve iyileştirilmesi için ayrıca önem arz etmektedir. Ayrıca alkalilerle aktive edilen malzemeler ve son yıllarda çalışmaların hızla arttığı 3B yazıcı teknolojisi açısından uygulama sıcaklığının ve tiksotropi (zamana bağlı) davranışının etkilerinin saptanması için gereklidir.

Reolojik çalışmalar ve iyileştirmeler, inşaat sektöründe yeni nesil yapı malzemelerinin geliştirilmesi, mevcut yapı malzemelerinin özelliklerinin iyileştirilmesi ve uygulama süreçlerinin optimize edilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Malzemelerin işlenebilirlik, dayanıklılık ve performansı üzerine yapılan reolojik çalışmalar, sektördeki teknolojik ilerlemeleri desteklemekte ve sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sağlamaktadır. İyi reolojik özellik gösteren malzemelerin iyi taze hal özellikleri (işlenebilirlik, priz süresi vb.) ve üstün mekanik performans sergilediği yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur [39-44]. Nano-malzemelerin, liflerin veya kimyasal katkı maddelerinin reolojik performansı

üzerine yapılan araştırmalar, malzemelerin dayanıklılığını artırabilir veya işlenebilirliklerini iyileştirebilir. Bu yapının üretim süreçlerinde oluşabilecek zaman kaybını önlemekle birlikte sahadaki projenin uygulama hatalarını azaltarak yapının servis ömrünü arttırır. Güncel araştırmalar yapı malzemelerinin performansını optimize etme ve sürdürülebilirliklerini artırma üzerine odaklanmaktadır. Nano-teknolojinin reolojiye etkisi, çimento esaslı malzemelerin nano-malzemelerle güçlendirilmesi gibi konular, günümüzdeki önemli araştırma alanları arasında yer almaktadır [148-149].

Alkalilerle aktifleştirilmiş malzemeler (AAM), son yıllarda yapı malzemeleri açısından dikkat çeken yenilikçi bir alandır. Bu malzemeler, genellikle endüstriyel atıklardan elde edilen ve alkali bir ortamda aktive edilen minerallerle yapılmaktadır. AAM'ler, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyele sahip olup, beton üretimindeki karbon ayak izini azaltmayı hedeflemektedir. Reolojik çalışmalarda, AAM'lerin akışkanlık, viskozite ve yerleştirilebilirlik gibi temel özelliklerinin optimize edilmesi, bu malzemelerin daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [150]. AAM'ler, kullanılan katkı maddeleri ve su/çimento oranı gibi faktörlere bağlı olarak farklı reolojik davranışlar sergileyebilir. Bu nedenle, AAM'lerin reolojik analizleri, taze betonun işlenebilirliği ve dayanımının optimize edilmesi için kritik öneme sahiptir [151].

AAM'lerin reolojik özellikleri, kullanılan alkali çözeltilerin türüne, karışımdaki bileşen oranlarına ve aktivasyon koşullarına bağlı olarak değişir. Bu malzemelerin taze halindeki viskozite, akışkanlık ve pompalanabilirlik özelliklerini optimize etmek için yapılan reolojik çalışmalar, AAM'lerin beton sektöründeki kullanımını artırmaktadır [152-154].

Alkalilerle aktifleştirilmiş malzemelerin reolojik davranışlarını iyileştirmek amacıyla yapılan çalışmalar, bu malzemelerin yerleştirilebilirliğini ve dayanıklılığını artırmak için özel katkılar ve formülasyonlar geliştirmeyi hedeflemektedir. Alkalilerle aktifleştirilmiş betonların mekanik özellikleri de bu tür araştırmalarla iyileştirilmektedir. Bu malzemelerin taze halindeki reolojik davranışlarının anlaşılması, betonun inşaat süreçlerinde daha verimli kullanılmasını sağlar [154-157].

Gelişen teknoloji ile birlikte 3B yazıcı teknolojisinin kullanımı hızla artmaktadır. Bu teknoloji, yapıların hızlı ve verimli bir şekilde üretilmesine olanak tanırken, çimento esaslı malzemelerin akışkanlık ve viskozite gibi reolojik özelliklerinin doğru bir şekilde kontrol edilmesini gerektirir. 3B yazıcılarla yapılan inşaatlarda, malzemenin yerleştirilebilirliği, kalıptaki doğruluğu ve baskı sürecinin verimliliği, reolojik parametrelerin doğru bir şekilde yönetilmesine bağlıdır. Bu bağlamda, çimento esaslı malzemelerin 3B yazıcılarla uyumlu hale gelmesi için reolojik testler yapılmalı ve malzemenin akış özellikleri analiz edilmelidir [158]. 3B yazıcılar, beton, çimento esaslı karışımlar ve AAM'lerin kullanımını mümkün kılarken, bu malzemelerin akışkanlık özelliklerinin optimize edilmesi, baskı sürecinin başarısı için kritik öneme sahiptir.

3B yazıcılarla inşaat yapılabilmesi için kullanılan malzemelerin belirli reolojik özelliklere sahip olması gerekmektedir. Beton karışımlarının viskozitesi, akışkanlığı ve sertleşme hızı, 3B yazıcıların etkinliğini doğrudan etkiler. Reolojik çalışmalar, yazıcılarla inşa edilen yapıların kalitesini artırmak ve yazıcı başlığından malzeme akışını kontrol etmek amacıyla yapılmaktadır [159-161].

3B yazıcı teknolojisinde, beton karışımlarının reolojik özellikleri büyük önem taşır. Betonun viskozitesi, yazıcı başlığından düzgün bir şekilde çıkmasını ve katmanların doğru bir şekilde yerleşmesini sağlar. Ayrıca, hızlı sertleşme özellikleri, katmanlar arasında düzgün bir bağlantı kurar ve yapının dayanıklılığını artırır [161,162].

3B yazıcılar için özel olarak tasarlanmış beton karışımları, bu süreçte kullanılan malzemelerin basılabilirliğini, akışkanlığını ve dayanıklılığını optimize eder [160,162]. Betonun 3B yazıcı teknolojisinde kullanılabilmesi için geliştirilmiş reolojik modeller, yazıcıların hızını, nozzle çapını, basınç seviyesini ve hareket yönünü dikkate alarak karışımların performansını artırmaktadır [163-165]. Bu tür çalışmalar, yazıcı ile inşa edilen yapıların verimliliğini artırmak ve daha dayanıklı yapılar elde etmek için büyük önem taşır.

Akışkanlık, yazdırma tabanlı 3B yazıcıda taze jeopolimerik macunun kritik bir özelliğidir ve bu özellik, baskı sisteminde basınç altında akma kabiliyetini belirler. Akışkanlık, genellikle reolojik viskoelastik parametrelerle açıklanır; bunlar özellikle akma gerilmesi ve dinamik viskoziteyi içerir. Akma gerilmesi, macunun

elastik ve depolama tepkisiyle ilişkilidir, dinamik viskozite ise taze jeopolimerin dağıtıcı viskoz karakterini yansıtır. Bu viskoz ve elastik bileşenlerin yüksek değerleri, 3B yazdırılmış parçaların çökmesini önlerken akışkanlığı düşürür [93, 105, 113]. Bu nedenle, akışkanlık ile ilgili yapılan çalışmalarda, genellikle viskoziteyi değiştirmek için organik ve inorganik değiştiriciler kullanılır; ancak bu değişikliklerin çoğu, yapılabilirlik üzerinde olumsuz etkilere yol açabilmektedir [29]. Böylece, reolojik özelliklerin belirlenmesi, yüksek kaliteli bir jeopolimerik 3B yazıcı malzemesi sağlamak için akışkanlık ve yapılabilirlik arasında bir denge kurmayı gerektirir.

Kaynak malzemelerin türü ve içerdiği aktivatör miktarı gibi parametreler, jeopolimer karışımlarının viskozitesini doğrudan etkiler [54]. Ma ve arkadaşları, Na-, K- ve Cs esaslı jeopolimer karışımların çökme oranlarını inceleyerek, sodyum esaslı aktivatöre sahip jeopolimerlerin, potasyum veya sezyum esaslı aktivatörlere sahip olanlardan daha yüksek viskozite değerlerine sahip olduğunu bulmuşlardır [54]. Bu farklılık, H_2O moleküllerini daha güçlü bağlayan Na+ iyonunun küçük iyonik yarıçapına dayanmaktadır. Şahin ve arkadaşları ise NaOH çözeltisinin molaritesinin arttırılmasının, inşaat ve yıkım molozlarına dayalı jeopolimer karışımlarının akışkanlık indeksini artırdığını, bunun da çözünme hızındaki artışla ilişkili olduğunu ortaya koymuşlardır [113].

Taze jeopolimer karışımlarının akışkanlığı, alüminosilikat öncüllerinin ve agregaların türlerinden ve miktarlarından da etkilenir. Bu etkileşim, özellikle alkali kaynaklarla ve parçacık yapısı ile ilgilidir [118,149]. Takviye liflerinin kullanımı, 3B yazdırılabilir jeopolimer kompozitlerin viskozitesini artırırken [89], ekstrüde edilebilirlik için düşük plastik viskoziteye ve optimum akma gerilmesine sahip ideal bir karışım gereklidir. Kötü dengelenmiş karışımlar ise parçacık ayrışmasına, nozul sıkışmasına ve filament yırtılmasına neden olabilir [89, 121, 124]. Alkali aktivatörün Si/Na oranı, jeopolimerlerin ekstrüde edilebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu oranın azaltılması, yapı yeniden inşa etme yeteneğini artırabilir [97].

Ekstrüde edilebilirlik, taze jeopolimer karışımlarının düzgün bir şekilde nozuldan çıkıp sürekli bir filament üretme yeteneğiyle ilgilidir. Zhang ve diğerleri [97], bu oranın azaltılmasının, parçacık bağlantısını değiştirme açısından daha iyi bir yapı inşa etme yeteneği sağladığını bulmuşlardır. Bu özellik, üre, karboksimetil selüloz

ve diğer reolojik katkı maddelerinin eklenmesiyle iyileştirilebilir [89], 124]. Panda ve Tan, yüksek kum/bağlayıcı oranına sahip jeopolimer karışımlarında yüksek statik kayma gerilmesinin, ekstrüde edilebilirliği azalttığını, bu tür karışımların akışını başlatmak için önemli bir pompalama basıncı gerektiğini keşfetmişlerdir [95]. Ayrıca, ince agrega parçacık boyutu dağılımı da ekstrüde edilebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Fuller-Thompson teorisine dayalı 3B yazdırma malzemelerinin tasarımı, taze jeopolimer karışımlarının iyi ekstrüde edilebilirliğini göstermektedir [94,98, 112].

Jeopolimer karışımlarının reolojik davranışı, kullanılan öncül malzemelerin yanı sıra aktivatör içeriğine de bağlıdır. Muthukrishnan ve arkadaşları, GGBS ve FA esaslı tek parçalı jeopolimerlerin akışkanlığı üzerinde aktivatör içeriğinin artmasının etkisini araştırmış ve bu artışın, daha fazla pompalama enerjisi gerektiren kayma gerilmesinin daha hızlı evrimine yol açtığını keşfetmişlerdir [122]. GGBS ve FA karışımlarının özelliklerini daha ayrıntılı olarak incelediğinde, Guo ve arkadaşları, FA esaslı jeopolimerlere %10 oranında SF eklemenin viskoziteyi artırdığını, ancak SF oranının artmasının küçük parçacık boyutuyla birlikte viskoziteyi azalttığını bulmuşlardır [93]. Bu sonuçlar, aktivatör içeriğinin ve katkı maddelerinin karışımın akışkanlık ve ekstrüde edilebilirlik özelliklerini nasıl değiştirdiğine dair önemli bilgiler sunmaktadır.

2.4 İnşaat Sektöründe Dijital Teknolojilerin Kullanılması

Sanayi devrimi ile başlayan teknolojik gelişmeler günümüze kadar hızla her alanda gerçekleşmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle her alanda olduğu gibi inşaat sektöründe de köklü değişimler yaşanmıştır.

Günümüzde inşaat sektöründe kullanılan teknolojiler, oldukça geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Akıllı bina teknolojileri, enerji verimliliğini artıran ve kullanıcı konforunu sağlayan sistemlerle donatılmış yapılardan oluşur. IoT (Nesne-Eşya İnterneti) sensörleri, binaların performansını izlemekte ve bakım süreçlerini optimize etmektedir [163].

Son yaşanılan teknolojik gelişmeler arasında 3B yazıcı teknolojisinin inşaat sektöründe kullanılmaya başlaması da örnek verilebilir. 3B yazıcılar inşaat sektöründe devrim niteliğinde bir gelişme olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu

teknoloji, yapı bileşenlerinin hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. [164]

3B yazıcı teknolojisinin inşaat süreçlerinde kullanılması farklı bir bakış açısı kazandırmanın yanı sıra birçok fayda sağlamakta ve süreçleri iyileştirmektedir. Sürdürülebilir yapı malzemelerinin 3B yazıcı teknolojisi ile kullanılması ile sektörün ortaya çıkardığı olumsuz çevresel etkilerin büyük bir bölümünün ortadan kalkacağı düşünülmektedir. Geleneksel inşaat yöntemlerinin karşılaştığı zaman, maliyet ve sürdürülebilirlik gibi zorlukları aşmak için 3B yazıcılar, çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlar arasında inşaat süresinde kısalma, maliyet avantajı, inşaat sürecindeki çevreye verilen zararın azaltılması, mimari tasarım açısından özgünlük, iş gücü tasarrufu örnek verilebilir. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenimi uygulamaları, proje planlamasında ve risk yönetiminde önemli rol oynamaktadır. Sürdürülebilirlik ve çevre dostu inşaat yöntemleri de günümüzün önemli teknolojik yenilikleri arasında yer almaktadır. Güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı, çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [164, 165].

2.4.1 Yapı Malzemeleri ve 3B Yazıcının Kullanılması

2.4.1.1 Geçmişten Günümüze 3B Yazının Kullanılması

Üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisi, 20. yüzyılın sonlarından itibaren hızla gelişerek birçok sektörde devrim yaratmıştır. Başlangıçta yalnızca prototip üretiminde kullanılan bu teknoloji, zamanla inşaat, havacılık ve otomotiv gibi endüstrilere entegre olmuştur [167-169]. Bu süreçte, ultra yüksek performanslı beton (UHPC) gibi yenilikçi malzemelerin 3B yazıcı teknolojisine entegrasyonu, özellikle büyük ölçekli uygulamalarda dikkat çekmiştir [170].

3B yazıcı teknolojisinin gelişimi 1980'lerden günümüze kadar çeşitli aşamalardan geçmiştir. İlk olarak, 1980'lerde Charles Hull'un geliştirdiği "stereolitografi" (SLA) yöntemiyle başlayan bu süreç, ışıkla sertleşen polimerlerin kullanılmasıyla ürün şekillendirme alanında bir devrim yaratmıştır [168]. 1990'larda, erimiş plastiklerin katmanlar halinde yerleştirilmesine dayanan FDM (Fused Deposition Modeling) yöntemi ve lazerle toz malzemeleri birleştiren SLS (Selective Laser Sintering) gibi teknikler geliştirilmiştir [171]. Bu yöntemler, farklı malzeme

türlerinin kullanılmasını sağlayarak teknolojiyi daha geniş bir uygulama alanına taşımıştır.

2000'li yıllarda bireysel kullanıcılar için kompakt ve uygun maliyetli 3B yazıcılar piyasaya sürülmüş, PLA ve ABS gibi termoplastik malzemeler yaygınlaşmıştır [169,172]. Bu dönemde, taze beton karışımlarının işlenebilirliği ve karışım tasarımı üzerine yoğunlaşan çalışmalar gerçekleştirilmiştir [173]. 2010'lardan itibaren ise teknoloji, endüstriyel bir devrime dönüşerek havacılık, uzay ve inşaat gibi sektörlerde yaygınlaşmıştır [167,174].

Yapı malzemelerinde 3B yazıcıların kullanımı, özellikle sürdürülebilirlik ve çevresel etkilerin azaltılması açısından kritik öneme sahiptir. İnşaat sektöründe prefabrik elemanların üretiminde, havacılıkta hafif ve dayanıklı parçaların imalatında ve afet sonrası acil yapıların oluşturulmasında kullanılarak farklı alanlarda kendine yer bulmuştur [175,176].

AAM'lerin avantajları arasında düşük karbon ayak izi, yüksek kimyasal dayanım ve geri dönüştürülebilirlik bulunmaktadır [58,111]. Bu avantajlar, özellikle taze betonun işlenebilirliği ve yazıcıyla uyumunun optimize edilmesini gerektirir [176]. Bununla birlikte, bu malzemelerin formülasyonunun karmaşıklığı ve 3B yazıcılarla uyumun optimize edilmesi gerekliliği gibi teknik zorluklar da göz ardı edilmemelidir [57].

Doğal kaynakların korunması ve atık malzemelerin geri dönüştürülmesi, AAM'lerin sürdürülebilirlik potansiyelini artıran önemli bir özelliktir. Çevresel sürdürülebilirlik açısından, 3B yazıcıların AAM kullanımıyla sağladığı avantajlar arasında atık malzemelerin yeniden kullanımı, düşük enerji tüketimi ve yerel kaynakların değerlendirilmesi bulunmaktadır [177]. Özellikle metakaolin ve uçucu kül gibi malzemelerin geri dönüşümüne dayalı AAM karışımları, çevresel faydaları ile dikkat çekmektedir [178,179]. Perrot vd., toprak esaslı malzemelerin 3B yazıcılarla işlenebilirliğini ve yapısal özelliklerini geliştirerek sürdürülebilir yapı malzemelerinin çeşitliliğini artırmıştır [180].

2.4.1.2 3B Yazıcılarda AAM'lerin Kullanılması

Alkalilerle aktive edilen malzemeler (AAM), sürdürülebilir yapı malzemeleri sektöründe yenilikçi bir alternatif olarak öne çıkmakta ve 3B yazıcı teknolojisi ile kullanıldığında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Bu malzemeler, düşük karbon

ayak izi sayesinde çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamakta; aynı zamanda yüksek mekanik dayanım ve uzun ömürlülük özellikleri ile dikkat çekmektedir [181,182]. AAM'lerin 3B yazıcılarda uygulanabilirliği, malzemenin reolojik özelliklerinin optimize edilmesi ve baskı sürecine uyumunun sağlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu optimizasyon süreci, yalnızca baskı sırasında malzemenin akışkanlık ve şekil koruma davranışını değil, aynı zamanda nihai ürünün dayanıklılığını da doğrudan etkilemektedir.

Son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar, AAM'lerin 3B yazıcılarla üretimi sırasında karşılaşılan zorlukları ve elde edilen fırsatları daha iyi anlamaya olanak sağlamaktadır. Bu çalışmalar, AAM'lerin hem çevresel faydalarını hem de teknik potansiyelini ortaya koymakta ve malzemenin baskı sürecindeki performansını iyileştirme yollarını araştırmaktadır. AAM'lerin reolojik özellikleri üzerine yapılan geliştirmeler, baskı sırasında katman stabilitesi ve nihai ürün kalitesi açısından önemli ilerlemeler sağlamıştır. Bu durum, AAM'lerin yapı malzemeleri sektöründe daha geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımakta ve sürdürülebilir yapılar inşa etme çabalarına katkı sunmaktadır [181,182].

Alkalilerle aktive edilen malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemler, özellikle one-part (tek bileşenli) ve two-part (çift bileşenli) yaklaşımlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Her iki yöntem de farklı avantajlar ve zorluklar sunmakta olup, yapı malzemeleri sektöründe sürdürülebilir ve yüksek dayanımlı malzemeler üretmek için kullanılmaktadır. Tek bileşen yöntemi, daha basit ve hızlı bir süreç sunarken, çift bileşen yöntemi, daha özelleştirilebilir ve dayanıklı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır [182,183].

3B yazıcı teknolojisinde malzeme seçimi ve üretim süreçleri, baskı kalitesini ve dayanımını belirleyen en kritik unsurlar arasında yer almaktadır. Tek-bileşenli yöntem, 3B yazıcı uygulamalarında hızlı ve kolay bir süreç sunarak kullanıcı dostu bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Özellikle düşük karbon ayak izi ve enerji tüketimi ile çevresel sürdürülebilirliği destekleyen bu yöntem, 3B yazıcılarla küçük ölçekli projelerde pratik bir çözüm sunmaktadır [183,184]. Ancak, reolojik özelliklerin sınırlı olması ve düşük mekanik dayanım gibi dezavantajlar, tek-bileşenli yöntemi kullanan sistemlerin nano malzemeler ve katkı maddeleri ile optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır [185].

Çift-bileşenli yöntem ise, 3B yazıcı uygulamalarında daha fazla özelleştirme ve kontrol imkanı sunarak, yüksek dayanımlı ve uzun ömürlü yapı elemanlarının üretilmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemle malzeme özellikleri detaylı bir şekilde optimize edilerek, büyük ölçekli projelerde dayanıklı sonuçlar elde edilmektedir [181,186]. Özellikle metakaolin ve uçucu kül gibi hammaddelerin kullanımı, mikro yapısal bağları güçlendirerek 3B yazıcı teknolojisinin sunduğu inovatif potansiyeli artırmaktadır. Bununla birlikte, üretim sürecinin karmaşıklığı ve maliyetlerin yüksek olması, bu yöntemin sadece belirli projelerde kullanılabilirliğini sınırlandırmaktadır [182,187].

Alkalilerle aktive edilen malzemeler (AAM), 3B yazıcılarla kullanımında, alkalin aktivasyon süreçlerinin doğru bir şekilde optimize edilmesi ve uygun üretim tekniklerinin uygulanması ile etkili bir performans sergilemektedir. AAM'lerin üretim sürecinde reolojik özelliklerin, priz süresinin ve mekanik dayanımın istenilen düzeyde olması, başarılı bir baskı süreci için kritik bir önem arz etmektedir [181,182].

Alkali aktivasyon, AAM'lerin kimyasal yapısını değiştirerek mekanik dayanım kazanmalarını ve baskıya uygun hale gelmelerini sağlayan önemli bir süreç olarak öne çıkmaktadır. Bu süreçte, MK, UK ve YFC gibi hammaddeler genellikle sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) gibi alkali çözücüler ile aktive edilmektedir. Söz konusu aktivasyon işlemi, polimerizasyon reaksiyonlarını tetikleyerek malzemenin sertleşmesini ve dayanım kazanmasını mümkün kılmaktadır. Li vd., metakaolin ve uçucu kül gibi hammaddelerin yüksek molar konsantrasyonlu alkali çözücülerle etkin bir şekilde aktive edilmesinin, baskı için gereken akışkanlık ve priz süresini sağladığını ortaya koymuştur [188]. Bu durum, dayanıklı ve uzun ömürlü yapı elemanlarının üretimi açısından önemli bir avantaj sunmaktadır [181,182].

Karıştırma teknikleri, AAM'lerin homojen bir şekilde hazırlanmasını ve 3B yazıcılara uygun hale getirilmesini sağlayan temel adımlardan birini oluşturmaktadır. Ramage ve arkadaşları, karıştırma sürecinin malzeme performansını doğrudan etkilediğini, yüksek hızlı ve sürekli karıştırma yöntemlerinin homojenliği artırarak mekanik dayanımı iyileştirdiğini bildirmiştir [189]. Karıştırma sürecinde alkali çözücü oranlarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük bir önem taşımaktadır. Tay ve arkadaşları, alkali çözücü oranlarının reolojik

özellikleri ve akışkanlığı doğrudan etkilediğini, optimum oranların baskı sürecinin başarısında kritik bir rol oynadığını ifade etmiştir [190].

Karıştırma süresi de AAM'lerin kalitesini etkileyen önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Gosselin vd., yetersiz karıştırmanın homojen olmayan karışımlara yol açabileceğini, uzun süreli karıştırmanın ise priz süresini olumsuz etkileyerek baskı başlıklarında tıkanmalara neden olabileceğini vurgulamıştır [170]. Ma ve arkadaşları ise bir çalışmalarında, ince taneli hammaddelerin kullanılması ve parçacık boyutunun optimize edilmesi ile daha iyi bağlanma ve homojen bir malzeme elde edilebileceğini belirtmiştir. Bu durum, baskı kalitesinin artırılması ve malzeme performansının optimize edilmesi açısından önemli bir adım teşkil etmektedir [191].

Alkalin aktivasyon ve karıştırma tekniklerinin entegrasyonu, AAM'lerin 3B yazıcı teknolojisinde etkili bir şekilde kullanılabilmesi için gereklilik arz etmektedir. Li vd, alkali çözücülerin malzemenin kimyasal özelliklerini değiştirerek baskıya uygun hale gelmesini sağladığını ifade etmiştir [188]. Bununla birlikte, Bernal ve diğerleri ise bir çalışmalarında, metakaolin ve cüruf karışımlarının alkali aktivasyonunun çevresel açıdan sürdürülebilir ve yüksek dayanımlı betonlar elde edilmesine olanak sağladığını belirtmiştir [181]. Bu süreçlerin optimize edilmesi, AAM'lerin yapı sektöründe daha geniş bir kullanım alanına sahip olabilmesi için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Alkalilerle aktive edilen malzemeler (AAM), 3B yazıcı teknolojisinde devrim yaratabilecek nitelikte bir yenilik olarak ön plana çıkmaktadır. Çevresel sürdürülebilirlik, dayanıklılık ve mekanik performans açısından geleneksel betonlara kıyasla önemli avantajlar sunan bu malzemeler, 3B yazıcılarla yapı sektöründe yenilikçi bir yaklaşımın benimsenmesine olanak tanımaktadır. Luukkonen ve arkadaşları 2020 yılındaki bir çalışmalarında, metakaolin ve uçucu kül gibi hammaddelerin alkali çözücülerle aktive edilerek 3B yazıcı uygulamalarına uygun hale getirilebileceğini ifade etmişlerdir. Bu çalışma, AAM'lerin 3B yazıcı teknolojilerinde kullanılabilirliğini optimize etmek amacıyla reolojik özelliklerin önemini vurgulamaktadır [192].

Zhang ve arkadaşları, jeopolimer kümelerinin 3B yazıcı süreçlerinde katmanlar arası yapışma ve stabiliteyi artırdığını ortaya koymuşlardır [193]. Benzer şekilde,

Segura ve diğerleri ise, cüruf esaslı AAM'lerin 3B yazıcı için özellikle dayanımı artırmak amacıyla uygun bir seçenek olduğunu ifade etmişlerdir. AAM'lerin 3B yazıcılarda kullanılabilirliği, malzemelerin reolojik özellikleri ve mekanik dayanım potansiyeli ile doğrudan ilişkilidir [194].

3B yazıcılar için AAM'lerin uygunluğu, malzemenin reolojik özelliklerine ve sertleşme davranışına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Nerella ve diğerleri, jeopolimer esaslı malzemelerin baskı süresince yazdırma davranışının optimize edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Özellikle, taze karışımın yeterli viskoziteye sahip olması ve katmanlar arası yapışmayı desteklemesi kritik bir öneme sahiptir [195]. Ren ve çalışma arkadaşları, çimento esaslı AAM'lerin 3B yazıcılar için uygun bir alternatif sunduğunu ve çevresel sürdürülebilirlik ile yüksek dayanımı birleştirdiğini ifade etmişlerdir [196].

Luukkonen ve diğerlerinin çalışması, metakaolin ve uçucu külün çevresel açıdan sürdürülebilir ve ekonomik bir seçenek sunduğunu ortaya koymaktadır [192]. Reolojik iyileştirmeler ve mekanik dayanımı artırıcı katkılar ile bu malzemeler 3B yazıcı uyumunu artırmaktadır. Segura vd, yine aynı çalışmalarında, cürufun alkali aktivasyonu sonucunda yüksek dayanım sağladığını ve 3B yazıcı uyumluluğunu desteklediğini belirtmiştir. Bununla birlikte, bu malzemelerin karışım tasarımındaki zorluklarının, büyük ölçekli projeler için dikkatle ele alınması gerektiği ifade edilmektedir [194].

Ren ve diğerlerinin çalışması, çimento esaslı malzemelerin 3B yazıcılarda kullanımı açısından dayanıklı ve ekonomik bir seçenek sunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, geleneksel çimento yerine sürdürülebilir bir alternatif olarak AAM'lerin tercih edilmesi, çevresel etkilerin azaltılması açısından fayda sağlamaktadır [196]. Nerella vd, jeopolimerlerin katmanlar arası bağlanma ve sertleşme süreçlerinde önemli avantajlar sunduğunu belirtmişlerdir. Bu malzemeler, 3B yazıcılarda homojen bir baskı süreci sağlayarak yapı stabilitesini artırmaktadır [195].

Reaktif MgO (r-MgO), son yıllarda AAM'lerin 3B yazıcı teknolojilerinde kullanılabilirliğini artırmak için umut verici bir bileşen olarak dikkat çekmektedir. Bernal ve arkadaşları 2015 yılındaki bir çalışmalarında, MgO'nun karbonatlaşma potansiyelinin, 3B yazıcı süresince dayanım ve stabiliteyi destekleyen reaksiyon

ürünleri oluşturduğunu ifade etmişlerdir [198]. r-MgO, alkalilerle etkileşiminden sonra mekanik dayanımı artıran ve baskı sürecinde uygun viskozite sağlayan yapısıyla öne çıkmaktadır. Zhao vd, MgO'nun agrega ile uyumlu yapısı sayesinde baskı süresinde malzeme homojenliğini iyileştirdiğini ve bu nedenle 3B yazıcı projelerinde tercih edilen bir bileşen olduğunu belirtmişlerdir [197].

3B yazıcılar için en uygun malzemeler; metakaolin, uçucu kül, jeopolimerler, cüruf esaslı AAM'ler ve reaktif MgO olarak sıralanmaktadır. Bu malzemeler, reolojik özellikleri ve taze ile sertleşmiş durumlarındaki davranışlarıyla ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, her bir malzemenin karışım ve baskı parametrelerine uygun bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Çimento esaslı AAM'ler, dayanım ve stabilite sağlarken; jeopolimerler ve reaktif MgO, yenilikçi bir yaklaşımla çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sunmaktadır.

2.4.1.3 3B Yazıcı İçin Gerekli Özellikler

Reolojik Parametreler:

Alkalilerle aktive edilen malzemelerin (AAM) 3B yazıcılarla kullanımı, bu malzemelerin reolojik özelliklerine bağlı olarak şekillenmektedir. Baskı sırasında malzemenin doğru bir şekilde akabilmesi, katmanlar arasında yeterli bağlanmayı sağlayabilmesi ve nihai ürünün dayanıklı olabilmesi için reolojik parametrelerin optimize edilmesi gerekmektedir. Le ve diğerleri, alkali çözücü türleri ile katkı maddelerinin reolojik davranış üzerindeki etkilerini inceleyerek bu özelliklerin, kullanılan malzeme karışımıyla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuşlardır [199]. Panda ve arkadaşları, reolojik parametrelerin baskı uyumluluğunda kritik bir rol oynadığını, özellikle viskozitenin ve priz süresinin doğru bir şekilde kontrol edilmesi gerektiğini vurgulamakla birlikte reolojik özelliklerin optimizasyonunun baskı kalitesini artırmanın ötesinde, baskı sürecindeki mekanik dayanımı da doğrudan etkilediğini ortaya koymuşlardır [200]. Akışkanlık ve viskozite gibi parametrelerin dengelenmesi, baskı sürecinin kalitesini ve verimliliğini artırırken, nanomalzeme katkıları bu özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır [201]. Bunun yanı sıra, yazıcı başlıklarının tıkanmasını engellemek ve katmanlar arasında daha güçlü bağlanma elde edebilmek için reolojik modifikasyonlar kritik bir önem taşımaktadır [202].

Viskozite, AAM'lerin baskı sırasında en önemli parametrelerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Çok yüksek viskozite malzemenin yazıcı başlığından düzgün bir şekilde çıkmasını engellerken, düşük viskozite katmanlar arasında bağlanma sorunlarına yol açabilmektedir. Tay vd, viskoziteyi dengelemek amacıyla kullanılan katkı maddelerinin baskı kalitesini artırdığını ve yazıcı başlığının verimli çalışmasına katkı sağladığını ifade etmişlerdir [202]. Zhang ve arkadaşları, nanomalzeme katkılarının malzemenin akışkanlığını optimize ederek homojen ve stabil baskılar elde edilmesine yardımcı olduğunu belirtmişlerdir [203]. Ayrıca, Panda ve arkadaşları ise 2018 yılındaki bir çalışmalarında, baskı sırasında viskozitenin stabilize edilmesinin yalnızca akışkanlığı değil, aynı zamanda katmanlar arası bağlanma dayanımını da artırdığını vurgulamışlardır [200].

AAM'lerin reolojik özelliklerinin kontrolü, baskı sırasında stabiliteyi sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Kothman ve Faber, akışkanlık modifikasyonlarının yazıcı başlıklarında tıkanmaları engelleyerek daha düzgün bir baskı süreci sağladığını ifade etmişlerdir [204]. Ricciotti ve arkadaşları ise, jeopolimer esaslı 3B yazıcı malzemelerinde akışkanlık özelliklerini geliştiren reolojik modifikasyonların baskı kalitesine olan etkilerini incelemişlerdir [205]. Panda vd, reolojik özelliklerin optimizasyonunun baskı sırasında stabilite ve mekanik dayanım üzerinde doğrudan etkili olduğunu ifade etmişlerdir [200].

Priz süresi, baskı sırasında malzemenin sertleşme hızını ve katmanlar arası bağlanma dayanımını etkileyen önemli bir parametre olarak dikkat çekmektedir. Luukkonen ve diğerleri, priz süresinin alkali çözücünün konsantrasyonuna göre değişkenlik gösterdiğini ve baskı sürecinde bu parametrenin belirleyici bir rol oynadığını ifade etmişlerdir [206]. Bir diğer yandan, Panda vd, priz süresi kontrolünün baskı hızının optimize edilmesinde ve katmanlar arası bağlanmanın güçlendirilmesinde önemli bir rol oynadığını vurgulamışlardır [200].

AAM'lerin baskı sırasında stabilite göstermesi, malzemenin homojen bir karışıma sahip olmasını zorunlu kılmaktadır. Ricciotti ve ark., karışım oranları ve parçacık boyutlarının malzemenin stabilitesini doğrudan etkilediğini, homojen karışımların daha dayanıklı yapılar oluşturduğunu belirtmişlerdir [205]. Barve ve ark., mikroskobik düzeyde homojen karışımların daha düzgün yüzeyler ve güçlü yapılar elde edilmesine katkı sağladığını ortaya koymuşlardır [207].

3B Yazıcı Parametreleri

Baskı sürecinde hız ve katman kalınlığı gibi parametreler, alkalilerle aktive edilen malzemelerin (AAM) nihai performansını doğrudan etkilemektedir. Gosselin vd, baskı hızının malzeme stabilitesine ve katmanlar arası bağlanmaya etkisini araştırarak, optimum hızların dayanıklılığı artırdığını ifade etmişlerdir. Elde edilen bulgular, daha düşük hızlarda yapılan baskıların daha sağlam yapılar oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Ancak, üretim süresini uzatabileceği için bu hızların ince bir şekilde ayarlanması gerekmektedir [208]. Ma ve arkadaşları, ince katmanlarla çalışmanın bağlanma dayanımını artırdığını, ancak üretim süresini uzattığını vurgulamışlardır. Buna karşın, kalın katmanlar daha hızlı üretime olanak tanımakla birlikte deformasyon riskini artırabilmektedir [209].

Katmanlar arası bağlanma, 3B yazıcılarla yapılan üretim süreçlerinde kritik bir öneme sahiptir. Panda ve ark., AAM'lerin reolojik özelliklerinin ve erken dönem dayanımlarının iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamış ve bu amaçla takviye edici malzemelerin kullanılmasını önermiştir [210]. Kimyasal katkı maddelerinin bağlanma dayanımını artırmadaki etkisi, Kothman ve Faber tarafından detaylı bir şekilde incelenmiş ve bu katkıların malzeme stabilitesini geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Söz konusu katkılar, katmanlar arasında güçlü bir bağlanma sağlamak için AAM'lerin priz sürecini kontrol altında tutmaktadır [211].

Priz süresi, AAM'lerin katmanlar arası bağlanma dayanımını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Panda vd, priz süresinin optimize edilmesinin yapısal bütünlük açısından önemli gelişmeler sağladığını ortaya koymuşlardır. Bu süreçte alkali aktivatörlerin, özellikle sodyum silikat ve potasyum hidroksit oranlarının dikkatle ayarlanması gerekmektedir [212]. Zhang ve arkadaşları ise bir çalışmalarında, priz öncesi malzemenin nemli tutulmasının bağlanma dayanımını artırmada etkili olduğunu ve nemlendirici katkı maddelerinin kullanımının bu süreci iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Bu yaklaşım, bağlanma dayanımını önemli ölçüde artırarak daha güçlü yapıların oluşturulmasına katkı sağlamaktadır [213].

Baskı süresi ve akışkanlık kontrolü, AAM'lerin 3B yazıcılarla başarılı bir şekilde uygulanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Chen ve diğerleri 2020 yılındaki bir çalışmalarında, baskı hızının yüzey kalitesi ve homojen katman yapısı üzerindeki etkisini incelemiş ve yüksek baskı hızının düzgün yüzeyler sağladığını, ancak

katmanlar arası bağlanmayı olumsuz etkileyebileceğini belirtmiştir. Bunun yanı sıra, çevresel koşullar baskı sürecini doğrudan etkilemektedir [214]. Park vd, sıcaklık ve nem seviyelerinin priz süresi ile mekanik dayanım üzerindeki kritik etkilerini vurgulamış ve yüksek nem seviyelerinin priz sırasında malzemenin kurumasını önleyerek daha dayanıklı katmanlar oluşturduğunu ifade etmişlerdir [215].

Katman kalınlığı ve baskı geometrisi, baskı süreci boyunca mekanik dayanımı belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Xue ve çalışma arkadaşları, daha ince katmanların bağlanma dayanımını artırdığını, ancak bu durumun enerji maliyetlerini yükselttiğini ortaya koymuşlardır [216]. Benzer şekilde, Ma ve diğerleri ise, ince katmanların daha uzun süreli bir üretim sürecine yol açtığını, ancak nihai ürünün dayanıklılığını artırdığını belirtmişlerdir [209]. Daha kalın katmanlar hız avantajı sağlamasına rağmen deformasyon riskini artırmakta ve katmanlar arası bağlanma kalitesini düşürebilmektedir.

Ek takviye elemanları, AAM'lerin bağlanma dayanımını ve mekanik özelliklerini iyileştirmede önemli bir role sahiptir. Ming ve ark., lif takviyesi eklenmesinin katmanlar arası bağlanmayı %40'a kadar artırdığını göstermiştir. Karbon ve cam lifleri gibi takviye elemanlarının kullanımı, yapısal dayanımı önemli ölçüde güçlendirmektedir [217]. Li vd. başka bir çalışmalarında ise, polimer katkı maddelerinin AAM'lerin akışkanlık kontrolü ve uzun süreli dayanıklılık üzerindeki olumlu etkilerini rapor etmiş ve bu katkıların reolojik özellikleri optimize ettiğini belirtmiştir [218].

Mekanik Özellikler

Alkalilerle aktive edilen malzemelerin (AAM) mekanik dayanımı, 3B yazıcılarla üretilen yapıların dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu malzemeler, geleneksel çimentoya kıyasla daha düşük işlem sıcaklıklarına ihtiyaç duymaları nedeniyle çevresel faydalar sağlamaktadır. Ancak bu avantajların etkin bir şekilde kullanılabilmesi için mekanik dayanımın optimize edilmesi gerekmektedir. Ramage ve ark., malzeme bileşenlerinin doğru oranlarda karıştırılması ve uygun 3B yazıcı parametreleri ile kullanılması durumunda AAM'lerin yüksek dayanım sergilediğini belirtmişlerdir [219]. Bununla birlikte,

Kothman ve Faber, alkali aktif çözücüler ve takviyelerin mekanik dayanımı artırmada kritik bir rol oynadığını ifade etmişlerdir [211].

Mekanik dayanımın artırılmasında katman kalınlığı gibi üretim parametrelerinin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir. Ma vd, ince katmanlarla yapılan üretimlerin katmanlar arası bağlanmayı güçlendirdiğini ve nihai mekanik dayanımı artırdığını vurgulamışlardır. Ancak, bu yöntemin üretim süresini uzatabileceği ve maliyetleri artırabileceği de belirtilmiştir. Kalın katmanlar ise üretim hızını artırmasına rağmen mekanik dayanımı düşürebilmekte ve deformasyon riskine yol açabilmektedir [209].

AAM'lerin mekanik dayanımı ve yapısal karakteristikleri, baskı sürecinin başarıyla tamamlanması ve nihai ürünün dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir. Bu özellikler, alkali çözücü türü, hammadde oranları, priz süresi ve katmanlar arası bağlanma gibi birçok faktöre bağlıdır. Ricciotti ve arkadaşları, nanomalzeme katkılarının AAM'lerin mekanik dayanımını artırmada etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuşlardır [205]. Jin vd., ise karbon nanotüpler ve nano seramiklerin malzemenin mikro yapısını iyileştirerek çekme dayanımını artırdığını belirtmişlerdir [201].

Katmanlar arası bağlanma, AAM'lerin 3B yazıcılarla üretiminde kritik bir öneme sahiptir. Yetersiz bağlanma, yapının bütünlüğünü zayıflatabilir ve çatlamalara yol açabilir. Matalkah ve diğerleri 2020 yılındaki bir diğer çalışmalarında, nano malzeme katkılarının bağlanma noktalarını güçlendirerek mekanik dayanımı artırdığını rapor etmişlerdir [220].

Mikro yapının homojenliği, AAM'lerin mekanik dayanımını etkileyen bir diğer önemli faktördür. Barve ve ark., alkali çözücülerin yoğunluğu ve karışım oranlarının mikro yapı üzerindeki etkisini incelemiş ve homojen bir mikro yapının dayanımı artırdığını ifade etmişlerdir [207]. Zhang ve diğerleri, nano malzeme katkılarının mikro yapıyı homojenleştirdiğini ve bağlanma noktalarını güçlendirdiğini belirtmişlerdir. Bu sayede, AAM'lerin kırılma direnci ve çekme dayanımı önemli ölçüde artırılmaktadır [203].

Ek katkı maddeleri, AAM'lerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Pol Segura ve ark., bu katkı maddelerinin mikro yapıdaki boşlukları doldurarak malzemenin dayanımını artırdığını ifade etmişlerdir [221].

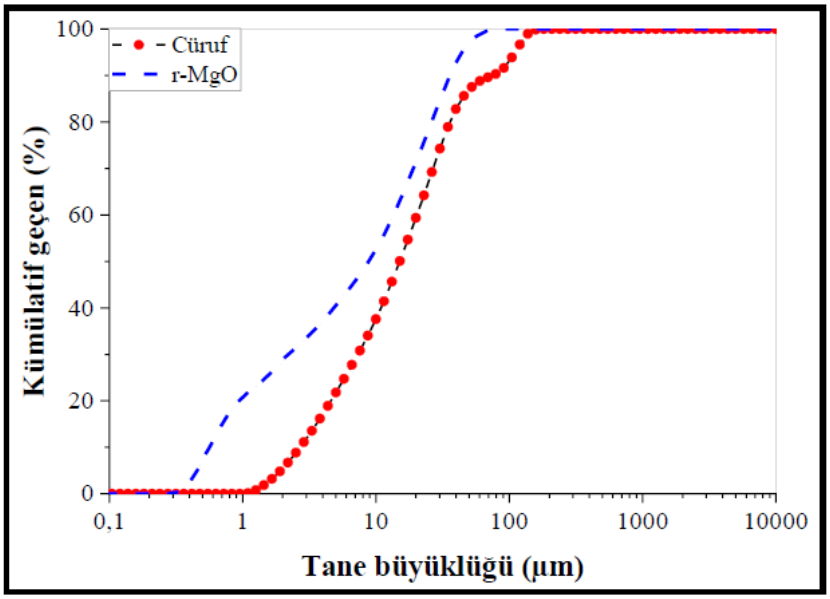
Luukkonen vd., uçucu kül ve cüruf gibi hammadde takviyelerinin dayanımı artırmada etkili olduğunu vurgulamışlardır [222]. Gosselin ve diğerleri, ultra yüksek performanslı beton (UHPC) ile AAM kombinasyonunun büyük ölçekli baskılarda başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır [208].

3
DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu çalışma kapsamında belirlenen deney numuneleri için bağlayıcı yapı malzemesi olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve reaktif MgO (r-MgO) kullanılmıştır. Kullanılan bağlayıcı malzemelerden YFC, Kardemir Demir Çelik Fabrikası'ndan; r-MgO ise manyezitin ($MgCO_3$) 700°C'deki kalsinasyonu sonucu KÜMAŞ Manyezit Sanayi A.Ş.'den temin edilmiştir.

Kullanılan bağlayıcı malzemelerin tane boyutu dağılımı (Şekil. 3.1) ve kimyasal bileşimi (Tablo 3.1) Mastersizer ve X-Ray Floresans analizleri kullanılarak belirlenmiştir. Cüruf ve r-MgO'nun ortalama tane boyutları (d_{50}) sırasıyla 15,0 µm ve 8,8 µm olarak bulunmuştur.



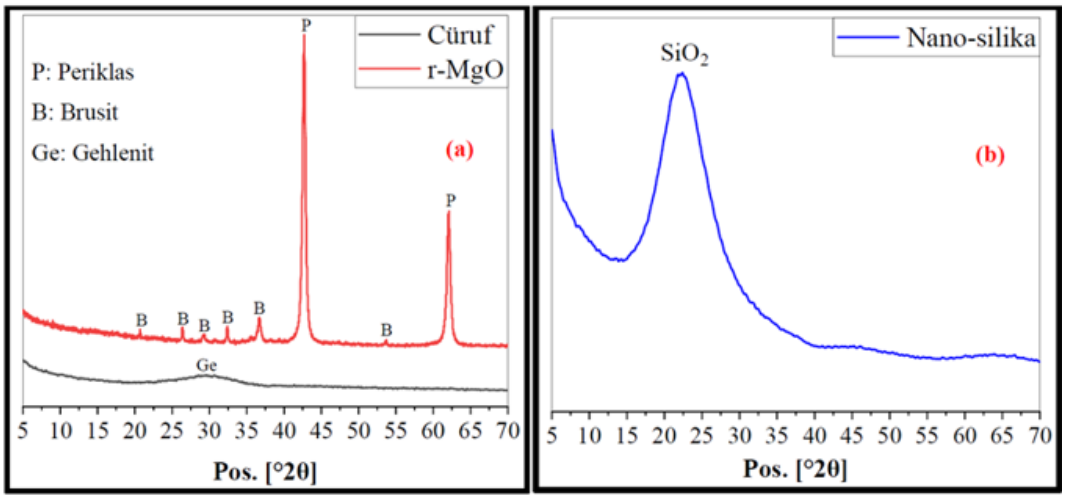
Şekil 3.1 Cüruf ve r-MgO'nun tane boyutu dağılımı

Tablo 3.1 Bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşimi

Oksit Miktarları (% ağırlıkça)	Cüruf	r-MgO	Nano-silika
SiO_2	39,0	6,0	99,0
Al_2O_3	12,4	0,7	-
Fe_2O_3	1,2	0,3	-
CaO	33,7	7,9	0,1
MgO	7,5	83,6	-
SO_3	0,8	0,2	-
Cl^-	-	0	-
Na_2O	0,4	0,4	-
K_2O	0,6	0	-
TiO_2	0,9	-	-
Kızdırma Kaybı (%)	0,4	0,8	0,7
Özgül Yüzey Alanı (cm^2/g)	4,670	18,700	2.020,000
Yoğunluk (g/cm^3)	2,88	3,55	2,20

Cüruf, esas olarak kalsiyum oksit (CaO), silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) içerirken, r-MgO ağırlıklı olarak magnezyum oksit (MgO) içermektedir. Cüruf, 25–35° (2θ) difraksiyon açısı aralığında geniş bir çıkıntı göstererek büyük ölçüde amorf bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir (Şekil 3.2.a). r-MgO için 43° (2θ) ve 62° (2θ) civarında belirgin pikler tespit edilmiştir; bu da reaktif periklas (MgO) varlığını göstermekte olup, brüsit [$Mg(OH)_2$] ile ilişkili daha küçük pikler de gözlemlenmiştir (Şekil 3.2.a).

Nano-silika (NS), silika açısından zengin ultra ince bir toz malzemedir ve karışımlarda cüruf ile ikameli olarak kullanılmıştır. Karışımların dayanım gelişimine katkıda bulunmak, reolojik özellikleri iyileştirmek ve 3 boyutlu yazıcı teknolojisiyle üretilecek serilerde taze hal özelliklerini geliştirmesi düşüncesiyle kullanılmıştır. NS, Nanokar Kimyevi Maddeler San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. NS'nin bağlayıcı özellik gösterebileceğinden, bu çalışmada bağlayıcı ile ikame edilmiştir. Zetasizer analizi, nano-silikanın ortalama tanecik boyutunu 30 nm olarak ortaya koymuştur. Kimyasal bileşimi, esasen %99 silika (SiO_2) olarak Tablo 3.1'de detaylandırılmıştır. Ayrıca Şekil 3.2.b'de Nano-silika'nın XRD grafiği verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.2 a) Cüruf ve r-MgO'nun XRD grafiği b) Nano-silika'nın XRD grafiği

NS, karışıma direkt olarak toz halde eklenmek yerine, belirlenen S/B oranındaki miktarda su ile karıştırılarak elde edilen çözeltinin kullanılması yoluyla üretime dahil edilmiştir. NS'yi suda dağıtma işlemi, 15 dakika süresince 40 KHz frekans ile çalışan Weightlab Instruments WF-UD2 Ultrasonik banyo cihazı kullanılarak ultrasonik titreşim yöntemiyle yapılmıştır.

3.2 Numune Hazırlama

Bu çalışma kapsamında sekiz karışım tasarımı, ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Farklı cüruf ve r-MgO oranları içerecek şekilde yapılmıştır. Tablo 3.2'de belirtildiği gibi, ana bağlayıcı olan cüruf, karışımlarda %85 ile %100 arasında değişen oranlarda kullanılmıştır; r-MgO ise ağırlıkça %0 ile %15 arasında cüruf ile yer değiştirilmiştir.

Karışımların isimlendirilmesi yapılırken, YFC ile ikameli olarak kullanılan r-MgO'in yüzdesine göre yapılmıştır. %100 YFC bağlayıcı içeren referans karışımlar Ref olarak adlandırılmış olup, r-MgO ikameli karışımlar ikame oranına göre 5Mg, 10Mg, 15Mg olarak gösterilmiştir. Ayrıca nano-silika içeren karışımların isimleri "-N" eklenerek gösterilmiştir (Ref-N, 5Mg-N, 10Mg-N, 15Mg-N).

Ön üretimler sonucu belirlenen su/bağlayıcı (S/B) oranı hamur karışımlarda 0,40; harç karışımlarda ise 0,45 olarak sabit tutulmuştur. Alkali aktivatör olarak kullanılan katı haldeki Na_2CO_3 (NC), bir çözelti hazırlanmaksızın, doğrudan

bağlayıcı malzemeler ile kuru halde karıştırılarak, tüm karışımlarda bağlayıcı malzeme ağırlığının %10'u oranında kullanılmıştır.

Ön üretimler sonucunda NS kullanımı için farklı ikame oranlarında üretimler yapılmış olup, en uygun oranın toplam bağlayıcı miktarının %1'i olduğu tespit edilmiştir. Harç üretiminde, hamur karışımlardan farklı olarak, maksimum tane boyutu 2 mm olan silika esaslı ince agrega, bağlayıcı ile 1:0.8 oran olacak şekilde kullanılmıştır. Serilerin karışım oranları Tablo 3.2.'de verilmiştir.

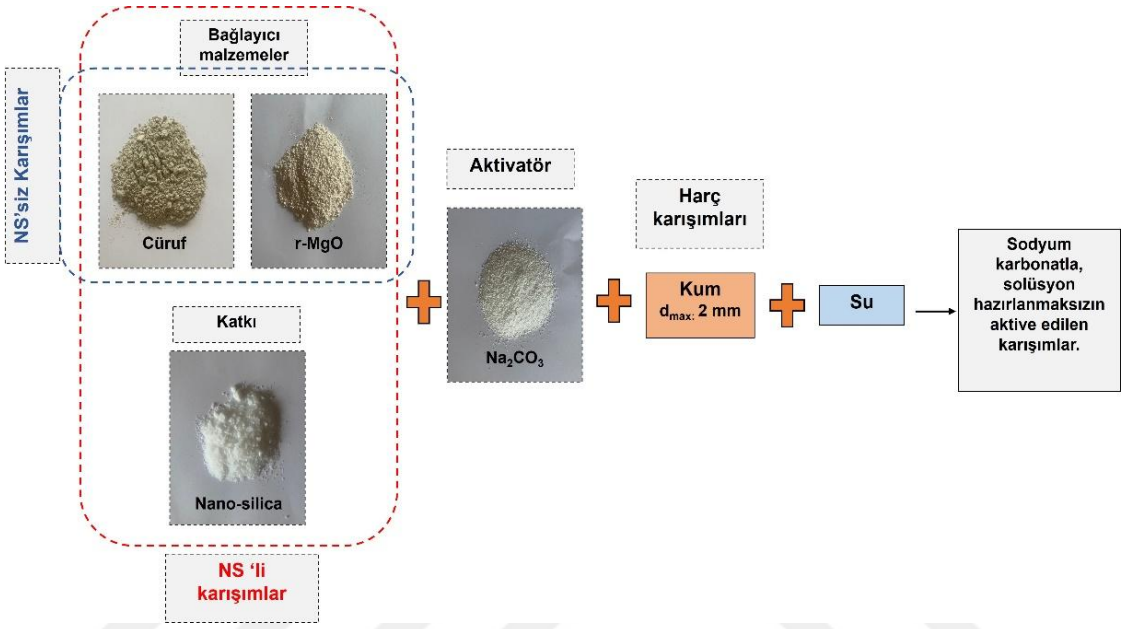
Tablo 3.2 Hamur serilerin karışım oranları

Karışımlar	Bağlayıcı malzemeler (bağlayıcı kütlesinin karışım içrisindeki %'si)			Sodyum karbonat (%)	Su/Bağlayıcı oranı
	Cüruf	r-MgO	Nano-silika		
Ref	100	-	-	10	0.40
5Mg	95	5			
10Mg	90	10			
15Mg	85	15			
Ref-N	99	-	1		
5Mg-N	94	5			
10Mg-N	89	10			
15Mg-N	84	15			

Hamur serilerinin hazırlanması için uygulanan üretim aşamaları belirli bir sıra takip edilerek gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, ana bağlayıcı malzemeler olan cüruf ve r-MgO, Hobart marka masa tipi çimento mikserine yerleştirilmiş ve düşük hızda (140 ± 5 rpm) 30 saniye boyunca karıştırılmıştır. İkinci adımda, kuru toz aktivatör (NC), herhangi bir solüsyon hazırlanmaksızın kuru karışıma eklenmiş ve düşük hızda 120 saniye daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Üçüncü adımda, homojen bir karışım elde edildikten sonra karışıma su eklenmiş ve düşük hızda 60 saniye daha karıştırma işlemi yapılmıştır. Bu aşamayı takiben, mikser 15 saniye süreyle durdurulmuş ve karıştırma kabının iç yüzeyine sıçrayan hamurlar sıyrılarak toplandıktan sonra son karıştırma işlemine geçilmiştir. Son aşamada ise mikser, yüksek hızda (285 ± 5 rpm) 1 dakika süreyle çalıştırılmış ve böylece hamur serilerinin üretimi tamamlanmıştır.

Harç üretiminde, hamur üretiminde farklı olarak S/B oranı 0,45 olarak üretimler gerçekleştirilmiştir. Hamur üretimindeki üçüncü adımdan sonra karışıma kum eklenmiş ve 2 dakika süreyle karıştırma işlemine devam edilmiştir. Hamur ve harç

karışımlarının üretim adımları Şekil 3.3'te detaylı bir şekilde gösterilmiştir. NS'li serilerin üretiminde, NS; doğrudan toz halde karışıma eklenmek yerine su ile karıştırılarak çözeltinin hazırlanması yöntemiyle üretime dahil edilmiştir. Bu işlem sırasında NS'nin suda dağıtılması, 15 dakika boyunca 40 kHz frekansla çalışan Weightlab Instruments WF-UD2 Ultrasonic Cleaner cihazı kullanılarak ultrasonik banyo yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3 Hamur ve harç karışımlarının üretim diyagramı

3.3 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.3.1 Yayılma Testi

Harç numunelerin taze hal yayılma değerleri ASTM C1437 esas alınarak mini slump (çökme) konisi (üst çap 70 mm, alt çap 100 mm ve yükseklik 60 mm boyutlarındaki) yardımıyla üretimden hemen sonra belirlenmiştir [223].

Hazırlanan harç numune mini-slump kalıbına iki aşamada yerleştirilmiştir. Her bir tabaka tokmakla 20 kez vurularak sıkıştırılmıştır. İkinci tabakanın sonunda mala yardımıyla üst yüzey düzleştirilmiştir. Koni kaldırıldıktan sonra sarsma tablası 15 sn içerisinde 25 kez olacak şekilde düşürülmüştür. Düşürülme işlemi sonrasında harcın x ve y eksenleri boyunca yayılma çapı ölçülerek ortalama yayılma çapı hesaplanmıştır [223,224]. Yayılma testi düzeneği ve deney sonrasında gözlemlenen örnek bir yayılmış taze harç karışımı Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 3.4 (a) Yayılma testi deney düzeneği ve (b) deney sonrasında gözlemlenen yayılmış taze harç karışımı

3.3.2 Priz Süresi Tayini

Priz başlangıç ve bitiş süreleri, ASTM C191 standardına uygun olarak, otomatik Vicat cihazı yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.5) [225]. Bu test, üretilen hamur numuneler üzerinde yapılmıştır. Konik bir kalıbın içine doldurulan karışımların priz ölçümü Vicat iğnesinin otomatik olarak düşmesi sonucu penetrasyon derinliğinin ölçülmesiyle gözlemlenmiştir. Priz başlangıç süresi, bağlayıcı ve toz aktivatör karışımının su ile karıştığı ilk andan itibaren; Vicat iğnesinin hamura 25 mm'den daha düşük penetrasyon derinliğinin elde edildiği zamana kadar olan aralıktaki geçen süre kaydedilerek belirlenmiştir. Priz bitiş süresi ise, iğnenin hamura nüfuz edemediği ilk ölçüm zamanı olarak kabul edilmiştir. Priz bitiş süresi tayin edilene kadar her 10 dakikada bir otomatik olarak ölçüm alınmıştır. Şekil.3.5' de ölçümü yapılan serilerden örnek bir çalışma verilmiştir.



Şekil 3.5 Priz süresi testinde kullanılan otomatik Vicat aleti

Priz başlangıç süresinin ASTM C191 [225] standardında yer alan Denklem 3.1'e hesaplanmıştır.

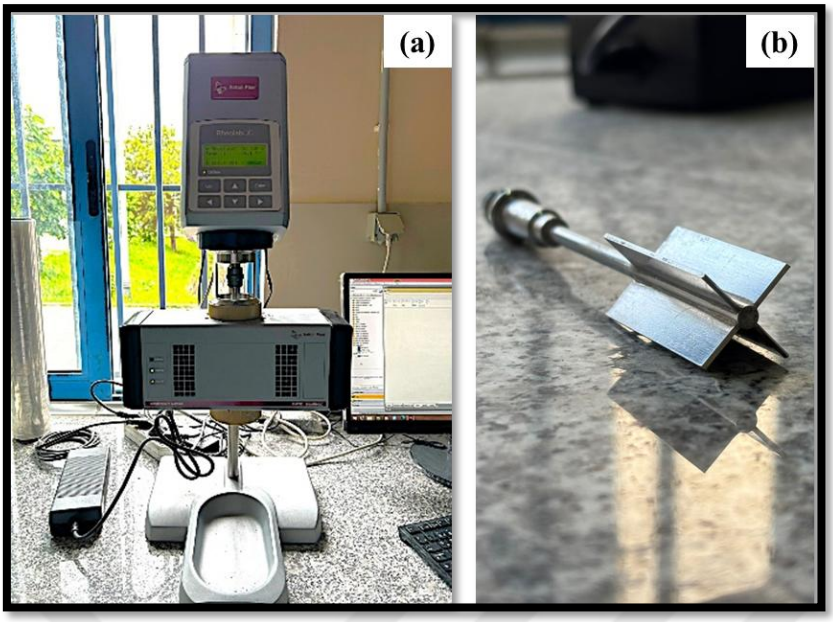
$$\left(\frac{H-E}{(C-D)}x(c-25)\right)+E \qquad \text{(Denklem 3.1)}$$

Bu formüldeki H, 25 mm'den daha az olan ilk penetrasyon derinliğinin dakika cinsinden süresini, E ise 25 mm'den büyük son penetrasyon derinliğinin dakika cinsinden süresini belirtmektedir. C ve D değerleri ise sırasıyla, E ve H zamanındaki penetrasyon okumalarını temsil etmektedir.

3.3.3 Reolojik Deneyler

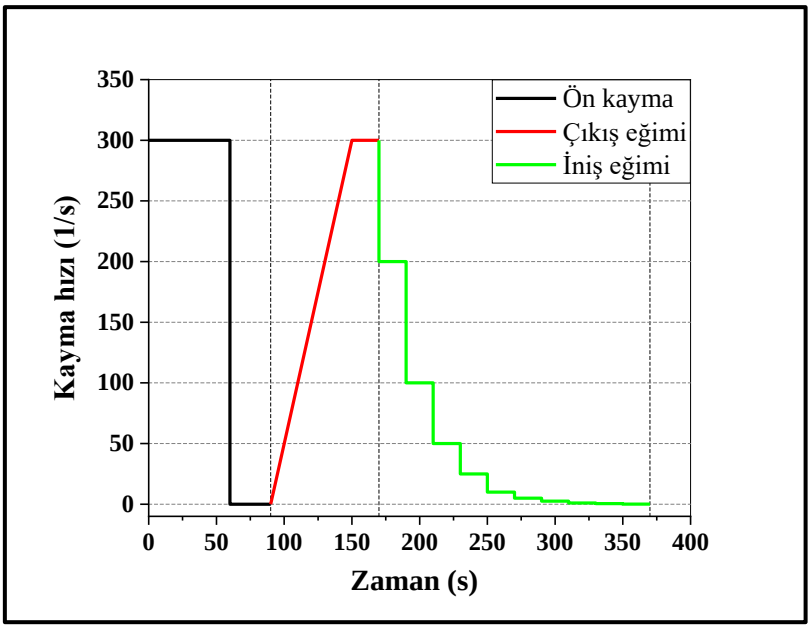
3.3.3.1 Dinamik Kayma Gerilmesi

Reolojik ölçümlerin yapılması için, Anton Paar Rheolab QC rotasyonel reometresi ve çapı 11 mm, uzunluğu 40 mm olan dört kanatlı ölçüm ucu kullanılmıştır. Reolojik ölçümlerin yapıldığı cihaz, ölçüm kabı ve dört kanatlı ölçüm ucu Şekil 3.6'da verilmiştir. Ölçüm boyunca kabın sıcaklığı, 20 ± 0,5 °C'de sabit tutulmuştur.



Şekil 3.6 a) Reolojik ölçümlerin yapıldığı reometre cihazı b) Ölçümler esnasında kullanılan 4 kanatlı ölçüm ucu

Üretilen hamur serilerin reolojik ölçümleri üretimden hemen sonra (sıfırıncı dakikada) yapılmıştır. Dinamik kayma gerilmesi (eşik kayma gerilmesi) belirlenirken; lineer olarak artan ve sonrasında kademeli olarak azalan kayma gerilmesi uygulanmış ve gerilme kontrollü ölçüm yapılmıştır (Şekil 3.7)



Şekil 3.7 Reolojik parametreler için uygulanan ölçüm prosedürü, kayma hızı-zaman ilişkisi

Reolojik test protokolünde, reometre kabındaki numunenin ölçüm prosedürü aşağıdaki adımlar izlenerek gerçekleştirilmiştir;

i. Reometre kabı içerisindeki hamur malzemeyi homojen hale getirmek ve içerisindeki boşlukları çıkarmak için 300 s^{-1} kayma hızında 60 sn süresince ön kayma gerilmesi uygulanmıştır.
ii. Ön kayma sürecinden sonra 30 saniyelik bir dinlenme evresi gelmiştir.
iii. Dinlenme evresinden sonra 60 saniye boyunca 0,1 s^{-1}'den 300 s^{-1}'ye lineer olarak artan, 20 saniye boyunca 300 s^{-1}'de tutulan yukarıya doğru bir çıkış eğrisi uygulanmıştır.
iv. Ardından 300 s^{-1}'den 0,1 s^{-1}'e kademeli azalış olacak şekilde bir iniş eğrisi uygulanarak ölçüm 4 aşamada gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında uygulanan maksimum kayma hızı 300 s^{-1} değeri ön deneyler sonucunda belirlenmiştir. Kayma gerilmelerinin tutarlı olarak elde edilebilmesi için kayma hızları, 20 sn süresince uygulanmış olup ölçümler verilerin doğruluğunun teyit edilebilmesi için tekrarlanmıştır.

Karışımların dinamik kayma gerilmeleri, akış eğrisinin kademeli olarak azalan kısmı (iniş eğimi) dikkate alınarak Herschel-Bulkley modeline (Denklem 3.2) göre belirlenmiştir.

$$\tau = \tau_0 + K.\dot{\gamma}^{n} \qquad \text{(Denklem 3.2)}$$

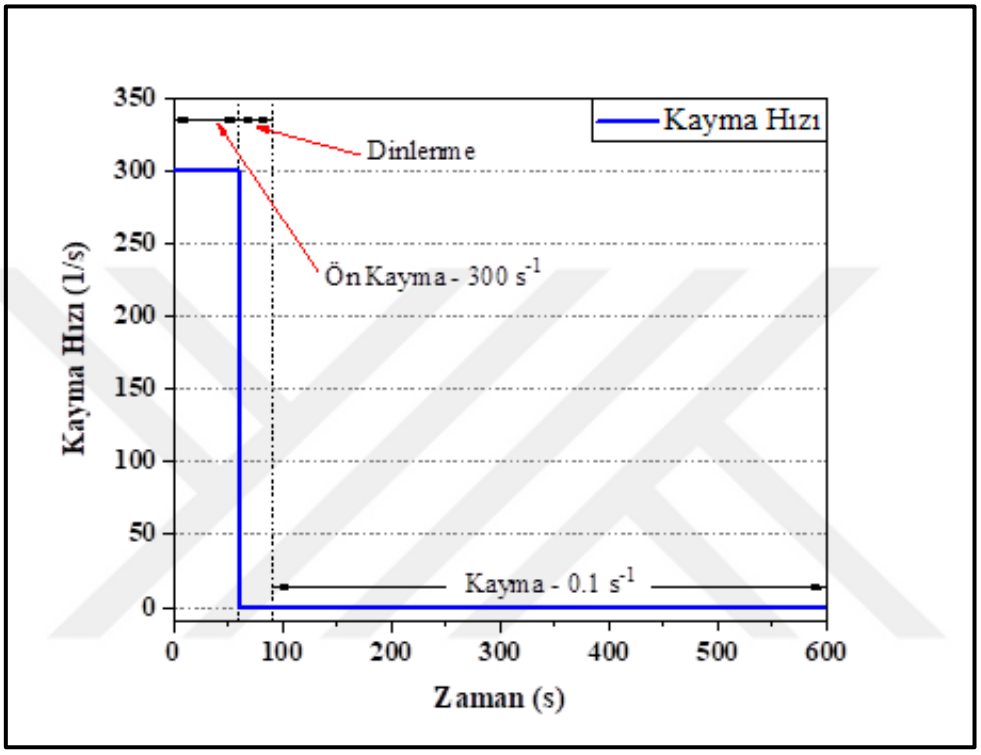
τ, Pascal (Pa) cinsinden kayma gerilmesi, τ_0, Pascal (Pa) cinsinden dinamik kayma gerilmesi, $\dot{\gamma}$ ise saniye cinsinden kayma hızıdır (s^{-1}), K kıvam katsayısını ve son olarak n akış indeksini ifade eder.

n değerinin; 1'den küçük olması kayma incelmesi davranışını, n'nin 1'e eşit olması Bingham akışını ve n'nin 1'den büyük olması kayma kalınlaşması davranışını gösterir.

3.3.3.2 Statik Kayma Gerilmesi

Statik kayma gerilmesi, 3 Boyutlu baskı süreçlerinde üretilebilirliği sağlamak için gerekli olan önemli faktörlerin başında gelmektedir. Tipik olarak test numunelerine 0,01 s^{-1} ile 0,5 s^{-1} aralığında sabit bir kayma hızı uygulanarak ölçülmektedir [226–228]. Bu çalışmada, testten önce, tüm karışımlarda homojenliği sağlamak için 60 saniye boyunca 300 s^{-1}' de bir ön kayma uygulanmıştır. Bu sayede, numunelerde meydana gelebilecek olası topaklaşmalar ve hava boşlukları engellenmiştir. Bunu takiben karışım 30 saniye dinlenmeye bırakılmış ve ardından statik kayma

gerilmesini değerlendirmek için 0,1 s^{-1} sabit hızda 10 dakika boyunca kayma gerilmesi uygulanmıştır (Şekil 3.8). Statik kayma gerilmesi, ölçüm sırasında ulaşılan en yüksek kayma gerilmesi olarak tanımlanmıştır [228]. Yüksek statik kayma gerilmesi değerine sahip olan seriler, baskı işlemi sırasında şeklini daha iyi koruyabildiğinden ve akışa karşı daha fazla direnç gösterdiğinden dolayı 3B yazıcı teknolojisinde kullanılması daha uygundur.



Şekil 3.8 Statik kayma gerilmesi ölçüm prosedürü, kayma hızı-zaman ilişkisi

3.3.3.3 Viskozite Toparlanması

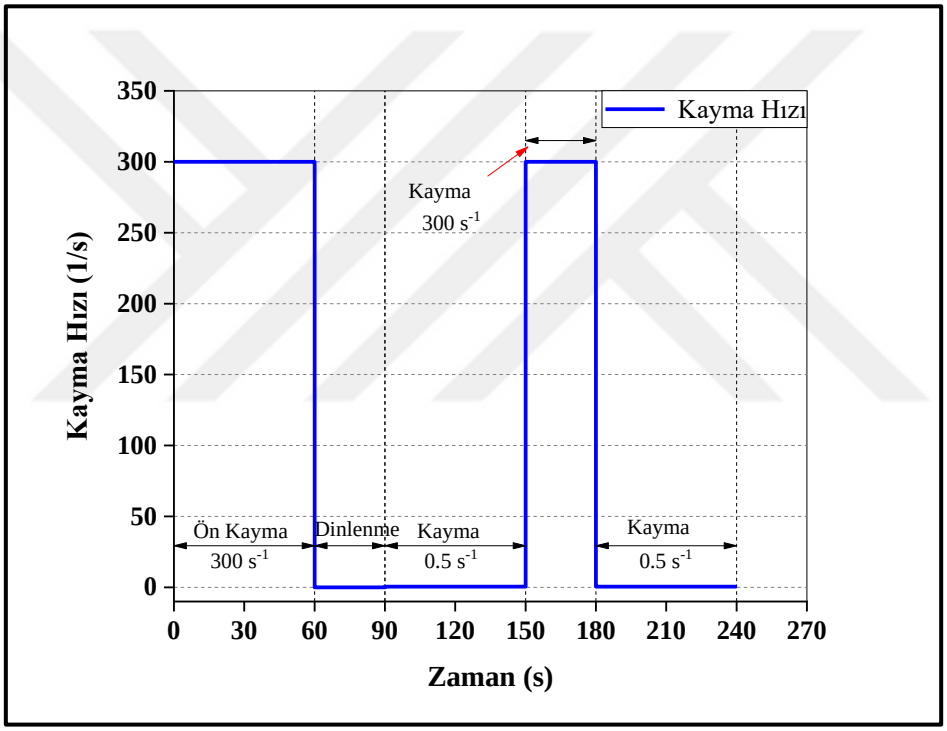
3B yazdırılan beton numunelerinin üretimi, başlangıçta karıştırma sırasında yüksek kayma, ardından pompalama sırasında düşük kayma ve ardından yazdırma ve yerleştirme sırasında yüksek kayma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Beton gibi kayma incelmesi davranışı sergileyen malzemelerde, malzeme düşük kayma hızlarından yüksek kayma hızlarına geçtikçe görünür viskozite çok yüksek bir değerden çok daha düşük bir değere düşmektedir. İlk uygulanan katmanın viskozitesi sonraki katman uygulanmadan önce ilk viskozite değerine yaklaşmalıdır. Aksi takdirde yapısal deformasyonlar görülmektedir. Malzemenin 3B yazdırılabilirlik özelliklerinin uygunluğunu değerlendirmek için viskozite toparlanmasının belirlenmesi kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada görünür viskozite aşağıdaki prosedür kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.9):

i. 60 saniye boyunca 0,5 s^{-1} kayma hızı
ii. 30 saniye boyunca 300 s^{-1} kayma hızı
iii. 60 saniye boyunca 0,5 s^{-1} kayma hızı

Bu kayma gerilmelerinin, 3B yazıcılardaki baskı süreçlerindeki karşılık geldiği süreçler,

i. Dinlenme halini (başlangıç durumu)
ii. Yazdırma aşamasını
iii. Yazdırmanın ardından tekrar hareketsiz durumu ifade etmektedir [229,230].



Şekil 3.9 Viskozite toparlanma ölçüm prosedürü, kayma hızı-zaman ilişkisi

3.3.4 3 Boyutlu Yazıcı Deneyleri

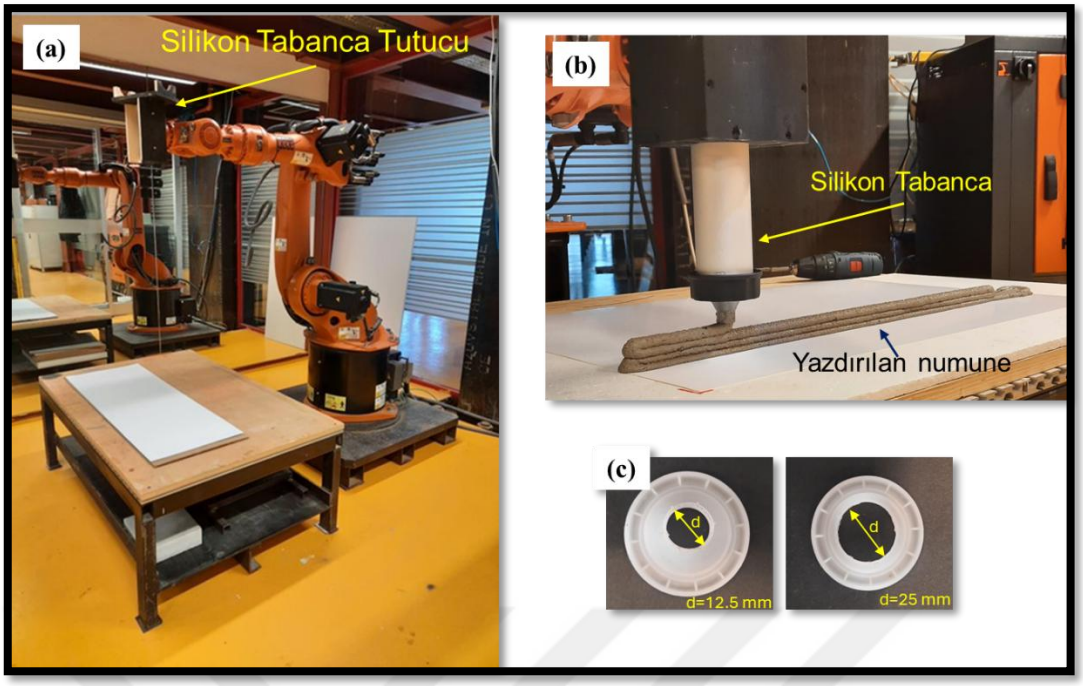
Üretimi gerçekleştirilen ve yapılan deneyler sonucunda yeterli dayanımı, uygun priz süresini ve reolojik özellikleri gösteren karışımların 3 boyutlu robotik yazıcılar ile üretilebilirliğinin belirlenebilmesi için İstanbul Bilgi Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi-Üretim Laboratuvarı'nda bulunan KUKA KR-20 model 6 eksenli robot kol yardımı ile (Şekil 3.10) karışımların yazdırılabilirlik (printability) ve üretilebilirlik (buildability) özellikleri belirlenmiştir.

Malzemenin yazdırma sürecindeki 2 temel faktör, yazdırma hızı ve katman yüksekliğidir. Bu parametreler reoloji ve tiksotropi gibi malzeme özelliklerinin yanı sıra, tasarıma esas özellikler olan şekil ve boyut özellikleri basılan malzemenin kalitesini önemli ölçüde etkiler ve basılan malzemenin özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir [231-233].

Bu çalışmada, yazdırılabilirlik ve üretilebilirlik testleri hamur numunelerde, basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikler ise harç numunelerde gerçekleştirilmiştir. Harç karışımları, S/B oranı 0,45 olacak şekilde tasarlanmış, maksimum agrega boyutu 2 mm olan silis esaslı kum kullanılarak üretilmiş, bağlayıcı/kum oranı 1: 0,8 oranında kullanılmıştır.

Yazdırılabilirlik süreci, basılabilirlik ve üretilebilirlik için 50 mm/s ve 20 mm/s hızında çalıştırılan KUKA KR-20 6 eksenli robot koluna takılan bir otomatik silikon tabancası (Şekil 3.10) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tek-bileşen yöntemiyle hazırlanan karışımlara ait hamur ve harç numuneleri silikon tabancasından (Şekil 3.10) 0,5 l/dk akış hızında yazdırılmıştır. Hamur ve harç karışımları için sırasıyla 12,5 mm ve 25 mm çapında iki farklı nozul (püskürtme ucu, hortum ucu) boyutu kullanılmıştır (Şekil 3.10). Kesit alanı oranı (yani püskürtme ucu/silikon haznesi) 0,25 ve 0,50 olarak belirlenmiştir.

Yazdırma süreci birkaç aşamadan oluşmuştur. İlk olarak, silikon tabancasının robot kolunun flanşına bağlamak için bir adaptör tasarlanmış ve üretilmiştir. Ardından, robotun kontrolcüsünde hassas olarak kalibre edilerek manuel ve otomatik hareket sağlanmıştır. Aynı kalibrasyon, simülasyonun doğru bir şekilde sağlanması için Rhinoceros Grasshopper'da KUKA PRC yazılımı kullanılarak tekrarlanmıştır. Kurulum tamamlandıktan sonra, Grasshopper (görsel planlama platformu), yazdırma için dilimleme yolları oluşturmak için kullanılmıştır. Grasshopper/KUKA PRC daha sonra robotun KRL dilindeki kodunu oluşturmak için kullanılmıştır. Aynı anda, robot kolunun hareketleri KUKA PRC yazılımında simüle edilmiştir. Test robotun başlangıç hareketi ile başlamış ve silikon tabanca manuel olarak aktif edilmiştir.



Şekil 3.10 a) KUKA KR-20 robot kolu, b) kiriş numuneleri üretmek için baskı işlemi, c) hamur ve harç karışımları için nozullar

3.3.4.1 Yazdırılabilirlik

3 boyutlu yazıcılar ile hamur/harç karışımlarının yazdırılabilirlik (ekstrüde edilebilirlik), yazdırma sırasında herhangi bir kesinti/tıkanma olmaksızın malzemenin püskürtme ucundan düzgün bir şekilde yazdırılabilmesi ve püskürtme ucundan çıkan malzemenin kesit şeklinin korunması olarak açıklanmaktadır. Bu kavram, 3B yazıcı için hamur veya harç karışımlarının yazdırılabilirliğini açıklayan terimdir. Yazdırılacak malzemenin şeklini ve stabilitesini koruması ve reolojik özellikleri, taze haldeki harcın yazdırılabilirlik özellikleri üzerinde etkilidir [229,230,234,235,236].

Literatürdeki çalışmalarda yazdırılabilirlik, malzemenin belli sabit bir hızda, doğrusal olarak belirlenmiş bir uzunluk boyunca kesintisiz ve kararlı olarak yazdırılması sürecidir. Bu süreç ayrıca malzemenin stabilitesinin görsel kontrollerle belirlenmesi olarak da gerçekleştirilmiştir [173, 228, 229, 234-237]. Taze harcın yazdırma sırasında akış özellikleri, yazdırılabilirliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir [229, 234, 236, 237]. Bu çalışmada, yazdırılabilirlik testi, her biri 40 cm uzunluğunda olan iki U şeklindeki eleman üretilerek yapılmıştır.

3.3.4.2 Üretilebilirlik

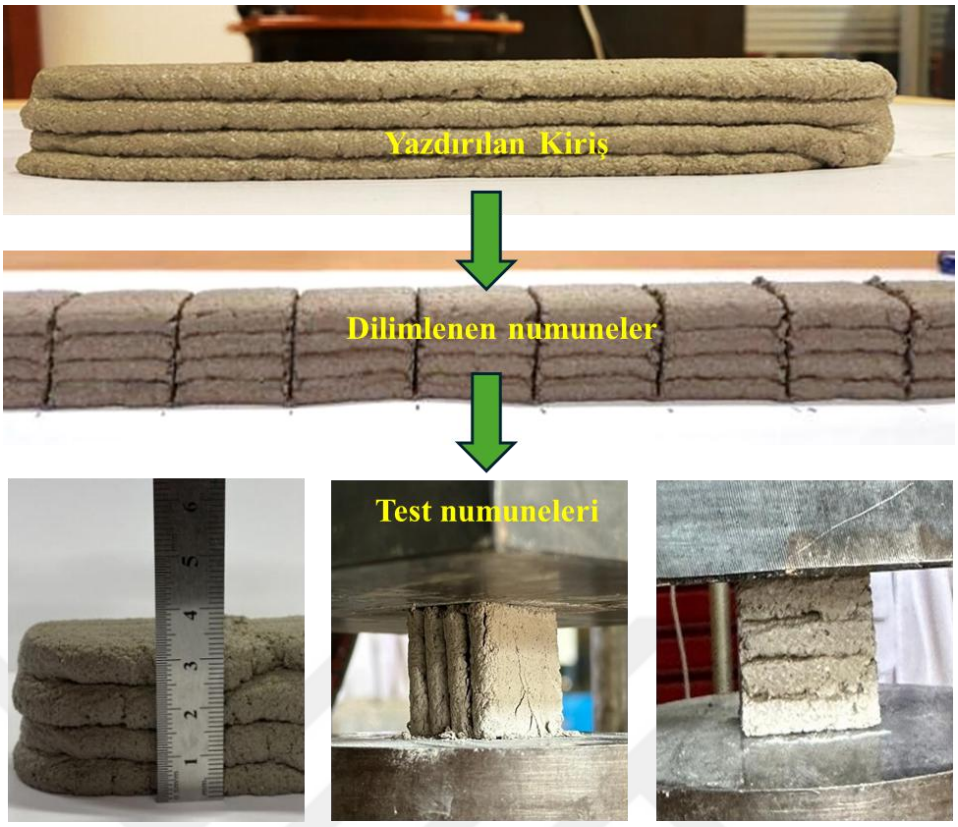
Üretilebilirlik (Buildability), taze haldeki malzemenin yazdırma işlemi sonrasında 2. katman üzerine yazdırılmadan (düşmeden) önce başlangıç viskozitesini ve kayma gerilmelerini geri kazanması ve kendi ağırlığı altında şeklini koruyabilmesi olarak tanımlanabilir. Ayrıca, alt katmandaki malzemenin üst katmandaki malzemelerden kaynaklanan ağırlıklar altında şekil değiştirmeden formunu koruyabilmesi olarak da ifade edilebilmektedir. Bir diğer ifadeyle, yük taşıma kapasitesi olarak da tanımlanmaktadır [238]. Üretilen seriler üzerinde üretilebilirlik testleri, her biri 8 mm kalınlığında olmak üzere ve 100 mm çapında olacak şekilde toplam 10 katmandan oluşturulan silindirik görünümlü şekillerin yazdırılmasıyla üretilebilirlik örnekleri oluşturulmuş ve yazdırılan karışımlarının davranışları gözlemlenmiştir.

3.4 Sertleşmiş Hal Özellikleri

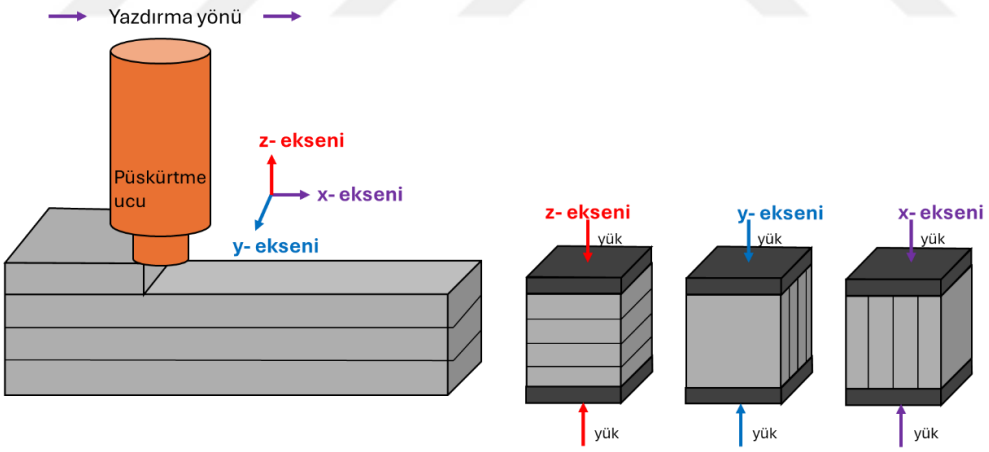
3.4.1 Basınç Dayanımı Testi

3B yazıcıyla üretilen numunelerin basınç dayanımlarını değerlendirmek amacıyla, 4 katmanlı kiriş numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.11). Robotik kol, 20 mm/sn hızla hareket ederek ve 25 mm çapında bir nozul kullanarak her bir katman kalınlığı yaklaşık 0,8 mm olacak şekilde 300 x 32 mm (uzunluk x genişlik) ölçülerinde kiriş numuneler yazdırmıştır. Bu kiriş numunelerden, sertleşme sürecinden önce yaklaşık 32 x 32 x 32 mm boyutlarında küp numuneler kesilmiş (Şekil 3.11) ve anizotropik performansı değerlendirmek amacıyla basınç dayanımı testleri üç farklı yönde gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, her bir yön için alınan üç örneğin ortalaması ile değerlendirilmiştir. İzlenen test yöntemleri Şekil 3.12'de şematik olarak gösterilmiştir.

Tüm numuneler, 28 günlük test süresine kadar (21±2) °C sıcaklık ve %65 bağıl nem ortamında tutulan bir nem kabininde saklanmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için aynı boyutlara sahip kalıp döküm numuneleri de hazırlanmış ve test edilmiştir



Şekil 3.11 Basınç dayanımını belirlemek için 3B yazıcılı numunelerin numune hazırlanması ve test edilmesi



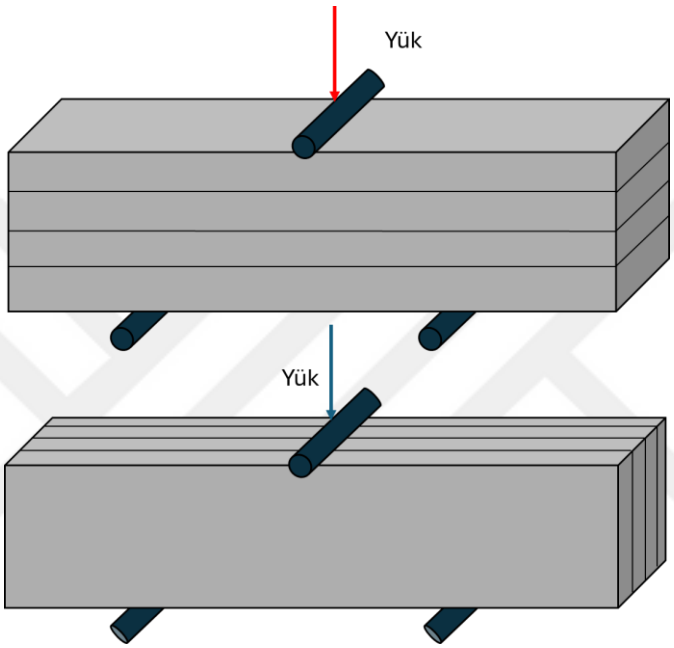
Şekil 3.12 Basınç dayanımını belirlemek için kiriş örneklerinin ve yükleme yönünün yönelimlerinin yazdırılması

3.4.2 Eğilme Dayanımı Testi

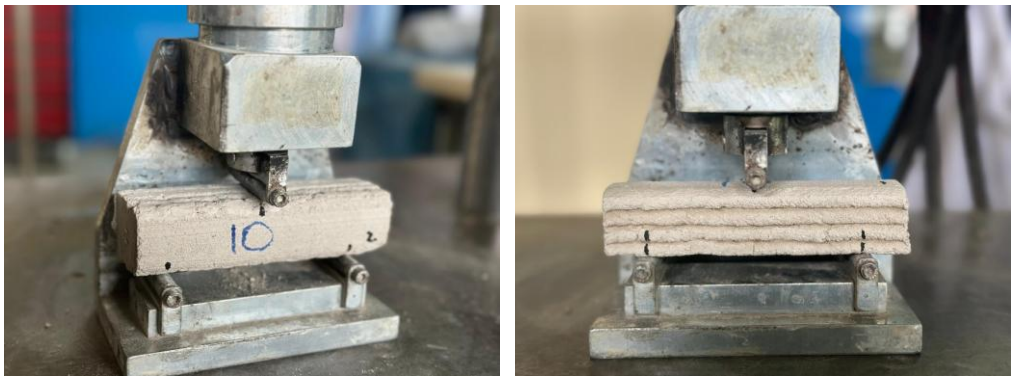
3 noktalı eğilme testi, 3B yazıcı ile üretilen 32 x 32 x 120 mm (yükseklik x genişlik x uzunluk) boyutlarındaki kiriş numunelerde, 28 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilmiştir. Anizotropik davranışı incelemek amacıyla, basım yönüne

paralel ve dik olacak şekilde yükleme uygulanmış (Şekil 3.13), ardından ortalama eğilme dayanımları hesaplanmıştır.

Her test için üç numune kullanılmış ve tüm numuneler, 28. güne kadar (21±2) °C sıcaklık ve ~%65 bağıl neme sahip bir nem kabininde muhafaza edilmiştir. Karşılaştırma yapmak için aynı boyutlara sahip kalıp döküm numuneleri de hazırlanmış ve test edilmiştir. Şekil 3.14'de 3B yazıcı ile yazdırılan kiriş numunelerine ait eğilme dayanımı test aşaması verilmiştir.



Şekil 3.13 Eğilme dayanımı testi için yükleme yönlerinin şematik gösterimi



Şekil 3.14 Eğilme dayanımı testi

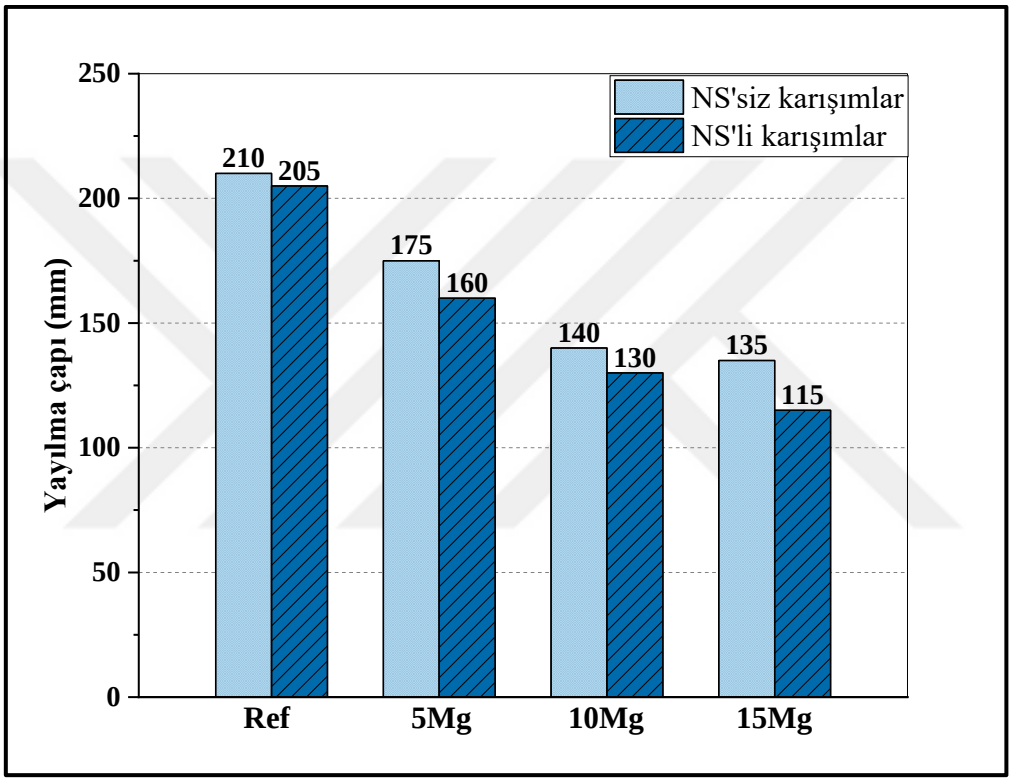
4
BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Yayılma Testi

3B yazıcı teknolojisinde kullanılan beton karışımlarının temel özelliklerinden biri olan yazdırılabilirlik ve üretilebilirlik, betonun taze hal özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Önceki çalışmalar; malzemenin çökme davranışının statik kayma gerilmesi ve üretilebilirlik ile ilişkili olduğunu, yayılma davranışının ise dinamik kayma gerilmesi ve yazdırılabilirlik özellikleri ile paralellik gösterdiğini ortaya koymuştur [239,240].

Üretilen harç karışımlarının yayılma çapları Şekil 4.1'de sunulmuştur. Sadece cürufun kullanıldığı referans karışım, 210 mm ile en büyük yayılma çapına sahip olmuştur. Karışımlara r-MgO ikamesi yapılması, yayılma çapında bir azalmaya neden olmuş ve r-MgO ikame seviyelerinin artmasıyla bu azalma daha belirgin hale gelmiştir. Yayılmadaki bu azalmanın, kısmen r-MgO'nun daha ince tanecik boyutuna sahip olmasından kaynaklandığı ve bu durumun su ihtiyacını artırdığı düşünülmektedir (Bkz. Şekil 4.1). Daha önce yapılan araştırmalar, cüruf ve r-MgO içeren bağlayıcı sistemlerin, yalnızca cüruf kullanılan karışımlara kıyasla genellikle daha düşük akışkanlığa sahip olduğunu göstermiştir [241,242]. Yayılmadaki azalmaya neden olan bir diğer etkenin, karışımdaki karbonatların yüksek konsantrasyonu ve bunun sonucunda oluşan $CaCO_3$'ün düşük doygunluk limiti olduğu öne sürülmektedir. Bu durum, cürufun Ca^{2+} iyonlarını serbest bırakmasıyla gerçekleşen ve erken yaşlanma reaksiyonu olarak bilinen gaylusit oluşumunu ifade etmektedir. Gaylusit oluşumu alkali ve karbonat iyonlarının bir araya gelerek bir çökelti oluşturması süreciyle gerçekleşir. Akışkanlığı ve reolojik özellikleri olumsuz etkileyerek malzemenin işlenebilirliğini zorlaştırmaktadır [243, 244].

Beklendiği gibi, nano-silika eklenmesi akışkanlığı daha da azaltmıştır. Ref-N karışımı, referans karışıma kıyasla düşük bir azalma ile 205 mm yayılma çapına sahip olmuştur (Şekil 4.1). Nano-silika içeren karışımlar, tüm r-MgO ikame seviyelerinde nano-silikasız karışımlara kıyasla daha düşük yayılma değerleri göstermiştir. Bu karışımlar arasında, 15Mg-N karışımı en düşük yayılma çapı olan 115 mm ile en düşük akışkanlığa sahip olmuştur. Nano-silika içeren karışımlardaki yayılma çapındaki bu azalmanın, nano-silikanın yüksek ince yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir



Şekil 4.1 NS'siz ve NS'li karışımların yayılma testi sonuçları

Pasupathy vd., benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Cüruf ve uçucu kül içeren ve tuğla atığı ile çeşitli oranlarda ikame edilen jeopolimer karışımların yayılma çaplarında azalma gözlemlenmiştir [245]. Chougan vd., attapulgit nano-kili (A-NK) kullandıkları bir çalışmalarında, %1 A-NK ikamesinin AAM'nin yayılma çapında %25'lik bir azalmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir [246]. Gao vd.., sodyum silikat ile aktive edilmiş cüruf ve uçucu kül karışımlarının akış davranışını, farklı ikame oranlarında nano-silika ikamesi ile üretilmiş karışımlar üzerinde incelemişlerdir [119]. NS içeriği arttıkça yayılma çapında belirgin bir azalma olduğunu bulmuşlar, bu azalmayı NS'nin yüksek yüzey alanı ve reaktivitesine

bağlamışlardır. NS ikamesinin artmasıyla yayılma çapındaki azalmayla ilgili benzer bulgular diğer araştırmacılar tarafından da gözlemlenmiştir [120-122].

4.2 Priz Süresi

Priz süresi, katman stabilitesini ve yazdırma sürekliliğini etkileyerek 3B yazıcılarda üretilen çimento esaslı malzemelerin üretimini doğrudan etkiler. Optimum priz süresi elde etmek, karışımın taze özelliklerini dengede tutarak yeterli işlenebilirlik ve erken dayanım gelişimini sağlamayı gerektirir. Priz süresi ile betonun 3B yazdırma süreci arasındaki ilişki, yapı kabiliyeti, katmanlar arası aderans ve yazdırılan yapıların yapısal bütünlüğünü etkileyen kritik bir faktördür.

Cüruf esaslı karışımlarda r-MgO ve nano-silikanın etkilerini belirlemek amacıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri test edilmiştir; sonuçlar Şekil 4.2'de gösterilmektedir. İşlenebilir süre, yeni bir çimento esaslı katmanın yazdırılabileceği süreyi ifade eder ve doğrudan priz başlangıç süresinden etkilenir. Optimum işlenebilir süre; yazdırılan katmanın, sonraki katmanların ağırlığını taşıyabilecek kadar dayanım kazanmasını, üst katmanların altında formunu bozmadan sabit kalmasını ve bir sonraki katmanla arasında iyi bir aderans sağlayacak kadar yüzeyinin nemli kalmasını mümkün kılan süredir. Bu süre hem yapısal bütünlüğün hem de 3B yazıcı ile yazdırılan katmanlar arasında aderansın korunması için kritik öneme sahiptir. Literatürde birçok yazar, çimento esaslı malzemelerin priz başlangıç süresi ile işlenebilir süre arasındaki yakın ilişkiyi belirtmiştir [247,248].

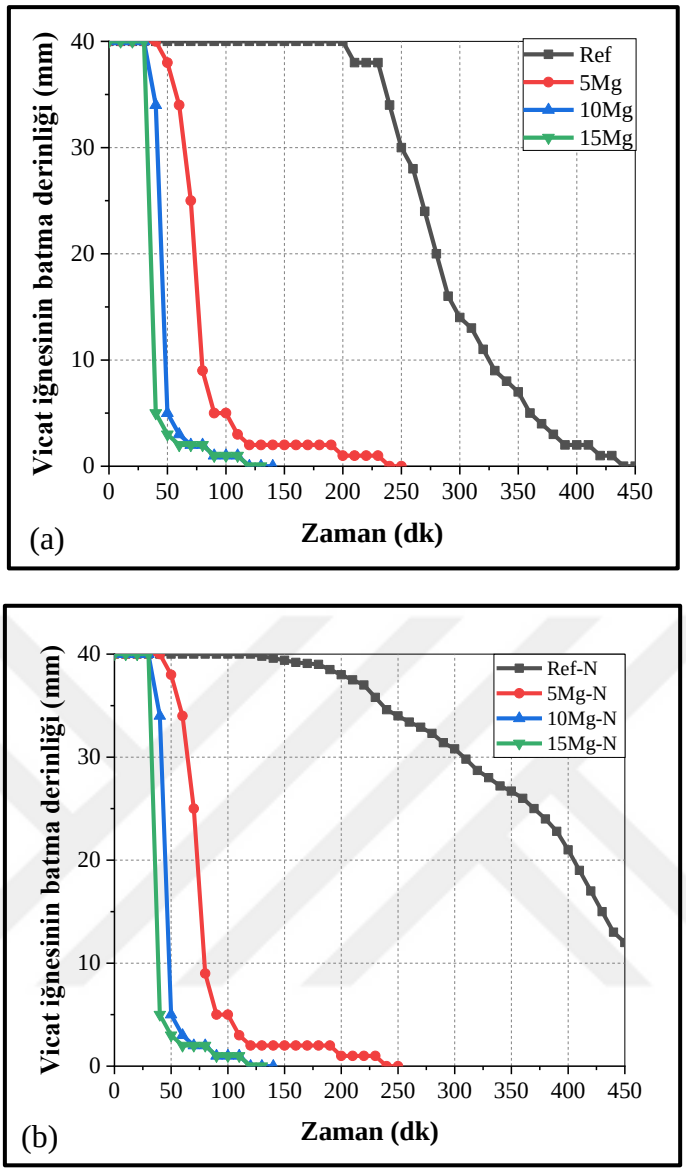
Referans karışımın (Ref) priz başlangıç ve bitiş süreleri sırasıyla 270 ve 420 dakika olarak ölçülmüştür. r-MgO ilavesi, hem priz başlangıç hem de bitiş sürelerini önemli ölçüde kısaltmıştır. Örneğin, 5Mg karışımında priz başlangıç süresi yaklaşık 70 dakika olarak tespit edilmiştir. Daha yüksek r-MgO içerikleri, bu süreleri daha da kısaltmış ve 10Mg ile 15Mg karışımlarında daha kısa değerler elde edilmiştir (Şekil 4.2'de gösterildiği gibi). Priz bitiş sürelerinde de bu eğilim gözlenmiş ve 10Mg ile 15Mg karışımların her ikisinde de priz bitiş süresi 90 dakika olarak ölçülmüştür. Bu hızlı priz süreleri, NS'siz karışımların 3B baskı uygulamalarında güçlü bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

NS'siz karışımlarda priz süresinin hızlanması, büyük ölçüde hidrotalsit ve alüminyum modifiye edilmiş C–(A)–S–H'nin hızlı oluşumuna dayanmaktadır. Bu

yapı, matrisin erken dönemde kararlı hale gelmesini sağlamaktadır [29, 249, 250]. Buna karşılık, nano-silika, tüm karışımlarda, özellikle referans karışımı (Ref) üzerinde, priz bitiş süresini belirgin şekilde uzatmıştır (Şekil 4.2'de gösterildiği gibi). Ref-N karışımında, priz bitiş süresi neredeyse bir tam gün gecikmiştir. Nano-silikanın oranı, boyutu, formu (toz veya kolloidal), ekleme yöntemi, kullanılan bağlayıcı türü ve aktivatör konsantrasyonu gibi faktörler priz davranışı üzerinde etkili olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan çalışmalarda, yarı-adyabatik kalorimetri testleri, nano-silikanın erken çözünerek çözelti içerisindeki başlangıç silika içeriğini artırdığını ve bu durumun cüruf ile r-MgO reaksiyonlarını geciktirdiğini ortaya koymuştur. NS'nin düşük parçacık boyutu ve geniş yüzey alanı, cüruf ve r-MgO'ya kıyasla silika çözünmesini hızlandırmakta, ancak bu durum Si, Ca ve Mg'nin bu bağlayıcı türleri çözünme hızını azaltarak reaksiyonun pik sıcaklığını geciktirmektedir. Bu, Ref-N karışımında gözlemlenen priz süresinin uzama eğilimini açıklamaktadır [240].

NS'li karışımlarda priz bitiş süresi, NS'siz karışımlara göre bir miktar artış göstermiştir. Örneğin, 10Mg-N ve 15Mg-N karışımlarında bu süreler sırasıyla 160 ve 140 dakika olarak ölçülmüştür. Sistemdeki Mg^{2+} iyonlarının varlığı, üçlü karışımlardaki priz süresinin uzamasını kısmen dengelediği görülmektedir. Kısa priz başlangıç süresi (işlenebilir süre), karışımın sonraki katmanları taşıyabileceği kadar dayanım kazanmasını sağlayabilir. Ancak bu durum, katmanlar arası aderansı olumsuz etkileyebilir ve daha da önemlisi, karışımın yazdırılabilirliğini hızlı bir şekilde kaybetmesine neden olabilir. Bu nedenle, 15Mg karışımındaki kısa priz süresi, 3B yazıcı sürecinde problem yaratabilecek bir durum olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.2 a) NS'siz b) NS'li karışımların priz süresi sonuçları

Kashani ve Ngo, çeşitli cüruf esaslı alkali-aktivasyonlu karışımların priz başlangıç sürelerini incelemiş ve aktivatör konsantrasyonunun artırılmasının priz süresini kısalttığını, buna karşın su/katı oranının artmasının priz süresini uzattığını gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışmada, minimum ve maksimum priz başlangıç süreleri sırasıyla 35 dakika ve 230 dakika olarak tespit edilmiştir [251].

Alghamdi vd., farklı hammadde türlerinin yanı sıra sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat aktivatörlerinin alkali-aktivasyonlu uçucu kül esaslı karışımlar üzerindeki priz süresi, reolojik özellikler ve yazdırılabilirlik etkilerini incelemişlerdir. NaOH ilavesinin, silika polimerleşmesinin azalmasına bağlı olarak priz süresini geciktirdiğini, buna karşılık daha yüksek cüruf içeriğinin priz süresini

hızlandırarak 3B yazıcı uygulamaları için faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Karışımların priz başlangıç sürelerinin, kullanılan hammadde türü ve miktarına bağlı olarak 100 dakika ile 400 dakika arasında değiştiği rapor edilmiştir [138].

Sikora vd., başka bir çalışmada, çimentolu 3B yazdırılabilir kompozitlerin priz süresi üzerindeki farklı nano-silika dozajlarının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, nano-silika eklenmesi ile hızlandırılmış bir hidratasyon süreci gözlemlenmiştir; çünkü nano-silika, daha hızlı $Ca(OH)_2$ oluşumuna ve daha fazla C_3S fazının tüketilmesine neden olmaktadır. Ayrıca, daha yüksek nano-silika dozajlarının priz süresini ve işlenebilir süreyi kısalttığı ifade edilmiştir [252].

4.3 Reolojik Özellikler

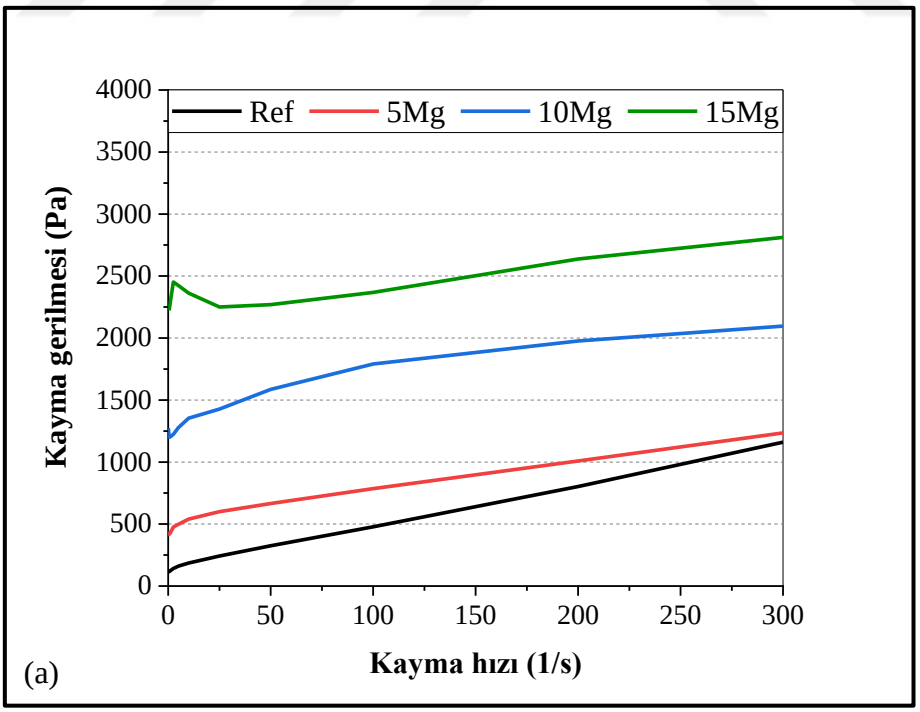
4.3.1 Akış Eğrileri ve Dinamik Kayma Gerilmesi

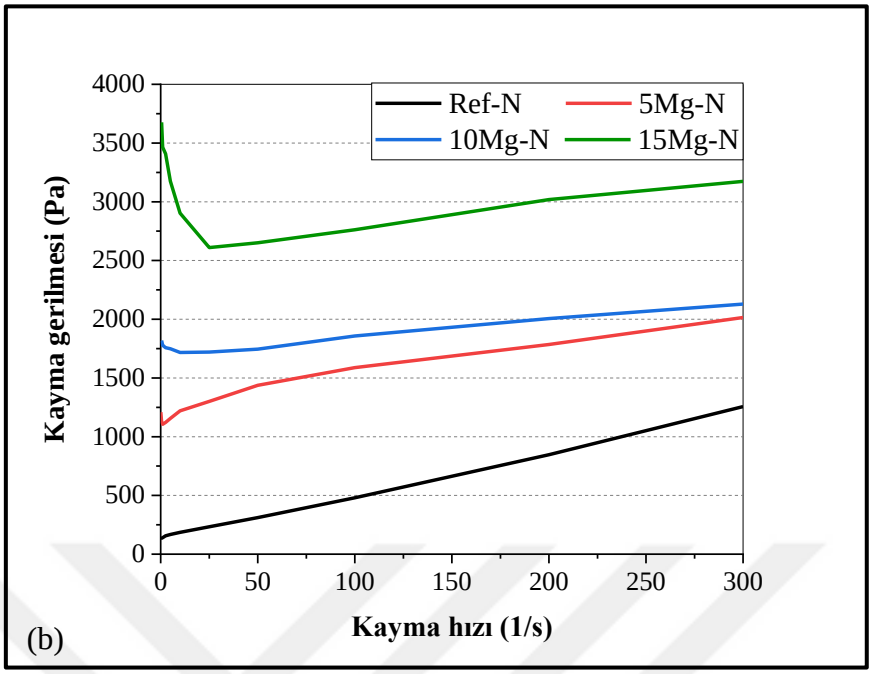
Alkali-aktive malzemelerin (AAM) reolojik davranışı, OPC'ye kıyasla daha az bilinmektedir. Bu durum, AAM sistemlerinde meydana gelen kimyasal reaksiyonların karmaşıklığı ve kullanılan hammaddelerin kendine özgü fiziksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, alkali silikat ile aktive edilen cüruf, yüksek iyonik yoğunluk ve yüksek alkalilik seviyesine sahip son derece karmaşık bir kimyasal ortam oluşturarak reolojik özelliklerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Kashani vd., bu karmaşık kimyasal ortamın alkali-aktive malzemelerin reolojik davranışını anlamayı zorlaştırdığını belirtmiştir [253]. Yoğun AAM süspansiyon karışımlarda, kısa menzilli itme kuvvetleri, normal ve kayma gerilmeleri, sıvı basıncı, elektriksel çift tabaka kuvvetleri ve hidrodinamik etkiler gibi çeşitli iç kuvvetler etkili olmaktadır [254]. Bu kuvvetler arasındaki denge, reolojik bir parametre olan kayma gerilmesini belirlemektedir. Kayma gerilmesi ile malzemenin çökme yüksekliği arasında ters bir ilişki bulunmaktadır. Daha yüksek çökme değerleri, genellikle daha düşük kayma gerilmesini ifade etmekte ve bu durum, Roussel tarafından malzemenin daha akışkan bir yapıya sahip olmasıyla ilişkilendirilmiştir [255].

Üç boyutlu yazıcı ile yapı malzemelerinin üretiminde, malzemenin kayma gerilmesi büyük bir öneme sahiptir. Daha düşük kayma gerilmesi ve viskozite, malzemenin pompalanabilirliğini ve yazdırılabilirliğini kolaylaştırırken, çok düşük kayma gerilmesi malzemenin şeklini kaybetmesine, çökmesine veya kendiliğinden

yayılmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, 3B yazıcı ile üretimde kayma gerilmesinin optimize edilmesi gerekmektedir. Bu optimizasyon, her bir katmanın düzgün bir şekilde yerleştirilmesini sağlarken, sonraki katmanları destekleyecek yapısal bütünlüğün korunmasını hedeflemektedir.

Şekil 4.3'te, r-MgO ikame seviyelerinin ve NS katkısının cüruf esaslı, tek bileşenli, sodyum karbonat ile aktive edilen sistemlerin reolojik özellikleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Çalışma kapsamında, çoğu karışımın akış eğrilerine Herschel-Bulkley modelinin başarıyla uyum sağladığı tespit edilmiştir. İlgili parametreler Tablo 4.1'te özetlenmiştir. 15Mg ve 15Mg-N dışındaki tüm karışımlar için R değerleri 0.96'nın üzerinde bulunmuştur. Çoğu karışım, kayma incelmesi davranışı sergilemiştir (akış indeksi n < 1). Ancak, 15Mg, Ref-N ve 10Mg-N karışımları, yüksek miktarda r-MgO veya nano-silika ilavesi nedeniyle, 1'in üzerinde bir akış indeksi ile kayma kalınlaşması davranışı göstermiştir. Bu durum, yüksek miktarda r-MgO'nun ve düşük miktarda nano-silikanın bile tek bileşen metoduyla üretilmiş sodyum karbonatla aktive edilen r-MgO/cüruf esaslı NS katkılı sistemlerdeki hamurlarının reolojik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.





Şekil 4.3 (a) NS'siz ve (b) NS'li karışımların akış eğrileri

Tablo 4.1, tek bileşenli üretim metoduyla üretilmiş sodyum karbonatla aktive edilen r-MgO/cüruf esaslı NS katkılı sistemlerdeki hamurların reolojik parametrelerini ve dinamik kayma gerilmelerini içermektedir. AAM'lerde, kayma gerilmesindeki değişimler, çözünen iyon konsantrasyonu ve priz süreci ile ilişkilendirilmekte olup, bu süreç reaksiyon ürünlerinin oluşumuna karşılık gelmektedir [43]. Referans karışımın (Ref) dinamik kayma gerilmesi 128,2 Pa olarak kaydedilmiş ve tüm karışımlar arasında en düşük değer olarak belirlenmiştir. Cüruf yerine r-MgO kullanılması, kayma gerilmesindeki önemli bir artışa yol açmış ve 5Mg karışımı için 433,7 Pa değerine ulaşmıştır. r-MgO miktarındaki artış, kayma gerilmelerini 10Mg karışımı için 1172,2 Pa ve 15Mg karışımı için 2321,2 Pa değerine kadar yükseltmiştir.

Buna karşılık, nano-silika ilavesi Ref-N karışımında dinamik kayma gerilmesinde yaklaşık %10 oranında bir artışa neden olmuş, ancak NS'lı diğer karışımlarda belirgin artışlar gözlemlenmiştir. 5Mg-N karışımı, değerini iki katına çıkarırken, 10Mg-N ve 15Mg-N karışımları yaklaşık %50 daha yüksek değerler göstermiştir. En yüksek kayma gerilmesi, 15Mg-N karışımı için 3570,2 Pa olarak kaydedilmiştir.

NS'sız karışımlarda gözlemlenen kayma gerilmesindeki artışlar, iki ana faktöre bağlanmaktadır: İlk olarak, r-MgO'dan gelen Mg^{2+} iyonlarının karbonat iyonu

konsantrasyonunu azaltması ve gaylussit, kalsit ve hidrotalsit gibi karbonat bileşiklerinin oluşumunu kolaylaştırmasıdır. Bu süreç, cürufun çözünmesini artırarak, daha fazla miktarlarda kararlı reaksiyon ürünlerinin üretilmesini sağlamaktadır [256]. İkinci olarak, r-MgO'nun daha küçük tanecik boyutu, serbest suyu daha fazla adsorbe etme özelliği ve aglomere olma eğilimindedir. Bu da daha yüksek dinamik kayma gerilmelerine sebebiyet verebilmektedir. Benzer şekilde, nano-silika ilavesi, çok ince parçacık boyutu nedeniyle kayma gerilmelerinin önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır.

Tablo 4.1 Karışımların reolojik parametreleri

Seriler	τ_0 (Pa)	K	n	R
Ref	128,2	4,6	0,9	1,00
5Mg	433,7	16,8	0,7	1,00
10Mg	1172,2	58,6	0,5	0,99
15Mg	2321,2	0,0	1,7	0,91
Ref-N	145,6	2,4	1,1	1,00
5Mg-N	1117,3	24,5	0,6	0,99
10Mg-N	1752,2	0,2	1,4	0,96
15Mg-N	3570,2	-	-	0,68

Kaze vd., lateritik kil ve demir yönünden zengin laterit kil jeopolimerlerin reolojik özelliklerini incelemiştir [257]. Araştırma sonuçları, demir yönünden zengin laterit kilin, lateritik kile kıyasla çok daha yüksek kayma gerilmesine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, malzeme bileşenleri arasındaki daha güçlü etkileşimle açıklanmaktadır. Demirin silikon ve alüminyuma göre daha hızlı reaksiyon göstermesi, alkali ortamda demir hidroksit jelinin daha hızlı oluşumuna ve böylece polikondensasyon sürecinin (küçük moleküllerin birleşerek daha büyük ve sağlam bir yapı oluşturduğu kimyasal bir süreçtir) hızlanmasına yol açarak daha rijit bir yapı oluşturmaktadır.

Panda vd., uçucu kül esaslı tek bileşenli jeopolimer karışımlarına daha fazla cüruf eklenmesinin kayma gerilmesini, plastik viskoziteyi ve viskozite toparlanmasını artırdığını bulmuştur [258]. Bu durum, cürufun kalsiyum açısından zengin yapısı ve köşeli parçacık şekli nedeniyle paketleme yoğunluğunu artırması ve tiksotropiyi iyileştirmesi ile ilişkilendirilmiştir.

Ma vd., uçucu kül ve cüruf esaslı tek bileşenli jeopolimerlerde, uçucu kül yerine %100'e kadar çelik cürufu kullanılmasının karışımın reolojik özelliklerini azalttığını rapor etmiştir [142]. Bu azalma, çelik cürufun düşük reaktivitesine bağlanmıştır; bu durum, uçucu kül ve cürufun aktivatör ile reaksiyona girerek hidratasyon jelleri oluşturmasını engellemiştir.

Panda vd., cüruf/uçucu kül esaslı jeopolimer karışımların yazdırma ve reolojik özelliklerini incelemiş ve nano-kil ilavesinin kayma gerilmesini önemli ölçüde artırdığını, plastik viskoziteyi ise sadece az miktarda etkilediğini belirtmiştir [248].

Dai vd., sodyum hidroksit ile aktive edilen cüruf/metakaolin esaslı karışımların reolojik özelliklerini araştırmış ve cürufun %20'sinin metakaolin ile değiştirilmesinin dinamik kayma gerilmesini ve viskoziteyi önemli ölçüde artırdığını tespit etmiştir [259]. Bu artışlar iki faktöre bağlanmıştır: Birincisi, metakaolin ile cüruf arasındaki yoğunluk farkı, metakaolinin daha yüksek bir katı hacim oranı oluşturmasına neden olmaktadır. İkincisi, metakaolinin daha küçük parçacık boyutu, daha fazla serbest suyu adsorbe etme ve aglomere olma eğiliminde olup, daha yüksek kayma gerilmesi oluşmasına yol açmıştır [260,261]. Artan viskozite ise metakaolin tanelerinin tabaka benzeri morfolojisinden kaynaklanmış ve daha düşük maksimum paketleme oranına neden olmuştur [262,263].

Önceki çalışmalarda, çimento harçlarında nano-silikanın kayma gerilmesini ve plastik viskoziteyi artırdığı bildirilmiştir [264–265]. Bu artış, parçacıklar arasındaki itme etkisiyle oluşan daha iyi dağılım ve topaklanmanın engellenmesine atfedilmiştir [266]. Güllü vd., %0.5 ile %3 arasında değişen nano-silika ilavesinin kayma gerilmesini ve viskoziteyi artırdığını rapor etmiştir [267]. Bu artış, topaklanmaların parçalanması ve daha ince parçacıklar arasındaki daha güçlü Van der Waals kuvvetlerinden kaynaklanmıştır [268].

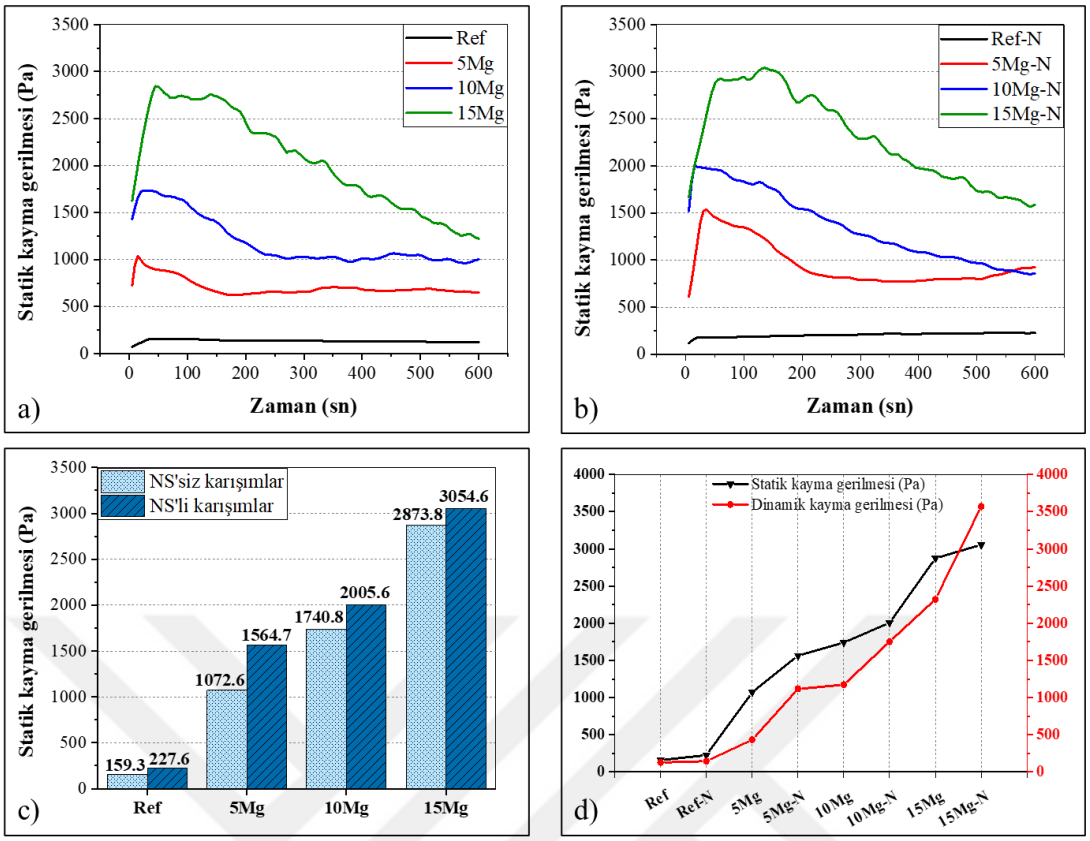
4.3.2 Statik Kayma Gerilmesi

Statik kayma gerilmesi, hamurun durağan durumdan makroskopik akış durumuna geçmesi için gereken minimum gerilme olarak tanımlanır ve 3B yazıcı süreçlerindeki yapı kabiliyeti üzerinde kritik bir rol oynar [269]. Daha yüksek statik kayma gerilmesi, hamurun hem kendi ağırlığından hem de üst üste yazdırılan katmanların ağırlığından kaynaklanan deformasyonlara karşı daha iyi direnç göstermesini sağlar. Bu durum, malzemenin katman katman üretilme sürecinde

şekil ve kararlığını koruma yeteneğini artırır [270]. NS'siz ve NS'li karışımların statik kayma gerilmesi zaman ilişkisi grafikleri Şekil 4.4 (a) ve (b)'de, tüm serilerin statik kayma gerilmesi değerleri Şekil 4.4 (c)'de, dinamik ve statik kayma gerilmeleri ise Şekil 4.4 (d)'de verilmiştir.

Şekil 4.4 (a)'dan da görüldüğü üzere, r-MgO ilavesiyle statik kayma gerilmesi artmaktadır ve 5Mg karışımı Ref karışımına göre yaklaşık dört kat artış göstererek 159.3 Pa'dan 1072.6 Pa'a ulaşmıştır. r-MgO miktarı arttıkça statik kayma gerilmesi artmış ve %15 r-MgO içeren karışımda 3054.6 Pa ile en yüksek değer elde edilmiştir (Şekil 4.4(c)). Statik kayma gerilmesi, hamurun durgun halden akışa geçmesini başlatmak için gerekli kritik gerilme olarak tanımlanmakta olup serbest su içeriği, parçacık flokülasyonu (topaklaşma) ve reaksiyon süreci gibi faktörlerden etkilenmektedir [271,272]. r-MgO'nun daha ince tanecik boyutu, karışım içerisindeki serbest su ihtiyacını artırmakta ve daha fazla serbest suyun emilmesine yol açmaktadır. Bu durum, serbest su miktarındaki azalmayla parçacıklar arasındaki iç sürtünmeyi artırmakta, kayma gerilmesini ve dolayısıyla statik kayma gerilmesini yükseltmektedir [270].

Diğer taraftan, NS tüm karışımlarda statik kayma gerilmesini artırmıştır. En belirgin artış 5Mg-N karışımında ölçülmüş, statik kayma gerilmesi değeri 1072.6 Pa'dan 1564.7 Pa'ya yükselmiştir. Bu sonuçlar, statik kayma gerilmesini artırmada r-MgO'nun NS'den daha etkili olduğunu göstermektedir. Statik kayma gerilmesi değerleri, 15Mg-N karışımı hariç tüm karışımlar için tutarlı bir şekilde dinamik kayma gerilmesi değerlerini aşmıştır (bkz. Şekil 4.4(d)). İki parametre Ref ve Ref-N karışımları için birbirine oldukça yakınken, NS'siz karışımlar ve NS'li karışımlar arasında belirgin bir fark gözlemlenmiştir. Dikkat çekici bir şekilde, NS'li karışımlardaki fark, NS'siz karışımlara kıyasla daha az belirgindir. Bununla birlikte, bu eğilime bir istisna olarak, 15Mg-N karışımında dinamik kayma gerilmesi, statik kayma gerilmesini aşmıştır.



Şekil 4.4 (a) NS'siz karışımların kayma gerilimi – zaman grafiği, (b) NS'li karışımların kayma gerilimi – zaman grafiği, (c) tüm karışımların statik kayma gerilimi değerleri, (d) karışımların statik ve dinamik kayma gerilimi karşılaştırması

Reales vd., nano- ve mikro-silikanın 3B yazdırılabilir beton özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuçları, silika esaslı malzemelerin, 3B yazıcı için kullanılan çimentolu kompozitlerde hem statik kayma gerilmesini hem de tiksotropik yapılaşma hızını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [273]. Nano- ve mikro-silikanın her ikisinin de su ihtiyacını artıran yoğunlaştırıcı bir etkisi olduğu belirlenmiştir.

Panda vd., az miktarda nano-kil (%0,4) ilavesinin, referans karışımına kıyasla statik kayma gerilmesini üç katına çıkardığını bulmuşlardır. [230]. Bu artışın, nano-kil parçacıklarının kenar-yüzey etkileşimleriyle oluşturduğu yoğun içyapı ağı nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir [274]. Yazarlar, nano-kil ilavesinin hızlı flokülasyona neden olduğunu ve bu nedenle 3B yazıcı süreci için ideal bir tiksotropik malzeme olduğu sonucuna varmışlardır.

Panda vd.. tarafından yapılan başka bir çalışmada, potasyum silikat ve hidroksit ile aktive edilmiş cüruf/uçucu kül esaslı karışımların statik kayma gerilmesi farklı

aktivatör konsantrasyonlarında ölçülmüştür [248]. Aktivatörün molar oranının artırılması ve su-katı oranının düşürülmesinin, statik kayma gerilmesini önemli ölçüde artırdığı ve aktivatör molar oranının 2, aktivatör çözeltisi-bağlayıcı oranının 0,35 olduğu durumda yaklaşık 9000 Pa ve 30 Pa.s değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir. Ayrıca, bağlayıcı miktarının %0,5'ine kadar nano-kil ilavesi, statik kayma gerilmesini daha da artırmıştır.

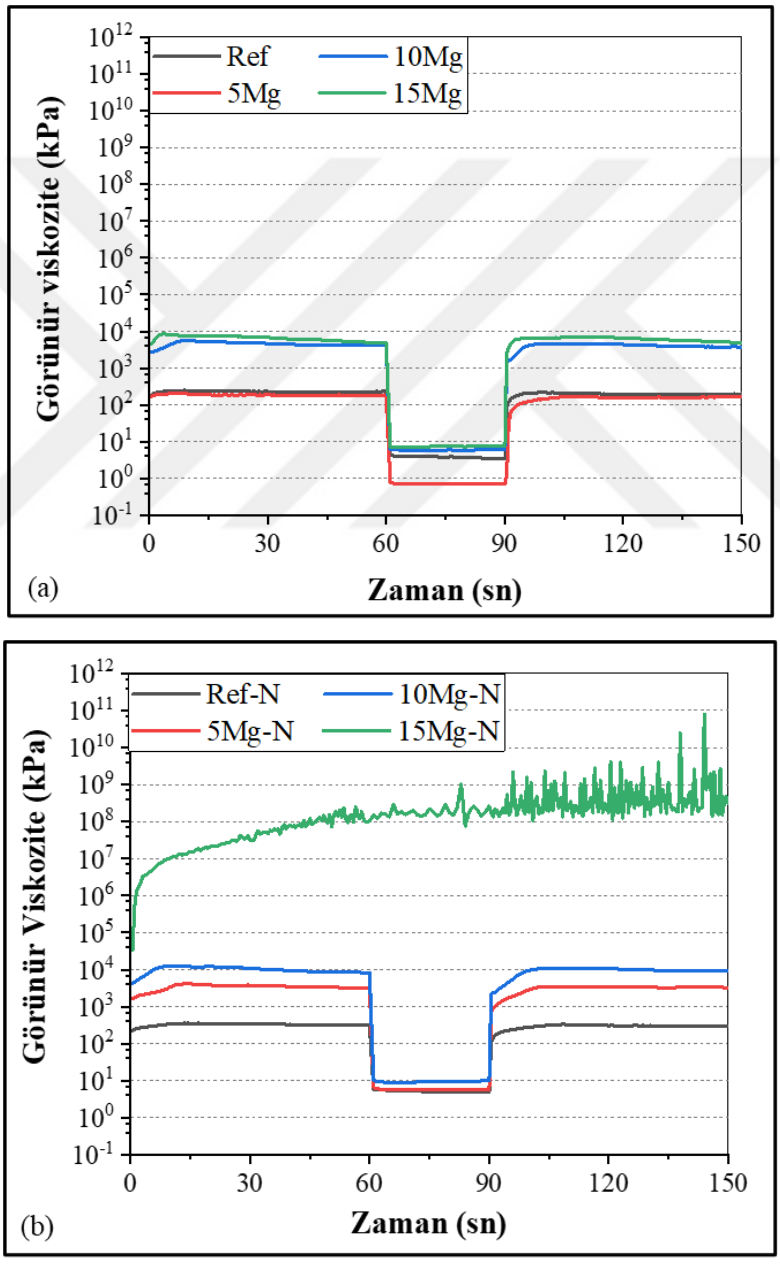
4.3.3 Viskozite Toparlanması

Björn vd., tiksotropik sıvıları; dinlenme durumunda moleküller arası kuvvetler oluşturan ve topaklanma yoluyla viskoziteyi artıran çözeltiler olarak tanımlamaktadır [275]. Akışın sağlanabilmesi için bu kuvvetlerin kırılması amacıyla harici enerji uygulanması gerekir ve bu süreç topaklanmaların homojen olarak dağılması (de-flokülasyon) olarak adlandırılır. Statik kayma gerilmesine eşit veya daha büyük bir gerilme uygulandığında, malzeme akmaya başlar ve sabit bir kayma hızında minimum viskozite seviyesine ulaşır. Karıştırma işlemi durdurulduğunda ise, tiksotropik (şekil koruma yeteneği olan) malzemeler hızla başlangıç viskozitelerini geri kazanır; viskozite artarak dinamik kayma gerilmesinden statik kayma gerilmesine dönüş sağlar. Bu hızlı viskozite toparlanması, çimento esaslı malzemelerin araştırılmasında önemli bir noktasıdır [227,228,258].

Bu çalışmada dinamik ve statik kayma gerilmelerinin yanı sıra, malzeme yapısının tersinir şekilde bozulması ve yeniden oluşumunu ifade eden tiksotropi de incelenmiştir. Şekil 4.5, malzemenin 300 s^{-1}'lik yüksek bir kayma hızında kesildikten sonra viskozitesini toparlanma yeteneğini gösteren viskozite toparlanma testi sonuçlarını sunmaktadır. Bu süreç aşağıda verilen üç aşamayı kapsamaktadır:

1. Yazdırma işlemi öncesi dinlenme evresini temsil eder ve bu aşamada viskozite en yüksek seviyededir.
2. Malzemenin yazdırıldığı ve viskozitenin daha düşük olduğu yazdırma sürecini yansıtır.
3. Malzemenin yerleştirildiği ve viskozitenin tekrar arttığı yazdırma süreci sonrası evreyi işaret eder.

Tek bileşenli jeopolimerlerin kayma incelme özellikleri dikkate alındığında, gözlemlenen viskozite toparlanması, beton yazdırma süreci ile yakından ilişkilidir. Bu durum, her bir karışımın yazdırma işleminden sonra şeklini ne kadar iyi koruyabildiğini gösterir. Teorik olarak, bir malzeme yazdırıldıktan sonra viskozitesini tamamen geri kazanabiliyorsa, deformasyona karşı direnç gösterecektir. Güçlü viskozite toparlanmasına sahip yazdırılabilir karışımlar, uygulanan kayma koşulları altında başlangıçtaki viskozitesinin büyük bir kısmını yeniden kazanır.



Şekil 4.5 NS'siz (a) ve NS'li (b) karışımların viskozite toparlanma grafikleri

Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, 15Mg-N haricindeki tüm karışımlar iyi seviyede viskozite toparlanması göstermiştir. Ancak, 15Mg-N karışımında belirgin bir erken priz başlangıcı nedeniyle anlamlı ölçümler yapılamamıştır. Diğer karışımlar ise yazdırıldıktan sonraki 60 saniye içinde başlangıç viskozitelerinin büyük kısmını geri kazanmıştır. Ref ve 5Mg karışımlarının görünür viskozitesi 102 kPa'nın biraz üzerinde ölçülürken, daha yüksek r-MgO içeriğine sahip 10Mg ve 15Mg karışımlarında viskozite yaklaşık 104 kPa'a yükselmiştir. 2. Aşama (yüksek kayma kuvvetine sahip yazdırma süreci) sırasında tüm karışımların görünür viskozitelerinde önemli bir düşüş gözlenmiştir. Yüksek kayma altında düşük viskozite istenirken, kayma kuvveti kaldırıldığında viskozitenin orijinal seviyesine dönebilme yeteneği de önemlidir. Viskozite, r-MgO içeriğiyle birlikte artmış ve bu sonuçlar yayılma çapı testleriyle tutarlı bulunmuştur (Bölüm 4.1). 3. Aşamada, viskozite tekrar artmış ve NS'siz karışımların tümü güçlü bir toparlanma göstermiştir. Cürufun kısmen r-MgO ile ikamesi, viskozite toparlanmasını etkili bir şekilde artırarak bu karışımları 3B yazıcı uygulamaları için uygun hale getirmiştir.

NS ilavesi, görünür viskoziteyi daha da artırmış ve 15Mg-N haricinde tüm karışımlarda iyi bir toparlanma sağlamıştır. Ref-N, en düşük viskozite değerine sahipken, %5 r-MgO ikamesi önemli bir artışa yol açmıştır. 10Mg-N, 5Mg-N karışımına kıyasla küçük bir viskozite artışı göstermiştir. 1. Aşamada, r-MgO ikamesiyle birlikte görünür viskozite artmış ve en yüksek değer 15Mg-N karışımında gözlenmiştir. 2. Aşamada, NS içeren karışımların viskozite değerleri, NS'siz karışımlara göre (Şekil 4.5(a)) daha yüksek bulunmuştur (Şekil 4.5(b)). Özellikle, NS ilavesi, 15Mg karışımına kıyasla 15Mg-N'nin viskozitesini önemli ölçüde artırmıştır. 1. Aşamada, 15Mg-N'nin viskozitesi diğer tüm karışımlardan belirgin şekilde yüksek değerlere ulaşmıştır. Diğer karışımlardan farklı olarak, sonraki aşamalarda viskozitede bir düşüş gözlenmemiş; bunun yerine artış devam etmiştir. Bu sıra dışı davranışın, NS'nin ince parçacık yapısı ile yüksek r-MgO içeriğinin kombinasyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan, 5Mg-N, 5Mg'ye kıyasla belirgin bir artış gösterirken, 10Mg-N karışımı 10Mg'ye göre yalnızca küçük bir artış sergilemiştir.

Panda vd., nano-kil içeren cüruf/uçucu kül esaslı karışımların viskozite toparlanmasını incelemiştir [248]. Çalışmalarında, hiçbir karışımın başlangıç viskozitesini tamamen toparlanmadığı, ancak nano-kil ilavesinin toparlanmayı

iyileştirdiği belirlenmiştir. Nano-kil ile viskozitenin artması, malzeme içerisindeki topaklanma etkisine atfedilmiştir. [229]. Kruger vd., 3B yazdırılabilir çimento+uçucu kül+silis dumanı esaslı beton karışımlarında %1 ile %3 arasında değişen NS oranlarının reolojik özelliklere etkilerini değerlendirmiştir [276]. Çalışma, NS'nin yeniden topaklanma hızını artırdığını ve en yüksek hızın (%1 NS oranıyla) 8 Pa/s olarak gözlendiğini doğrulamıştır. Ancak, daha yüksek NS dozlarının yeniden topaklanma hızını düşürdüğü ve bu durumun betonun tiksotropik davranışını olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu nedenle, NS, nano-kil ve diğer ince malzemeler gibi katkı maddelerinin, 3B yazdırılabilir karışımların tiksotropik özelliklerini geliştirebileceği sonucuna varılmıştır. Ancak, bu tür ince malzemelerin doğru dozajı, optimum performansa ulaşmak için kritik bir rol oynamaktadır.

4.4 3B Yazdırılmış Hamur Karışımlarının Yazdırılabilirliği ve Üretilebilirliği

4.4.1 Yazdırılabilirlik (Printability)

Yazdırma kalitesi, yazdırılan bir katmanın yüzey kalitesini ve boyutsal doğruluğunu ifade eder ve iki ana parametre ile değerlendirilir:

1. Yazdırılan katman, rijitlik veya kohezyon eksikliğinden kaynaklanan süreksizlikler gibi yüzey kusurlarından arınmış olmalıdır.
2. Genişlikteki boyutsal tutarlılık korunmalıdır.

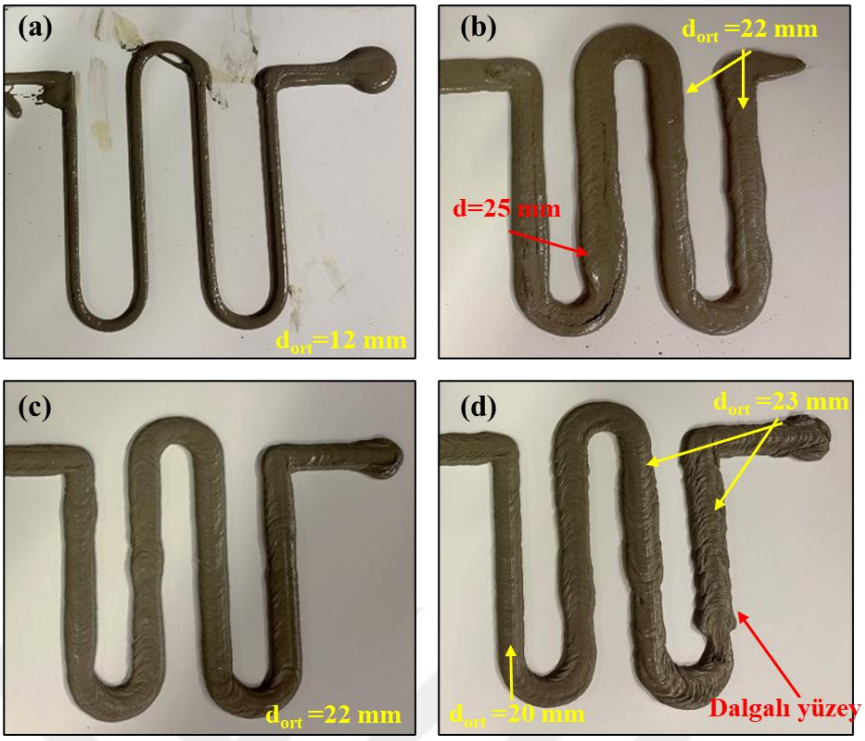
NS'siz ve NS'li karışımların yazdırılabilirlik test sonuçları Şekil 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. Sekiz farklı hamur karışımı, yazdırılabilirlik performansını değerlendirmek amacıyla sabit koşullar altında yazdırılmıştır. Yazdırılabilirlik testinde yazdırma hızı 50 mm/s olarak belirlenmiş ve geliştirilen tek-bileşenli AAM'nin 3B yazıcı uygulamaları için uygunluğunu göstermek amacıyla 40 cm uzunluğunda 2 adet U şekli yazdırılmıştır (Şekil 4.6 ve 4.7).

Ref karışımı, kesintisiz olarak 40 cm uzunluğunda yazdırılmış ve ortalama kesit genişliği, çapı 12 mm olan püskürtme ucu çapıyla eşleşmiştir. Bu karışım, yüksek akışkanlık sergileyerek yazdırma için ek basınç gerektirmemiş ve yüzey kusuru veya süreksizlik göstermemiştir. r-MgO ikamesi yazdırılabilirliği artırarak daha geniş ve tutarlı kesitler elde edilmesini sağlamıştır. Ancak, 5Mg karışımının

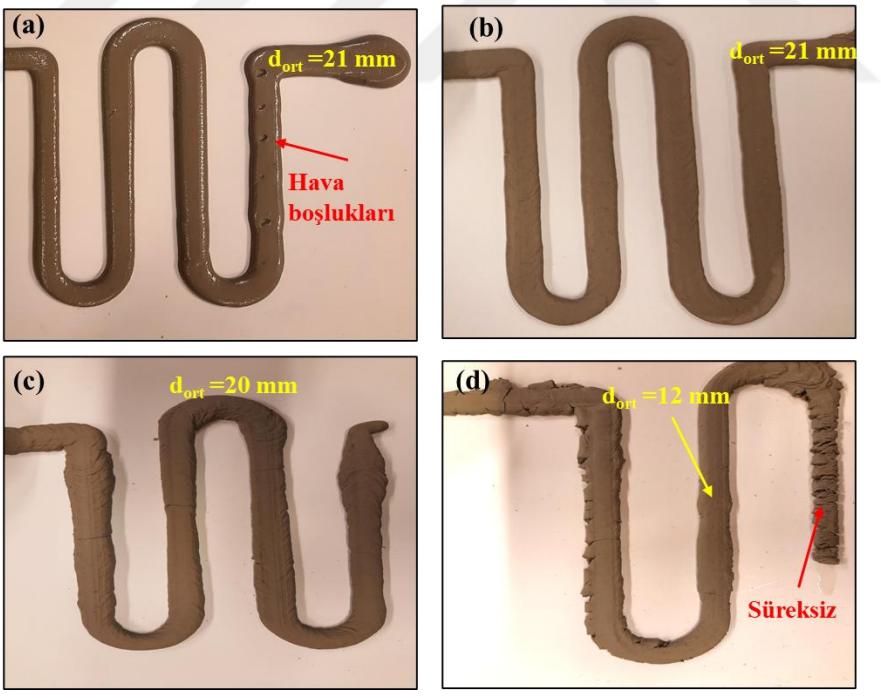
yazdırılan kesit genişliği, yüksek akışkanlık ve düşük kohezyon nedeniyle şekil koruma yeteneği açısından yetersiz kalmıştır. r-MgO içeriğinin %10'a çıkarılması, yazdırılabilirliği iyileştirerek daha homojen kesitler elde edilmesini sağlamış ve ortalama yazdırılan kesit genişliği 22 mm olarak ölçülmüştür. Öte yandan, 15Mg karışımı, 10Mg karışımıyla benzer bir davranış sergilemiş ancak robotik kolun yüksek yazdırma hızı nedeniyle dalgalı bir yüzey oluşmuş ve bu durum yüzey kalitesinin düşmesine neden olmuştur. Ref ve 5Mg karışımları için dinamik kayma gerilmeleri sırasıyla 128.2 Pa ve 433.7 Pa olarak ölçülmüşken, 10Mg ve 15Mg karışımları için bu değerler sırasıyla 1172.2 Pa ve 2321.2 Pa olmuştur. Bu nedenle, kayma gerilmesi ve yazdırılabilirlik arasındaki ilişki göz önünde bulundurulduğunda, optimum yazdırılabilirlik için minimum kayma gerilmesinin yaklaşık 1100 Pa olduğu çıkarılabilir. Daha düşük kayma gerilmesi, malzemenin kendi kendine yayılmasına neden olabilir. NS'siz karışımların performansına bakıldığında, 10Mg karışımı yazdırma için en iyi seçenek olarak öne çıkmıştır.

NS, Ref, 5Mg ve 10Mg karışımlarının yazdırılabilirliğini daha da iyileştirmiştir. Ref-N karışımının yazdırılan genişliği 21 mm'ye ulaşmış ve yazdırılan kesitte süreksizlik veya tutarsızlık gözlenmemiştir. Ancak yüzeyde bazı hava boşlukları görülmüştür. NS'nin NS'siz karışımlara eklenmesi, yazdırılabilirliği önemli ölçüde iyileştirmiştir; hem 5Mg-N hem de 10Mg-N karışımları daha homojen yazdırma sonuçları sergilemiştir. Ancak, 15Mg-N karışımı, aşırı erken priz nedeniyle yüzey süreksizlikleri ve boşluklar gibi yazdırma kalitesi sorunları yaşamıştır (Şekil 4.6(d)). Genel olarak, yazdırılabilirlik testleri sonuçları, hamurun maksimum dinamik kayma gerilmesi ile bir korelasyon olduğunu göstermekte ve başarılı yazdırma için gereken koşulları ortaya koymaktadır. Bölüm 3.3'te belirtildiği gibi, 15Mg-N'nin dinamik kayma gerilmesi 3570.2 Pa olarak ölçülmüş ve bu değer yazdırılabilirlik testinde boşluklar ve süreksizlikler gibi yüzey kusurlarına yol açmıştır. Bu nedenle, dinamik kayma gerilmesi bu değere yakın veya daha yüksek olan karışımların yazdırma sırasında püskürtme ucunu tıkayabileceği sonucuna varılmaktadır.

Yazdırılan 10Mg, 15Mg, Ref-N, 5Mg-N ve 10Mg-N karışımları, iyi yazdırma kalitesi ve uygun yazdırma performansı sergilemiştir. Yazdırılan filamentler arasında belirgin bir çatlak gözlenmemiş ve yazdırma süreci sırasında büyük deformasyonlar meydana gelmemiştir.



Şekil 4.6 (a) Ref, (b) 5Mg, (c) 10Mg ve (d) 15Mg karışımlarının yazdırılabilirlik sonuçları



Şekil 4.7 (a) Ref-N, (b) 5Mg-N, (c) 10Mg-N ve (d) 15Mg-N karışımlarının yazdırılabilirlik sonuçları

Long vd., 3B yazıcı için modifiye edilmiş kireç taşı ve kalsine kil esaslı çimento karışımlarının geliştirilmesini incelemişlerdir [234]. Çalışmalarında, OPC, kireç

taşı tozu, kalsine kil ve silis dumanı içeren bir karışımın yüksek dinamik kayma gerilmesi değerleri gösterdiğini ve 10 dakikalık dinlenme süresinin ardından bu değerin 2040,2 Pa'ya ulaştığını belirlemişlerdir Yazarlar, bu değerin başarılı bir yazdırma için üst sınır olduğunu, çünkü yazdırılabilirlik testi sırasında boşluklar ve süreksizlikler gibi yüzey kusurlarının gözlemlendiğini belirtmişlerdir.

Pasupathy ve ark., 3B yazıcı ile yazdırılabilir cüruf/uçucu kül esaslı karışımların geliştirilmesinde bağlayıcı olarak tuğla atığı tozunun kullanımını araştırmışlardır [245]. Çalışmada, tuğla atığı uçucu külün kısmi ikamesi olarak kullanılmış ve yüksek ikame oranıyla 20 katmanın kesintisiz ve süreksizlik olmaksızın yazdırılabildiği sonucuna varmışlardır.

Peng ve Unluer, MgO-SiO_2 çimento hamurlarında mikro-silika ve metakaolin kullanılarak yazdırılabilirliği incelemişlerdir. Çalışmalarında, metakaolin ikame oranının yazdırılabilirlik üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve %5'lik bir ikame oranının optimum oran olarak belirlendiğini bulmuşlardır [277].

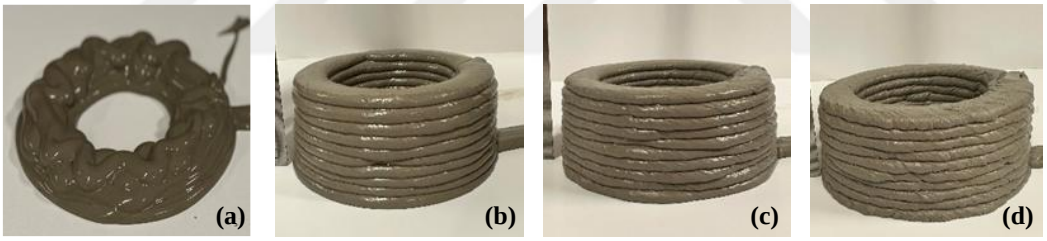
4.4.2 Üretilebilirlik (Buildability)

3B yazıcı süreçlerinde malzeme hasarı ve stabilite kaybı literatürde yaygın olarak bildirilmiştir [278,279]. Aynı uzunluk ve yazdırma ayarlarına sahip yapılar arasında, lineer yapıların eğrisel duvarlara göre daha başarısız olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, eğriliğin yapı stabilitesini artırmasıdır [280]. Bu çalışmada, yapısal hasar riskini azaltmak ve malzeme performansını iyileştirmek amacıyla 10 cm çapında, 10 katmandan oluşan bir silindir tasarlanmıştır. Yazdırılan numunelerin üretilebilirlik test sonuçları Şekil 4.8 ve 4.9'da sunulmaktadır. Test, üretimden 10 dakika sonra gerçekleştirilmiştir.

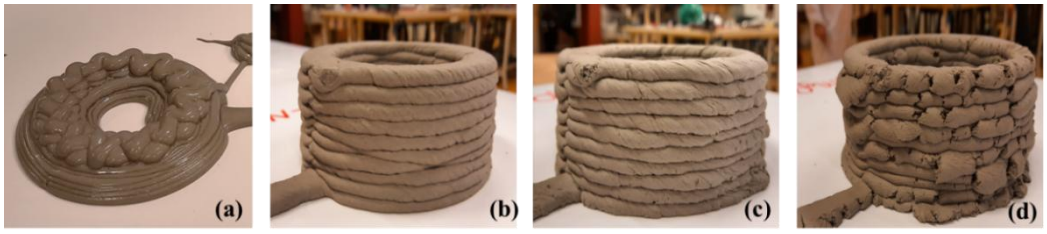
Ref karışımı, şekil kaybına uğrayarak testi tamamen geçememiştir. %5 r-MgO ikamesi yapı kabiliyetini iyileştirmiş, ancak yüksek akışkanlık ve düşük kohezyon nedeniyle katman kalınlığı yetersiz kalmış ve katmanlar düzensiz olmuştur. r-MgO içeriğinin artırılması, daha tutarlı katman kalınlıkları sağlamıştır. 15Mg karışımında "V" şeklindeki izler estetik bir sorun olarak gözlemlenmiş ancak yapısal bir problem teşkil etmemiştir. Nano-silika (NS) eklenmesi, Ref karışımının yapı kabiliyetini bir miktar artırarak Ref-N karışımının birkaç katmanının oluşmasına olanak sağlamış, ancak sonraki katmanlar çökme göstermiştir. NS'li karışımlar arasında, 5Mg-N karışımı, 5Mg'ye kıyasla daha düzgün ve kalın katmanlar

üretmiştir. 10Mg-N karışımı ise 10Mg'ye kıyasla daha fazla rijitlik sergileyerek daha başarılı bir üretim sağlamıştır. Silindir numunelerin toplam yükseklikleri sırasıyla 5Mg, 10Mg ve 15Mg karışımları için 46,1 mm, 49,4 mm ve 50,2 mm olarak ölçülmüştür. 5Mg-N, 10Mg-N ve 15Mg-N karışımları için ise yükseklikler sırasıyla 49,9 mm, 50,0 mm ve 49,2 mm olarak kaydedilmiştir.

Genel olarak, 3B yazıcı süreçlerinde üretilebilirliğin artırılması için statik kayma gerilmesinin iyileştirilmesi temel bir gerekliliktir [227]. Bu çalışmada, r-MgO ve nano-silika ikamesinin statik kayma gerilmesini artırdığı ve bunun karışımların üretilebilirliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. 5Mg karışımına nano silika ilave edilmesi ile statik kayma gerilmesi değeri 1072,6 Pa değerinden (5Mg) 1564,7 Pa'ya (5Mg-N) yükselmiştir. Benzer şekilde, 10Mg karışımında da bu değer 1740,8 Pa'dan (10Mg) 2005,6 Pa'ya (10Mg-N) çıkmıştır. Ancak, 15Mg-N karışımı homojen bir şekilde yazdırılamamış; hızlı priz nedeniyle yüksek boşluk oranı oluşmuştur. 15Mg-N'nin kesintili yazdırılması, kısa işlenebilirlik süresi ve yüksek kayma gerilmesi değerleriyle ilişkilendirilmiştir (Şekil 4.2 ve 4.4(c)).



Şekil 4.8 (a) Ref, (b) 5Mg, (c) 10Mg ve (d) 15Mg karışımlarının üretilebilirlik sonuçları



Şekil 4.9 (a) Ref-N, (b) 5Mg-N, (c) 10Mg-N ve (d) 15Mg-N karışımlarının üretilebilirlik sonuçları

Panda ve ark., %0,5 nano-kil ilavesinin, püskürtme ucu ile yazdırılan katman arasındaki mesafede belirgin bir artış olmaksızın, jeopolimer karışımların üretilebilirliklerini iyileştirdiğini bildirmiştir [248]. Long ve ark., kalsine kil ve

kireç taşı tozu oranının artırılmasıyla üretilebilirliklerinin iyileştiğini ve üretilebilirlik testinde katmanların düzgünlüğünün arttığını belirtmiştir [234]. Chougan ve ark., nano-grafit plakalarının 3B yazıcıyla üretilen cüruf-uçucu kül-silis dumanı karışımlarının yapı kabiliyetini artırdığını rapor etmiştir [281]. Cho ve ark., tarafından yapılan başka bir çalışmada, %2 nano-silika ilavesinin karışımların reolojik ve yapısal özelliklerini iyileştirdiği ve böylece hafif köpüklü üretilebilirliklerini artırdığı bulunmuştur [282].

4.5 Mekanik Özellikler

4.5.1 Basınç Dayanımı

10Mg, 10Mg-N, 15Mg ve 15Mg-N karışımlarının basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Üç farklı yöndeki (boyuna x-ekseni, yanal y-ekseni ve dikey z-ekseni) basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.10'da sunulmuştur. 3B yazdırılmış numunelerin (Şekil 4.10(a)) yanı sıra, geleneksel kalıpla döküm yöntemiyle üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımı sonuçları da verilmiştir (Şekil 4.10(b)). Tüm 3B yazdırılan karışımlar arasında, 15Mg-N karışımı z-ekseni boyunca 21,8 MPa'ya ulaşarak en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. r-MgO içeriğinin artırılması, hem NS'siz hem de NS'li karışımlarda tüm yazdırma yönlerinde basınç dayanımını genel olarak artırmıştır. Bu durum, literatürdeki yapılan çalışamalr incelendiğinde r-MgO kullanımının alkalilerle aktive edilmiş malzemelerde (AAM) aktivasyon sürecini hızlandırdığı, daha fazla aktivasyon ürünü oluşmasını sağladığı ve Si-O ile Al-O bağlarını kırarak hidrotalsit oluşumunu teşvik ettiği belirtilmiştir [242], [249]. Yapılan diğer çalışmalarda, r-MgO'nun, AAM sistemlerinde MgO'nun alüminosilikat esaslı bağlayıcılardan çözünen iyonlarla etkileşime girerek hidrotalsit veya magnezyum silikat hidrat (M-S-H) jeli oluşturmasına dayandığı belirtilmiştir [249], [283]. %15 r-MgO içeren karışımlarda gözlemlenen artan basınç dayanımı, hidrasyonu hızlandırarak hidrotalsit gibi dayanımı artıran fazların oluşumunu teşvik etmesine bağlanmıştır. [239,240]

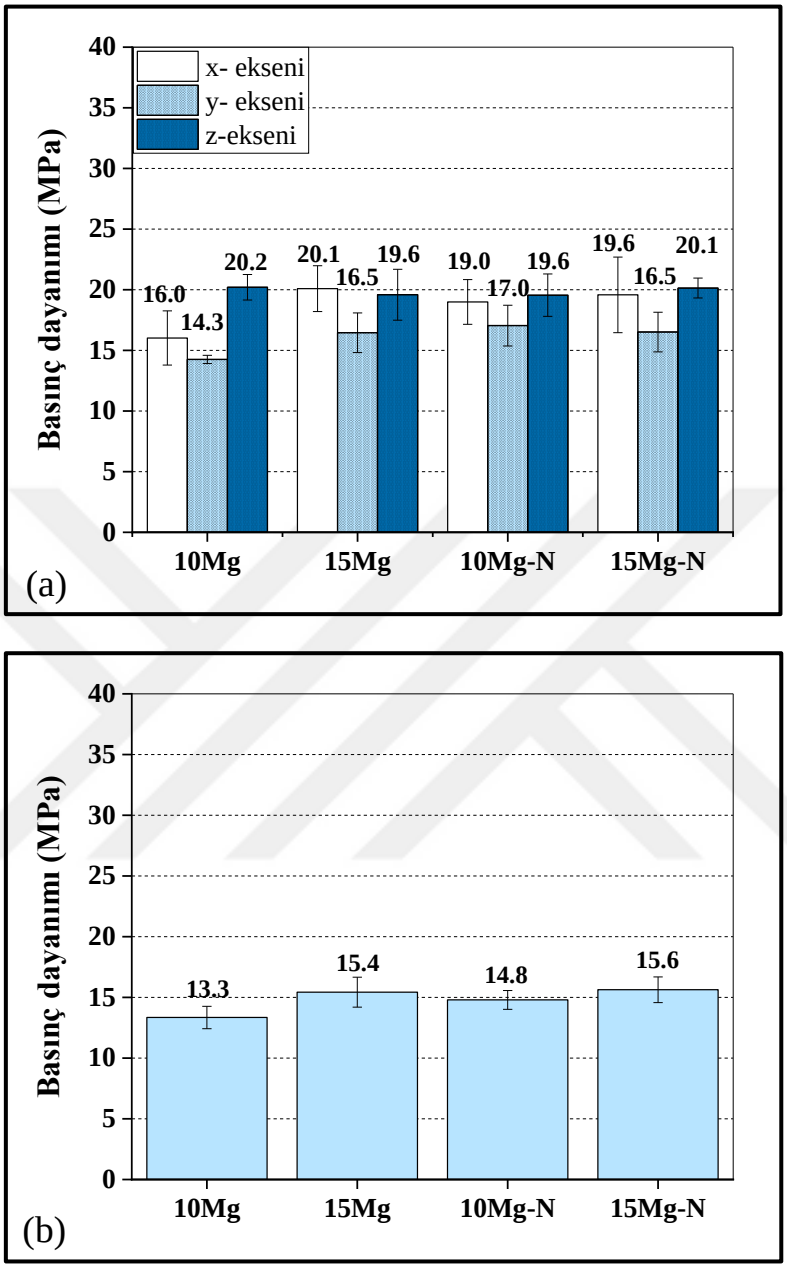
NS ilavesinin, hem 3B yazdırılan hem de geleneksel kalıplarla üretilen numunelerin basınç dayanımı üzerinde etkisi sınırlı olmuş ve basınç dayanımı değerleri az miktarda arttırmıştır. Tüm karışımlarda yükleme yönüne bağlı olarak küçük farklılıklar gözlemlenmiştir. Ancak, en belirgin farklılıklar 10Mg karışımında görülmüştür; bu karışımda basınç dayanımı, yükleme yönüne bağlı olarak önemli

ölçüde değişmiştir. Özellikle, x-ekseni boyunca 16,0 MPa, y-ekseni boyunca 14,3 MPa ve z-ekseni boyunca 20,2 MPa basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Tüm karışımlar için en düşük değerler y-ekseni (yanal yön) boyunca gözlemlenirken, en yüksek değerler dikey (z-ekseni) veya boyuna (x-ekseni) yükleme yönlerinde elde edilmiştir. 3B yazdırılmış numunelerdeki anizotropi, katman-katman yazdırma işlemi sırasında zayıf bir ara katman arayüzü oluşturduğu ve bu da mekanik anizotropiye yol açtığı önceki çalışmalarda belgelenmiştir [245,258,284,285].

Önceki çalışmalar 3B yazdırılan jeopolimerlerin boyuna yöndeki basınç dayanımının, yanal ve dikey yöndeki yüklemelere kıyasla yaklaşık %23'e kadar daha yüksek dayanım değerleri gösterdiğini rapor edilmiştir [235,286,287]. Pasupathy vd., 3B yazdırılan numunelerde en yüksek basınç dayanımının boyuna yönde, en düşük basınç dayanımının ise yanal yönde meydana geldiğini tespit etmiş ve bu eğilim diğer çalışmalarda da doğrulanmıştır [245,288,289]. Boyuna yöndeki daha yüksek dayanım, yazdırma sırasında ekstrüzyon basıncının neden olduğu sıkışmaya bağlanırken, yanal yöndeki daha düşük dayanım ise katmanlar arası yazdırma işlemi sırasındaki zayıf aderans oluşumu ve artan gözeneklilik veya boşluklarla ilişkilendirilmiştir [235,290,291].

Bu çalışmada, 3B yazıcı ile yazdırılmış tüm numunelerin basınç dayanımı, geleneksel kalıpla döküm yöntemiyle üretilen numunelerden daha yüksek bulunmuştur. Yükleme yönüne bağlı olarak farklar değişkenlik göstermiştir. Yanal yönde yüklemede, 3B yazdırılmış numunelerin basınç dayanımı, kalıpla döküm numunelerine kıyasla yaklaşık %7–10 oranında artmıştır. Ancak, dikey (z-ekseni) yöndeki yüklemede fark daha belirgin gözlemlenmiştir. Özellikle 10Mg karışımlarında, 3B yazdırılmış numunelerin basınç dayanımı %50'ye kadar artış göstermiştir. Kalıpla döküm numuneler arasında en düşük basınç dayanımı, 10Mg karışımında (13,3 MPa) gözlemlenmiş ve bu değer, tüm yükleme yönlerinde 3B yazıcı ile yazdırılan numunelerden daha düşük kalmıştır (16,0 MPa, 14,3 MPa ve 20,2 MPa). r-MgO içeriğinin %10'dan %15'e artırılması ve NS eklenmesi, kalıplara döküm yapılan numuneler için basınç dayanımında hafif artışlara neden olmuş ve en yüksek değer 15Mg-N karışımında kaydedilmiştir (15.6 MPa, Şekil 4.10(b)'de gösterildiği gibi). 3B yazdırılmış numunelerde görülen artırılmış basınç dayanımı, yazdırma sırasında uygulanan yazdırma basıncına bağlı olduğu düşünülmektedir.

Bu basıncın, malzemenin daha iyi sıkışmasını ve katmanlar arasında güçlü bağlar oluşmasını destekleyeceğinden, mekanik dayanımın arttığı düşünülmektedir.



Şekil 4.10 (a) 3B yazıcı ve (b) geleneksel kalıp döküm karışımlarının basınç dayanımı sonuçları

Literatürde gözlemlenen sonuçların aksine bulunan çalışmalar da mevcuttur. Bong vd. ile Chougan vd. 'nin yapmış oldukları çalışmalarda, 3B yazıcı ile üretilen karışımlarda, katmanlar arasındaki artan gözeneklilik ve zayıf aderans nedeniyle geleneksel yöntem olan kalıpla döküm yapılan jeopolimer karışımların basınç dayanımının, 3B yazdırılan jeopolimer karışımlarından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [235,281].

Sikora vd., ağırlıkça %2 ila %6 arasında değişen oranlarda SN eklemesinin, 3B yazıcılarla üretilen çimento esaslı harçların sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. %2 nano-silika kullanımının optimum dozaj olduğunu ve basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığını, ancak daha yüksek dozajlarda dayanımın kademeli olarak azaldığını rapor etmişlerdir [252]. Ayrıca, 3B yazdırılan numunelerin, döküm numunelere kıyasla %8 ila %14 daha düşük dayanım değerleri gösterdiği belirtilmiştir. Cho vd. ise yapmış oldukları çalışmada, 3B yazdırma için tasarlanmış hafif köpük betonun özellikleri üzerinde NS etkisini araştırmışlar ve %2 oranında NS ilavesinin, karışımların basınç dayanımını önemli ölçüde artırabileceğini tespit etmişlerdir [282].

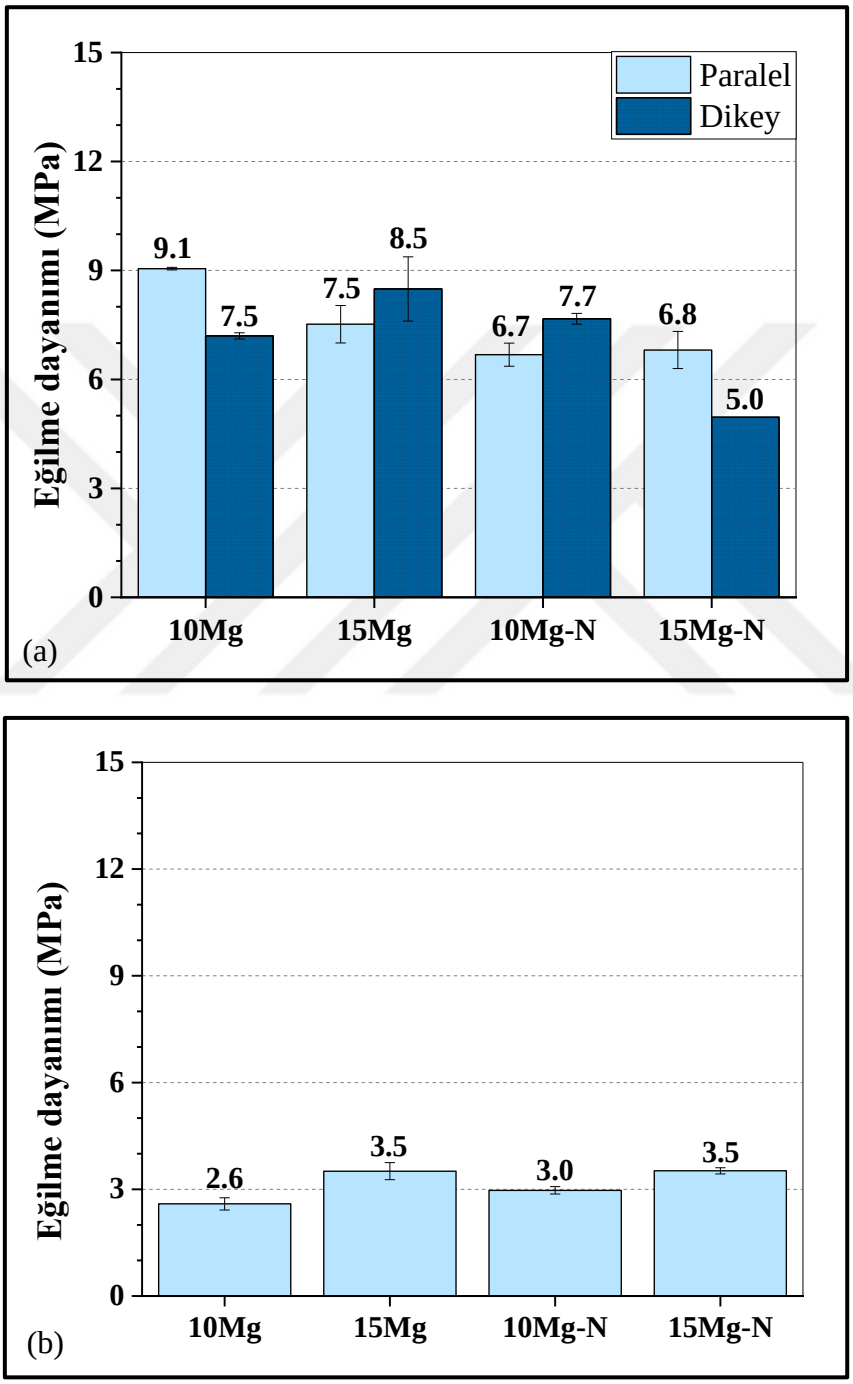
4.5.2 Eğilme Dayanımı

3B yazıcı ile yazdırılan ve geleneksel kalıpla döküm yapılan numunelerin eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.11 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. 3B yazdırılmış numunelerin dayanımı, yazdırma yönüne paralel ve dik olacak şekilde ölçülmüştür. Testler, 10Mg, 15Mg, 10Mg-N ve 15Mg-N karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, 10Mg karışımının, yazdırma yönüne paralel yükleme durumunda 9,1 MPa ile en yüksek eğilme dayanımını gösterdiğini ortaya koymuştur. Aynı karışım için dik yükleme yapıldığında dayanım 7,5 MPa'ya düşmüştür (Şekil 4.11 (a)). 15Mg karışımında, paralel yükleme durumunda bir miktar dayanım azalması gözlemlenirken, dik yüklemede 10Mg karışımına kıyasla daha yüksek bir eğilme dayanımı sağlamıştır.

NS ilavesi, paralel yükleme durumunda 10Mg karışımının dayanımını 9,1 MPa'dan 6,7 MPa'ya düşürmüştür. Ancak, dik yükleme durumunda benzer dayanım değerleri korunmuştur. Buna karşın, 15Mg-N karışımı, özellikle dik yükleme durumunda, 15Mg karışımına göre daha düşük dayanım değerleri sergilemiştir. Bu azalmanın, 15Mg-N karışımında artan sertleşme ve katmanlı yüzeyler boyunca oluşan süreksizliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.12).

Kalıpla döküm numuneler için elde edilen sonuçlar, 3B yazdırılmış numunelerle kıyaslandığında daha düşük bulunmuştur. 10Mg ve 15Mg karışımları sırasıyla 2,6 MPa ve 3,5 MPa eğilme dayanımı göstermiştir. r-MgO içeriğindeki artış, dayanımda iyileştirmelerle ilişkilendirilmiştir. NS'li karışımlarda ise 10Mg-N ve 15Mg-N karışımları için sırasıyla 3,0 MPa ve 3,5 MPa dayanım değerleri elde

edilmiştir. Genel olarak, hem r-MgO hem de nano-silikanın, kalıpla döküm karışımlarının eğilme dayanımını artırdığı sonucuna varılabilir. 3B yazdırılmış numunelerde gözlemlenen daha yüksek dayanım, yazdırma sırasında uygulanan ekstrüzyon basıncıyla elde edilen sıkışma ile ilişkilendirilmiş ve bu durum, basınç dayanımındaki artışlarla benzer şekilde eğilim göstermiştir.

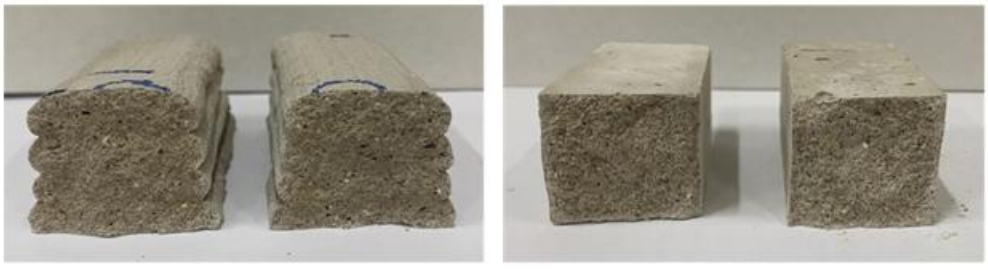


Şekil 4.11 (a) 3B yazıcı, (b) geleneksel kalıp döküm karışımlarının eğilme dyanımı sonuçları

Eğilme testi sonrasında, 3B yazıcı ile yazdırılmış ve geleneksel kalıpla döküm yapılmış numunelerin kesitleri görsel olarak incelenmiş ve gözenek boyutları ile dağılımları değerlendirilmiştir (Şekil 4.13). 10Mg serisine ait 3B yazdırılmış numuneler, geleneksel kalıpla döküm yapılan numunelere kıyasla daha yoğun ve boşluksuz bir yapı sergilemiştir. Benzer bulgular, Demiral ve ark. tarafından da yapılan bir çalışmada, 3B yazıcı ile yazdırılmış numunelerin geleneksel kalıpla döküm yapılan numunelere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği belirtilmiştir [292]. Bu dayanım artışı, inşaat ve yıkım atıkları esaslı jeopolimerlerde, malzemenin kil benzeri yapısından kaynaklanan yapışkan özellikler ve iyileştirilmiş sıkışma ile ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.12 Eğilme dayanımı testinden sonra 3B numunelerin kırılma görüntüleri



Şekil 4.13 a) 3B yazıcı ile üretilen 10Mg serisinin eğilme dayanımı testi sonrası kesit görüntüleri (b) Geleneksel kalıp döküm yapılan10 Mg serisinin eğilme dayanımı testi sonrası kesit görüntüleri

Literatürdeki bir diğer çalışmada, tek-bileşen yöntemiyle üretilen cüruf esaslı sodyum silikat ile aktive edilmiş jeopolimerlerin, 3B yazıcı ile üretilen numunelerinde, geleneksel kalıp döküm numunelere kıyasla tüm yönlerde daha düşük eğilme dayanımına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu azalmanın, baskı süreci sırasında eklenen hava boşlukları ve alt katmanlar arasındaki zayıf aderansa

bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [263]. Panda ve ark. 3B yazıcı jeopolimer karışımlarının eğilme dayanımının, %1'e kadar kullanılan cam elyafı ile artırılabileceğini belirtmiş ayrıca anizotropinin, 3B yazıcıdaki katmanlı üretim sürecine bağlı olarak doğal bir özellik olduğunu ifade etmişlerdir [293]. Assaedi vd., nano-kil ilavesinin jeopolimer karışımlarının eğilme dayanımını artırdığını ve %0-3 arasında kullanılan nano-kilin mikro yapıyı yoğunlaştırıcı etkisiyle bu iyileşmenin sağlandığını belirtmişlerdir [294].

4.6 3B Yazıcı ile Üretilebilen Karışımların CO2 Emisyonları ve Enerji Tüketimlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında, 3B yazıcı teknolojisine uygun, yeterli basınç dayanımı sağlayan ve ideal reolojik ve 3B yazıcı teknolojisi açısından üretime elverişli özelliklere sahip tek bileşenli sodyum karbonat ile aktive edilmiş reaktif MgO ve cüruf esaslı hamur ve harç karışımları geliştirilmiştir. Söz konusu karışımların çevresel etkilerini değerlendirmek amacıyla, 1 m^3 harç başına düşen gömülü karbon (CO_2) emisyonları ve enerji tüketimi hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, 3B yazıcıya uygun sıradan Portland çimentosu (OPC) esaslı karışımlarla karşılaştırılmıştır. Referans olarak seçilen OPC esaslı karışımlar, literatürde Rahul ve ark. tarafından önerilen OPC-1 (%80 OPC + %20 uçucu kül) ve OPC-2 (%50 OPC + %50 cüruf) karışımları olup, çalışma kapsamında üretilen serilerden 10Mg ve 10Mg-N ile karşılaştırılabilir statik kayma gerilmesi (~1600 Pa) sunmaktadır [295].

Tablo 4.2'de, kullanılan hammaddelerin üretimi sırasında ortaya çıkan karbon emisyonları ile gömülü enerji tüketimi verileri, literatürde yer alan ilgili çalışmalar esas alınarak derlenmiştir [296-300]. Ayrıca, toplam CO_2 emisyonları ve metreküp başına enerji tüketimi değerleri Tablo 4.3'te özetlenmiştir. Karışımların bileşenlerine ait gömülü karbon emisyonlarının kullanılan istatistiksel yöntemlere bağlı olarak değişkenlik gösterebileceği göz önünde bulundurularak, hesaplanan değerlerin mutlak bir nicel belirleme yerine, karşılaştırmalı bir değerlendirme amacı taşıdığına dikkat edilmelidir.

Şekil 4.14'te sunulan sonuçlara göre, tek bileşenli sodyum karbonat ile aktive edilmiş reaktif MgO ve cüruf esaslı karışımlar, OPC esaslı karışımlara göre CO_2 emisyonlarında %76'ya varan azalma ve enerji tüketiminde %31'e varan düşüş

sağlamıştır. En düşük CO_2 emisyonu 132,7 kg.CO_2/m³ ile 10Mg serisinde elde edilmiştir. Cüruf yerine reaktif MgO (r-MgO) kullanımı emisyon miktarını artırmış ve r-MgO oranının yükselmesi karbon ayak izinde belirgin bir artışa neden olmuştur. Benzer şekilde, nano-silika ilavesi de CO_2 emisyonlarında artışa yol açmıştır. Bileşen bazında değerlendirildiğinde, sodyum karbonat CO_2 emisyonlarına en düşük katkıyı sağlarken, en yüksek etkiyi r-MgO göstermiştir. Bunu sırasıyla cüruf ve nano-silika takip etmiştir.

Diğer yandan, OPC esaslı karışımlarda CO_2 emisyonları, OPC-1 için 376 kg.CO_2/m³ ve OPC-2 için 555,5 kg.CO_2/m³ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, tek bileşen yöntemi kullanılarak üretilen sodyum karbonat ile aktive edilmiş reaktif MgO ve cüruf esaslı karışımlar ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek emisyon seviyelerini göstermektedir. Gömülü enerji tüketimi açısından da benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. 10Mg karışımı 2178 MJ/m³ ile en düşük enerji tüketimini sergilemiştir. Öte yandan 15Mg-N karışımı 2436,6 MJ/m³ ile en yüksek enerji ihtiyacını ortaya koymuştur. 15Mg-N karışımının enerji tüketimi, OPC-1'e kıyasla az miktarda bir düşüş göstermiştir. OPC-2 en yüksek enerji tüketimi (3173,6 MJ/m³) ile dikkat çekmiştir. Üretilen karışımlar içerisinde enerji tüketimine en büyük etkiyi sırasıyla cüruf ve r-MgO sağlarken, bunu sodyum karbonat ve nano-silika takip etmiştir (Şekil 4.14b). OPC esaslı karışımlarda ise enerji tüketiminin en büyük bölümünü çimento oluşturmaktadır.

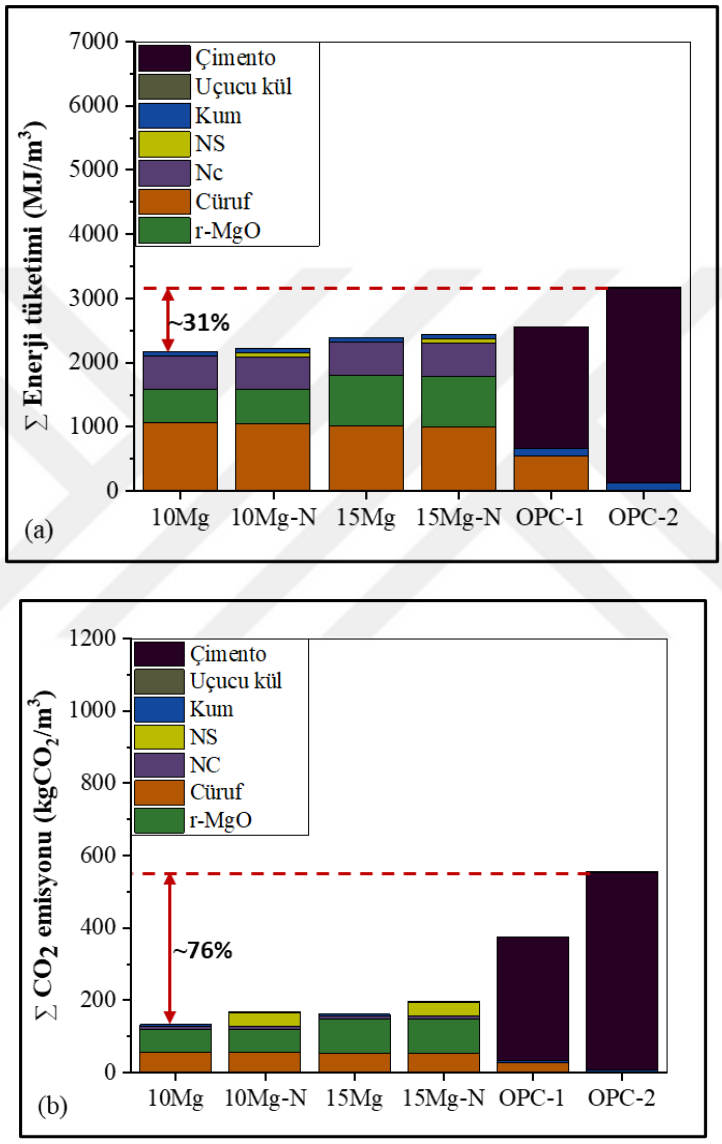
Sonuç olarak, geliştirilen tek bileşen yöntemi kullanılarak üretilen bu karışımlar, OPC esaslı karışımlarla kıyaslandığında, karşılaştırılabilir reolojik özelliklerini korurken CO_2 emisyonlarını önemli ölçüde azaltmakta ve daha düşük enerji tüketimi ile daha sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır.

Tablo 4.2 Malzemelerin tipik CO_2 emisyonları ve gömülü enerji değerleri

Malzemeler	CO_2 emisyonu (kg/kg)	Gömülü enerji (MJ/kg)
Cüruf	0,07 [102]	1,33 [300]
Çimento	0,83 [102]	4,6 [300]
Uçucu Kül	0,01 [102]	0,1 [300]
r-MgO	0,71 [103]	5,9 [297]
NS	4,091 [104]	7,136 [299]
NC	0,111 [105]	5,8 [298]
Kum	0,005 [102]	0,1 [300]

Tablo 4.3 1 m3 harç karışımları için CO_2 emisyonları ve enerji tüketim değerleri

Karışımlar	∑CO_2 (kg/m^3)	∑Enerji tüketimi (MJ/m^3)
10Mg	132,7	2178,0
15Mg	161,6	2387,4
10Mg-N	168,3	2227,3
15Mg-N	197,3	2436,6
OPC-1	376,0	2558,1
OPC-2	555,5	3173,6



Şekil 4.14 (a) 3B yazdırılabilir tek bileşen yöntemiyle üretilmiş sodium karbonatla aktive edilen r-MgO cüruf esaslı karışımların ve çimento esaslı karışımların toplam CO2 emisyonu (b) 3B yazdırılabilir tek bileşen yöntemiyle üretilmiş sodium karbonatla aktive edilen r-MgO cüruf esaslı karışımların ve çimento esaslı karışımların toplam enerji tüketimi

Panda ve ark., 3B yazıcıya uygun potasyum silikat ve potasyum hidroksit ile aktive edilen, cüruf ve uçucu kül esaslı jeopolimer karışımlarının karbondioksit (CO_2) emisyonlarını incelemiştir [261]. Yapılan çalışmada, jeopolimer karışımların, Portland çimentosu (OPC) esaslı referans örneğe kıyasla %78 oranında daha düşük CO_2 emisyonuna sahip olduğu belirlenmiştir. Pasupathy ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir diğer araştırmada, düşük kalsiyum içeriğine sahip uçucu kül ve öğütülmüş tuğla atığından oluşan, sodyum metasilikat ile aktive edilmiş cüruf esaslı jeopolimer karışımlarının karbon emisyonu ve enerji tüketiminde belirgin azalmalar sağladığı rapor edilmiştir [248].

Bong ve ark. tarafından yürütülen çalışmada ise, cüruf ve uçucu kül esaslı, susuz sodyum metasilikat tozu ve belirli kaliteye sahip sodyum silikat tozu ile aktive edilen, 3B baskıya uygun jeopolimer karışımların gömülü karbon değerleri sırasıyla 0.114 kg/L ve 1.634 MJ/L olarak belirlenmiştir [240]. Bu değerlerin, çimento esaslı malzemeler ile kıyaslandığında sırasıyla %61 ve %14 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Luukkonen ve ark. ise, çeşitli araştırmaları derleyerek, tek bileşenli jeopolimerlerin OPC'ye kıyasla ortalama %24 daha düşük çevresel etkiye sahip olduğunu; çift bileşenli jeopolimerlerin ise çevresel etkiyi %40 oranında azalttığını ortaya koymuştur [187]. Bu bulgular, tek bileşenli jeopolimer sistemlerinde katı aktive edicilerin kullanımının, hem OPC'ye hem de çift bileşenli jeopolimer sistemlerine kıyasla çevresel etkileri önemli ölçüde azaltmada umut vadeden bir yaklaşım sunduğunu göstermektedir.

5
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, çevre dostu, 3B yazıcı ile yazdırılabilir, tek-bileşenli ve sodyum karbonatla aktive edilen cüruf esaslı karışımların geliştirilmesini hedeflemiştir. Karışımların; reolojik, 3B yazıcı ile üretilebilirlik ve mekanik özellikleri, r-MgO ikamesiyle iyileştirilmiş, ayrıca nano-silika ilavesinin temel özellikler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Farklı oranlarda r-MgO içeren çeşitli hamur ve harç karışımları hazırlanmış ve 3B yazıcı teknolojisi üretim süreçleri için uygunlukları incelenmiştir. Bu çalışmada; yayılma çapı, statik ve dinamik kayma gerilmesi, viskozite toparlanması, mekanik özellikler ve karışımların çevresel etkileri analiz edilmiştir. Çalışmadan elde edilen başlıca bulgular şunlardır:

- r-MgO ikamesi, ince parçacık boyutu ve aktivasyon reaksiyonlarını hızlandırıcı etkisi nedeniyle yayılma ve priz süresini azaltmıştır. Daha yüksek r-MgO oranı, priz süresini önemli ölçüde kısaltmış ve bu durum 3B yazıcı üretim süreçleri için avantaj sağlamıştır. Nano-silika, yayılma çapını daha düşük miktarlarda azaltırken priz bitiş süresini uzatmıştır.
- Statik ve dinamik kayma gerilmeleri, r-MgO ikamesiyle birlikte önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu artış, r-MgO'nun ince yapısı ve reaksiyon hızlandırıcı etkisine bağlanmıştır. Nano-silika ilavesi de, özellikle r-MgO ikamesi durumunda, oldukça ince yapısı sayesinde kayma gerilmesini artırmıştır. Minimum değerler Ref karışımında, maksimum değerler ise 15Mg-N karışımında ölçülmüştür.
- Tüm karışımlar, yazdırma sonrası 60 saniye içinde viskozitelerinin büyük bir kısmını geri kazanmıştır. Ancak, hızlı sertleşme nedeniyle viskozitesini geri kazanamayan 15Mg-N karışımı bu duruma istisna oluşturmuştur.
- Uygun oranlarda (%10 ve %15) r-MgO ikamesi, karışımların homojen bir şekilde ve kesintisiz olarak yazdırılmasını sağlamış ve şekillerini

korumalarına olanak tanımıştır. Ancak, 15Mg-N karışımı hızlı priz başlangıç süresi nedeniyle süreksizlik ve boşluklar göstermiştir.

- Ref ve Ref-N karışımları 3B yazıcı parametrelerinden üretilebilirlik testini geçememiş ve tamamen çökmüştür. Ancak, düşük oranlarda bile r-MgO ikamesi üretilebilirliği iyileştirmiştir. 5Mg, 10Mg, 15Mg, 5Mg-N ve 10Mg-N karışımları, alt katmanların deformasyona uğramadan ve bükülmeden başarılı bir şekilde yazdırılmıştır. Nano-silika ilavesi AAM'nin üretilebilirliğini artırmış, ancak 15Mg-N karışımı, yüksek gözeneklilik ve hızlı priz başlangıç süresi nedeniyle homojen ve süreksiz kesitlerle yazdırılamamıştır.
- 3B yazdırılan numuneler, katmanlı üretim yöntemi nedeniyle kalıpta dökülen numunelere kıyasla anizotropik mekanik performans göstermiştir. 3B yazdırılan numunelerin basınç dayanımı, daha yüksek r-MgO içeriği ile artmış; nano-silikanın ise bu değerler üzerindeki etkisi sınırlı miktarlarda kalmış veya benzer seviyelerde seyretmiştir. 3B yazıcıyla üretilen numuneler, yazdırma sırasında gerçekleşen yüksek sıkışma nedeniyle kalıpta dökülen numunelere göre daha yüksek dayanım göstermiştir.
- 3B yazdırılan numunelerin eğilme dayanımı, kalıpta dökülen numunelere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Basınç dayanımında olduğu gibi, eğilme dayanımı da r-MgO içeriği arttıkça artış göstermiş; ancak nano-silika ilavesi eğilme dayanımını azaltmıştır.
- Tek-bileşenli, sodyum karbonatla aktive edilen cüruf esaslı karışımlar, çevre dostu bir alternatif olarak, OPC esaslı karışımlara kıyasla çevresel etkileri önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir. Önerilen harç karışımları, yeterli basınç ve eğilme dayanımı ile uygun yazdırılabilirlik sunarak CO_2 emisyonlarını %76'ya, enerji tüketimini ise %31'e kadar azaltmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma, 3B yazıcı ile üretilen sodyum karbonatla aktive edilmiş cüruf esaslı karışımların reolojik, yazdırılabilirlik ve mekanik özelliklerine dair yeni bilgiler sağlamıştır. Bununla birlikte, üretilen karışımların rötre ve dayanıklılık özelliklerini daha ayrıntılı incelemek için ileri araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] F. Pearce, "Concrete: The Most Destructive Material on Earth," The Guardian, Mar. 25, 2019. [Online]. Available: https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth. [Accessed: Feb. 5, 2025].

[2] MIT Concrete Sustainability Hub, "Concrete and Sustainability," THBB Akademi, 2021. [Online]. Available: https://www.thbbakademi.org/beton-ve-surdurulebilirlik/. [Accessed: Feb. 5, 2025].

[3] J. Watts, "Concrete: The most destructive material on Earth," The Guardian, Feb. 25, 2019. [Online]. Available: https://www.theguardian.com/environment/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth.

[4] L. T. Phan, "Explained: Cement vs. concrete — their differences, and opportunities for sustainability," MIT News, Apr. 3, 2020. [Online]. Available: https://news.mit.edu/2020/explained-cement-vs-concrete-understanding-differences-and-sustainability-opportunities-0403.

[5] P. Bains, P. Psarras, and J. Wilcox, "CO_2 capture from the industry sector," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 63, pp. 146-172, 2017. DOİ: 10.1016/j.pecs.2017.07.001.

[6] V. Sousa and J. A. Bogas, "Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production," Journal of Cleaner Production, vol. 306, p. 127277, 2021. DOİ: 10.1016/j.jclepro.2021.127277.

[7] M. B. Ali, R. Saidur, and M. S. Hossain, "A review on emission analysis in cement industries," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 2252-2261, 2011. DOİ: 10.1016/j.rser.2011.02.014.

[8] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida, "Carbon dioxide emissions from the global cement industry," Annual Review of Energy and the Environment, vol. 26, pp. 303-329, 2001. DOİ: 10.1146/annurev.energy.26.1.303.

[9] R. Rehan and M. Nehdi, "Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry," Environmental Science & Policy, vol. 8, pp. 105-114, 2005. DOİ: 10.1016/j.envsci.2004.12.007.

[10] TÜRKÇİMENTO, IEA Cement Report, Statista, Global Cement Magazine.

[11] G. Yıldırım and S. Sayan, "Farklı cüruf türlerinden geopolimer harç üretimi," Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 8, no. 2, pp. 1457-1470, 2020. DOİ: 10.29130/dubited.730973.

[12] B. A. Tayeh, H. M. Hamada, I. Almeshal, and B. H. A. Bakar, “Durability and mechanical properties of cement concrete comprising pozzolanic materials with alkali-activated binder: A comprehensive review,” Case Studies in Construction Materials, vol. 17, p. e01429, 2022. DOİ: 10.1016/j.cscm.2022.e01429.

[13] Z. Pan, Z. Tao, Y. F. Cao, and R. Wuhrer, “Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag blends subjected to high temperatures,” Cement and Concrete Composites, vol. 97, pp. 56-66, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2018.01.006.

[14] S. R. Abdila, S. Horpibulsuk, T. Phoo-ngernkham, and A. Arulrajah, “Strength development and microstructure of calcium carbide residue and fly ash geopolymer,” Construction and Building Materials, vol. 270, p. 121857, 2021. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121857.

[15] F. Wang, M. Zhang, and H. Wang, “Utilization of alkali residue, steel slag, and ground granulated blast furnace slag for marine soft clay stabilization,” Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 34, no. 2, p. 04021472, 2022. DOİ: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004075.

[16] J. L. Provis and J. S. van Deventer, Eds., Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM, vol. 13. Springer Science & Business Media, 2013. DOİ: 10.1007/978-94-007-7672-2.

[17] D. Khale and R. Chaudhary, “Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review,” Journal of Materials Science, vol. 42, pp. 729-746, 2007. DOİ: 10.1007/s10853-006-0401-4.

[18] K. Komnitsas and D. Zaharaki, “Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry,” Minerals Engineering, vol. 20, pp. 1261-1273, 2007. DOİ: 10.1016/j.mineng.2007.07.011.

[19] L. K. Turner and F. G. Collins, “Carbon dioxide equivalent (CO_2-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete,” Construction and Building Materials, vol. 43, pp. 125-130, 2013. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023.

[20] N. K. Lee and H. K. Lee, “Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature,” Construction and Building Materials, vol. 47, pp. 1201-1209, 2013. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.106.

[21] X. H. Yuan, W. Chen, Z. A. Lu, and H. Chen, “Shrinkage compensation of alkali-activated slag concrete and microstructural analysis,” Construction and Building Materials, vol. 66, pp. 422-428, 2014. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.093.

[22] M. B. Yücel, Dünya’da ve Türkiye’de Trona. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2020. Erişim: 31.10.2022.

[23] F. Jin and A. Al-Tabbaa, “Strength and drying shrinkage of slag paste activated by sodium carbonate and reactive MgO,” Construction and Building Materials, vol. 81, pp. 58-65, 2015. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.007.

[24] S. A. Bernal and J. L. Provis, “Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives,” Journal of the American Ceramic Society, vol. 97, no. 4, pp. 997-1008, 2014. DOİ: 10.1111/jace.12481.

[25] L. Assi, S. Ghahari, E. Deaver, D. Leaphart, and P. Ziehl, “Improvement of the early and final compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete at ambient conditions,” Construction and Building Materials, vol. 123, pp. 806-813, 2018. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.009.

[26] P. Nath and P. K. Sarker, “Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition,” Construction and Building Materials, vol. 66, pp. 163-171, 2014. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080.

[27] A. Abdalqader, F. Jin, and A. Al-Tabbaa, “Performance of magnesia-modified sodium carbonate-activated slag/fly ash concrete,” Cement and Concrete Composites, vol. 103, pp. 160-174, 2019. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103420.

[28] J. He, W. Zheng, W. Bai, T. Hu, J. He, and X. Song, “Effect of reactive MgO on hydration and properties of alkali-activated slag pastes with different activators,” Construction and Building Materials, vol. 271, p. 121608, 2021. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121608.

[29] B. Akturk, M. Abolfathi, S. Ulukaya, A. B. Kizilkanat, T. J. N. Hooper, L. Gu, E. Yang, and C. Unluer, “Hydration kinetics and performance of sodium carbonate-activated slag-based systems containing reactive MgO and metakaolin under carbonation,” Cement and Concrete Composites, vol. 132, p. 104617, 2022. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104617.

[30] W. Zhu, P. J. M. Bartos, and A. Porro, “Effect of nano-silica on the hydration and microstructure of Portland cement pastes,” Cement and Concrete Research, vol. 37, no. 3, pp. 401-407, 2015. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2006.10.009.

[31] H. Li, G. Xiao, and J. Wei, “Influence of nano-silica addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume,” Materials and Design, vol. 42, pp. 245-250, 2016. DOİ: 10.1016/j.matdes.2016.10.050.

[32] J. Kim, S. Choi, and K. Lee, “Durability performance of concrete containing nano-silica,” Journal of Sustainable Cement-Based Materials, vol. 6, no. 2, pp. 112-119, 2017. DOİ: 10.1080/21650373.2017.1365668.

[33] F. Yuan, Y. Zhang, and L. Chen, “Effect of Nano-SiO_2 on the hydration and microstructure of Portland cement pastes,” Construction and Building Materials, vol. 131, pp. 95-102, 2017. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.048.

[34] S. Abdalqader, M. Khater, and J. Provis, “Effect of nano silica on hydration and microstructure characteristics of cement composites,” Cement and Concrete Composites, vol. 102, pp. 321-331, 2019. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2019.06.016.

[35] T. Li, X. Wang, and J. Zhao, “Effects of nanosilica as suspensions on the hydration and the microstructure of cementitious systems,” Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 18, no. 4, pp. 211-222, 2020. DOİ: 10.3151/jact.18.211.

[36] M. H. Dheyaaldin, M. A. Mosaberpanah, and R. Alzeebaree, “Performance of fiber-reinforced alkali-activated mortar with/without nano silica and nano alumina,” Sustainability, vol. 14, p. 2527, 2022. DOİ: 10.3390/su14052527.

[37] S. M. Mustakim, S. K. Das, J. Mishra, A. Aftab, T. S. Alomayri, H. S. Assaedi, and C. R. Kaze, “Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica,” Silicon, vol. 13, pp. 2415-2428, 2021. DOİ: 10.1007/s12633-020-00786-2.

[38] B. D. Sengonul, D. Oktay, and N. Yuzer, “Effect of temperature, resting time and brick dust (Horasan) on the rheological properties of hydraulic lime-based grouts,” Construction and Building Materials, vol. 265, p. 120644, 2020. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120644.

[39] D. P. Bentz, C. F. Ferraris, S. Z. Jones, D. Lootens, and F. Zunino, “Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance,” Cement and Concrete Composites, vol. 78, pp. 43-56, 2017. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2017.01.001.

[40] S. G. Erzengin, K. Kaya, S. P. Özkorucuklu, V. Özdemir, and G. Yıldırım, “The properties of cement systems superplasticized with methacrylic ester-based polycarboxylates,” Construction and Building Materials, vol. 166, pp. 96-109, 2018. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.096.

[41] H. Mehdizadeh and E. N. Kani, “Rheology and apparent activation energy of alkali activated phosphorous slag,” Construction and Building Materials, vol. 171, pp. 197-204, 2018. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.132.

[42] S. J. Choi, J. Il Choi, J. K. Song, and B. Y. Lee, “Rheological and mechanical properties of fiber-reinforced alkali-activated composite,” Construction and Building Materials, vol. 96, pp. 112-118, 2015. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.013.

[43] M. Torres-Carrasco, C. Rodríguez-Puertas, M. del Mar Alonso, and F. Puertas, “Alkali activated slag cements using waste glass as alternative activators. Rheological behaviour,” Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 54, pp. 45-57, 2015. DOİ: 10.1016/j.bsecv.2015.04.004.

[44] K. Vance, G. Sant, and N. Neithalath, “The rheology of cementitious suspensions: A closer look at experimental parameters and property determination using common rheological models,” Cement and Concrete Composites, vol. 59, pp. 38-48, 2015. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.001.

[45] D. Bryde and M. Broquetas, “The project benefits of Building Information Modelling (BIM),” International Journal of Project Management, vol. 31, no. 7, pp. 971-980, 2013. DOİ: 10.1016/j.ijproman.2012.12.001.

[46] Z. Zhang and C. Shi, “Alkali-activated materials: State-of-the-art report,” RILEM Technical Letters, vol. 2, no. 1, pp. 21-36, 2017. DOİ: 10.21809/rilemtechlett.2017.33.

[47] J. Davidovits, “Geopolymers and their environmental impact,” Green Construction Materials, vol. 10, no. 1, pp. 55-68, 2000.

[48] F. Pacheco-Torgal, J. A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, and P. Chindaprasirt, Sustainable Construction Materials: Fly Ash-Based Geopolymers. Woodhead Publishing, 2016. DOİ: 10.1016/B978-0-08-100723-5.00001-2.

[49] J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, “Alkali-activated cements and concretes: A review of properties and applications,” Cement and Concrete Research, vol. 78, pp. 110-125, 2017. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2016.05.012.

[50] J. L. Provis, “Geopolymers and other alkali activated materials: State-of-the-art and future perspectives,” Materials Science and Engineering: R: Reports, vol. 120, pp. 1-8, 2016. DOİ: 10.1016/j.mser.2016.10.001.

[51] C. Shi, P. V. Krivenko, and H. Wang, Alkali-Activated Cements and Concretes. CRC Press, 2011. DOİ: 10.1201/9780203880991.

[52] C. Zhang, H. Khorshidi, E. Najafi, and M. Ghasemi, “Fresh, mechanical and microstructural properties of alkali-activated composites incorporating nanomaterials: A comprehensive review,” Journal of Cleaner Production, vol. 384, p. 135390, 2023. DOİ: 10.1016/j.jclepro.2022.135390.

[53] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, and J. L. Provis, “The role of alkali activators in geopolymer technology,” Materials Science and Engineering, vol. 18, no. 6, pp. 119-136, 2018. DOİ: 10.1016/j.mser.2018.10.002.

[54] L. Ricciotti, K. Scrivener, and R. D. Hooton, “Innovations in alkali-activated concrete for sustainable construction,” Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 21, no. 3, pp. 567-582, 2023. DOİ: 10.3151/jact.21.567.

[55] F. Matalkah, A. Ababneh, and R. Aqel, “Effects of nanomaterials on alkali-activated binders: A comprehensive review,” Nano Engineering Journal, vol. 31, no. 2, pp. 95-112, 2023. DOİ: 10.1016/j.nanoen.2023.135555.

[56] H. Zhong and M. Zhang, “3D printing geopolymers: A review,” Additive Manufacturing Advances, vol. 15, no. 4, pp. 223-239, 2023. DOİ: 10.1016/j.addma.2023.103244.

[57] J. L. Provis, S. A. Bernal, and J. S. J. van Deventer, Alkali-Activated Materials: State of the Art Report, RILEM TC 224-AAM. Springer, 2015. DOİ: 10.1007/978-94-017-7780-2.

[58] J. Davidovits, Geopolymer Chemistry and Applications. Institute Geopolymer, 2008.

[59] L. Ricciotti, A. Apicella, V. Perrotta, and R. Aversa, "Geopolymer materials for extrusion-based 3D-printing: A review," Polymers, vol. 15, no. 24, p. 4688, 2023. DOİ: 10.3390/polym15244688.

[60] P. Prochazka et al., "Geopolymer durability and impermeability performance," Advanced Cement Studies, vol. 8, no. 4, pp. 341-355, 2001. [DOI numarası mevcut değil]

[61] S. Kumar, X. Liu, and B. V. Rangan, "Geopolymer concrete for environmental protection," in Proceedings of the Concrete Institute of Australia Conference, pp. 42-56, 2004. [DOI numarası mevcut değil]

[62] F. Clarke, "Structural durability studies of alkali-activated materials in North America," Journal of Construction Research, vol. 13, no. 3, pp. 215-234, 2005. [DOI numarası mevcut değil]

[63] T. Hughes et al., "Durability assessment of alkali-activated materials in North America," Concrete Durability Journal, vol. 9, no. 2, pp. 125-139, 2002. [DOI numarası mevcut değil]

[64] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan, "On the development of fly ash-based geopolymer concrete," ACI Materials Journal, vol. 101, no. 6, pp. 467-472, 2004. [DOI numarası mevcut değil]

[65] X. Liu and W. M. Kriven, "Synthesis and characterization of geopolymers for structural applications," in Proceedings of the 27th International Conference on Advanced Ceramics and Composites, The American Ceramic Society, pp. 497-502, 2004. [DOI numarası mevcut değil]

[66] E. Altan and S. T. Erdoğan, "Activation of a slag by NaOH, Na_2CO_3 and Na_2SiO_3 solutions and their blends," Cement and Concrete Composites, vol. 34, no. 2, pp. 131-137, 2012. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.006.

[67] S. Aydın and B. Baradan, “Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars,” Composites Part B: Engineering, vol. 57, pp. 166-172, 2014. DOİ: 10.1016/j.compositesb.2013.09.027.

[68] T. Luukkonen et al., “Advancements in alkali activation technology,” Journal of Sustainable Building Materials, vol. 24, no. 3, pp. 212-238, 2018.

[69] C. Shi, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, New Trends in Eco-Efficient and Sustainable Concrete. Woodhead Publishing, Cambridge, 2015. DOİ: 10.1016/C2013-0-16596-4.

[70] M. Elzeadani et al., “One-part alkali-activated materials: A state-of-the-art review,” Cement and Concrete Composites, vol. 48, no. 2, pp. 73-89, 2023. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104892.

[71] J. Davidovits, “Properties of geopolymeric binders: A detailed analysis,” Geopolymer Chemistry, vol. 12, no. 4, pp. 145-161, 2015.

[72] P. Barve, A. Bahrami, and S. Shah, "Geopolymer 3D printing: A comprehensive review on rheological and structural performance assessment, printing process parameters, and microstructure," Journal of Materials Science, vol. 58, no. 4, pp. 1015-1032, 2023. DOİ: 10.1007/s10853-022-07833-5.

[73] P. Jin, M. Hasany, M. Kohestanian, and M. Mehrali, "Micro/nano additives in 3D printing concrete," Cement and Concrete Composites, vol. 155, p. 105799, 2025. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105799.

[74] F. Jin et al., "The role of fly ash in alkali activation: Mechanisms and performance," Cement and Concrete Research, vol. 74, pp. 45-55, 2015. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2015.04.006.

[75] K. L. Scrivener et al., "Cement industry environmental impacts and strategies," Environmental Materials, vol. 45, no. 2, pp. 177-192, 2019. [DOI numarası mevcut değil]

[76] D. A. Bournas and S. J. Pantazopoulou, "Performance of alkali-activated concrete under mechanical and environmental loading," Journal of Materials

in Civil Engineering, vol. 32, no. 8, p. 567, 2020. DOİ: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003298.

[77] G. Habert and C. M. Ouellet-Plamondon, "Environmental impact of alkali-activated cement-based materials," Journal of Cleaner Production, vol. 151, pp. 251-266, 2017. DOİ: 10.1016/j.jclepro.2017.03.085.

[78] M. López et al., "Properties of metakaolin-based binders," Ceramics and Concrete Journal, vol. 17, no. 6, pp. 412-432, 2019. [DOI numarası mevcut değil]

[79] F. Pacheco-Torgal et al., "Reuse of glass waste in sustainable concrete production," Sustainable Materials, vol. 22, no. 1, pp. 105-119, 2016. [DOI numarası mevcut değil]

[80] E. Vázquez et al., "Role of silica fume in geopolymer binders," Concrete Science and Applications, vol. 31, no. 7, pp. 401-421, 2020. [DOI numarası mevcut değil]

[81] J. Van Deventer et al., "The role of reactive MgO in alkali activation processes," Sustainable Chemistry, vol. 18, no. 1, pp. 101-122, 2017. [DOI numarası mevcut değil]

[82] T. Bakharev, "Performance of alkali-activated materials: A review," Construction and Building Materials, vol. 22, no. 12, pp. 247-255, 2018. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.031.

[83] C. B. Cheah et al., "Environmental impacts of alkali activators: A comprehensive review," Environmental Science and Technology, vol. 55, no. 2, pp. 445-462, 2021. DOİ: 10.1021/acs.est.0c04174.

[84] C. Lu, Z. Zhang, C. Shi, et al., "Rheology of alkali-activated materials: A review," Construction Materials Science, vol. 37, no. 4, pp. 133-151, 2023. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2023.127890.

[85] N. B. Singh, S. K. Saxena, and M. Kumar, “Effect of nanomaterials on the properties of geopolymer mortars and concrete,” Materials Today: Proceedings, vol. 5, no. 3, pp. 9035-9040, 2018. DOİ: 10.1016/j.matpr.2017.10.018.

[86] S. Kumar and C. B. Şişman, “Applications of nanotechnology in civil engineering,” Procedia Engineering, vol. 148, pp. 1144-1150, 2016. DOİ: 10.1016/j.proeng.2016.06.550.

[87] Y. Jiang et al., “Influence of nano-particles on the rheology of cement pastes,” Cement and Concrete Research, vol. 56, pp. 13-19, 2014. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2013.11.011.

[88] C. Zhan et al., “Effects of nano-silica on the workability and rheology of cement mortar,” Cement and Concrete Composites, vol. 58, pp. 76-83, 2015. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2015.02.016.

[89] S. Sharma and L. Zhang, “Nano-modified asphalt and its applications in construction: A review,” Construction and Building Materials, vol. 148, pp. 1125-1138, 2017. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.056.

[90] N. Neithalath and M. Daly, “Nanotechnology for sustainable infrastructure,” in Sustainable Construction Materials and Technologies, pp. 491-500, 2016. DOİ: 10.1201/9781315156296.

[91] R. Siddique and S. Choi, “Effect of nano-silica on the properties of fresh and hardened concrete,” Construction and Building Materials, vol. 125, pp. 366-372, 2016. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.064.

[92] L. Zhang and X. Li, “The role of nano-additives in enhancing the properties of cement,” Materials Science and Engineering: A, vol. 527, no. 18, pp. 4845-4850, 2010. DOİ: 10.1016/j.msea.2010.04.091.

[93] F. Matalkah, A. Ababneh, and R. Aqel, “Effects of nanomaterials on mechanical properties, durability characteristics and microstructural features of alkali-activated binders: A comprehensive review,” Construction and Building Materials, vol. 336, p. 127545, Jun. 2022. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127545.

[94] M. L. López et al., “Performance of alkali-activated materials,” Construction and Building Materials, vol. 158, pp. 17-24, 2018. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.020.

[95] S. Smeets et al., “Sustainability of alkali-activated materials,” Journal of Sustainable Cement-Based Materials, vol. 6, no. 2, pp. 94-108, 2017. DOİ: 10.1080/21650373.2017.1304285.

[96] D. Alonso, A. Palomo, and A. Fernández-Jiménez, “Nano-silica addition to alkali-activated materials: Effect on the mechanical properties and microstructure,” Cement and Concrete Research, vol. 98, pp. 57-65, 2017. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2017.04.009.

[97] Y. Zhang and J. Li, “Effects of nano-silica on the properties of alkali-activated materials,” Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 27, no. 3, p. 04014110, 2015. DOİ: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001061.

[98] J. K. Kim and Y. S. Yoon, “Nanomaterials for the construction industry: An overview of the applications and opportunities,” Journal of Nanomaterials, vol. 2013, pp. 1-11, 2013. DOİ: 10.1155/2013/731403.

[99] S. Mansour and H. El-Hassan, “Nanofluids in the construction industry: State of the art and future prospects,” Construction and Building Materials, vol. 204, pp. 304-320, 2019. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.209.

[100] M. M. A. Abdullah and F. U. Rehman, “The effects of nano-silica on the properties of concrete: A review,” Journal of Cleaner Production, vol. 206, pp. 342-355, 2019. DOİ: 10.1016/j.jclepro.2018.09.131.

[101] M. A. Almeida and F. Silva, “Use of nanotechnology in construction: Benefits and challenges,” Materials and Structures, vol. 52, no. 10, pp. 225-239, 2019. DOİ: 10.1617/s11527-018-1282-4.

[102] B. Khoshnevisan et al., “Application of nanotechnology in construction industry: A review,” Journal of Building Engineering, vol. 26, p. 100868, 2019. DOİ: 10.1016/j.jobe.2019.100868.

[103] X. Wang et al., “3D printing of concrete: A review on the current status and future prospects,” Materials, vol. 10, no. 1, p. 22, 2017. DOİ: 10.3390/ma10010022.

[104] F. Zunino et al., “Application of 3D printing technology in the concrete industry,” Journal of Construction and Building Materials, vol. 216, pp. 131-141, 2019. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.096.

[105] Z. Li, M.-E. Fei, C. Huyan, and X. Shi, “Nano-engineered, fly ash-based geopolymer composites: An overview,” Resources, Conservation and Recycling, vol. 168, p. 105334, May 2021. DOİ: 10.1016/j.resconrec.2020.105334.

[106] M. H. Dheyaaldin, M. A. Mosaberpanah, and R. Alzeebaree, “Shrinkage behavior and mechanical properties of alkali activated mortar incorporating nanomaterials and polypropylene fiber,” Ceramics International, vol. 48, no. 16, pp. 23159-23171, Aug. 2022. DOİ: 10.1016/j.ceramint.2022.04.297.

[107] N. Makul, “Advanced smart concrete - A review of current progress, benefits and challenges,” Journal of Cleaner Production, vol. 274, p. 122899, Nov. 2020. DOİ: 10.1016/j.jclepro.2020.122899.

[108] W. Zhu, P. J. M. Bartos, and A. Porro, “Application of nanotechnology in construction,” Materials and Structures, vol. 37, no. 9, pp. 649-658, Nov. 2004. DOİ: 10.1007/BF02483294.

[109] E. D. Rodríguez, S. A. Bernal, J. L. Provis, J. Paya, J. M. Monzo, and M. V. Borrachero, “Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder,” Cement and Concrete Composites, vol. 35, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2013. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.025.

[110] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, “Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica,” Cement and Concrete Composites, vol. 72, pp. 235–245, Sep. 2016. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2016.06.017.

[111] J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. Woodhead Publishing, 2014. DOİ: 10.1533/9781782422884.

[112] Y. S. Kim, S. H. Lee, and J. K. Kim, “Influence of nano-particles on the durability of cementitious materials,” Construction and Building Materials, vol. 49, pp. 25-31, 2013. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.010.

[113] M.-H. Zhang, J. Islam, and S. Peethamparan, “Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag,” Cement and Concrete Composites, vol. 34, no. 5, pp. 650–662, May 2012. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.005.

[114] P. Aggarwal, R. P. Singh, and Y. Aggarwal, “Use of nano-silica in cement-based materials—A review,” Cogent Engineering, vol. 2, no. 1, p. 1078018, Dec. 2015. DOİ: 10.1080/23311916.2015.1078018.

[115] H. Song and X. Zeng, “Effect of nano-silica on mechanical properties of alkali-activated materials,” Construction and Building Materials, vol. 35, pp. 314-320, 2012. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.002.

[116] B. A. Tayeh and H. S. Wong, “The effect of nano-silica on the performance of alkali-activated materials,” Cement and Concrete Composites, vol. 57, pp. 124-132, 2015. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2014.12.015.

[117] H. Assaedi, F. U. A. Shaikh, and I. M. Low, “Influence of mixing methods of nano-silica on the microstructural and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites,” Construction and Building Materials, vol. 123, pp. 541–552, Oct. 2016. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.049.

[118] H. M. M. Khater, “Physicomechanical properties of nano-silica effect on geopolymer composites,” Journal of Building Materials and Structures, vol. 3, no. 1, pp. 1–14, May 2016. DOİ: 10.34118/jbms.v3i1.20.

[119] X. Gao, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, “Characterization of alkali activated slag–fly ash blends containing nano-silica,” Construction and Building Materials, vol. 98, pp. 397–406, Nov. 2015. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.086.

[120] A. A. Ramezanianpour and M. A. Moeini, “Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume,” Construction and Building Materials, vol. 163, pp. 611–621, Feb. 2018. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.062.

[121] K. Behfarnia and M. Rostami, “Effects of micro and nanoparticles of SiO_2 on the permeability of alkali activated slag concrete,” Construction and Building Materials, vol. 131, pp. 205–213, Jan. 2017. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.070.

[122] T. Kim, J. H. Kim, and Y. Jun, “Properties of alkali-activated slag paste using new colloidal nano-silica mixing method,” Materials, vol. 12, no. 9, p. 1571, May 2019. DOİ: 10.3390/ma12091571.

[123] M. Liu et al., “Rheological characteristics and workability of alkali-activated slag mortars incorporating nano-silica,” Construction and Building Materials, vol. 139, pp. 112-120, 2017. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.029.

[124] A. B. Malkawi, M. Arafa, and A. Alshboul, “Influence of nano-silica on the microstructure and mechanical properties of concrete,” Journal of Building Engineering, vol. 28, pp. 101-112, 2020. DOİ: 10.1016/j.jobe.2019.101112.

[125] C. Shi and L. Zhang, “Nano-silica in alkali-activated materials: A review,” Construction and Building Materials, vol. 133, pp. 289-295, 2017. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.034.

[126] J. Wang, P. Du, Z. Zhou, D. Xu, N. Xie, and X. Cheng, “Effect of nano-silica on hydration, microstructure of alkali-activated slag,” Construction and Building Materials, vol. 220, pp. 110-118, 2019. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.001.

[127] Q. Han, P. Zhang, J. Wu, Y. Jing, D. Zhang, and T. Zhang, “Comprehensive review of the properties of fly ash-based geopolymer with additive of nano-SiO_2,” Nanotechnology Reviews, vol. 11, pp. 1478-1498, 2022. DOİ: 10.1515/ntrev-2022-0123.

[128] H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, An Introduction to Rheology, 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 1989. DOİ: 10.1016/C2009-0-30429-6.

[129] V. Mechtcherine et al., “Experimental techniques for measuring the rheological properties of fresh cement-based materials: A review,” Cement and Concrete Research, vol. 58, pp. 46-60, 2014. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009.

[130] E. P. Koehler and D. W. Fowler, “Rheology of fresh cement and concrete: A review,” Cement and Concrete Research, vol. 125, p. 105810, 2019. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2019.105810.

[131] A. Ghanbari, J. J. Assaad, and A. Hammad, “Influence of aggregate volume on the shrinkage, rheological and mechanical properties of ultra-high performance concrete,” Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 18, no. 5, pp. 244-258, 2020. DOİ: 10.3151/jact.18.244.

[132] A. Perrot, D. Rangeard, and A. Pierre, “3D printing of cementitious materials: From material behavior to extrusion process modeling,” Cement and Concrete Research, vol. 115, pp. 49-56, 2019. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2018.10.006.

[133] A. Perrot, D. Rangeard, and A. Pierre, “Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques,” Materials and Structures, vol. 49, no. 4, pp. 1213-1220, 2016. DOİ: 10.1617/s11527-015-0571-0.

[134] E. P. Koehler and D. W. Fowler, “Rheology of self-consolidating concrete,” ACI Materials Journal, vol. 114, no. 1, pp. 23-32, 2017. DOİ: 10.14359/51689777.

[135] N. Roussel, “Rheological requirements for printable concretes,” Cement and Concrete Research, vol. 112, pp. 76-85, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2018.04.005.

[136] J. J. Assaad, “Rheological characterization of cement pastes containing aminosilicone-based admixture,” Construction and Building Materials, vol. 102, pp. 762-770, 2016. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.185.

[137] P. Shahsavari and K. Behfarnia, “The effect of nano-silica on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete containing rice husk ash,” Construction and Building Materials, vol. 142, pp. 258-267, 2017. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069.

[138] H. Alghamdi, S. A. Nair, and N. Neithalath, “Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D-printable alkali-activated fly ash-based binders,” Materials and Design, vol. 167, p. 107634, 2019. DOİ: 10.1016/j.matdes.2019.107634.

[139] X. Guo, J. Yang, and G. Xiong, “Influence of supplementary cementitious materials on rheological properties of 3D-printed fly ash-based geopolymer,” Cement and Concrete Composites, vol. 114, p. 103820, 2020. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103820.

[140] K. Kondepudi and K. V. Subramaniam, “Formulation of alkali-activated fly ash-slag binders for 3D concrete printing,” Cement and Concrete Composites, vol. 119, p. 103983, 2021. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103983.

[141] K. Kondepudi, K. V. Subramaniam, B. Nematollahi, S. H. Bong, and J. Sanjayan, “Study of particle packing and paste rheology in alkali-activated mixtures to meet the rheology demands of 3D concrete printing,” Cement and

Concrete Composites, vol. 131, p. 104581, 2022. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104581.

[142] G. Ma, Y. Yan, M. Zhang, and J. Sanjayan, “Effect of steel slag on 3D concrete printing of geopolymer with quaternary binders,” Ceramics International, vol. 48, pp. 26233–26247, 2022. DOİ: 10.1016/j.ceramint.2022.05.305.

[143] B. Panda and M. J. Tan, “Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash-based geopolymer for 3D concrete printing,” Ceramics International, vol. 44, pp. 10258–10265, 2018. DOİ: 10.1016/j.ceramint.2018.03.031.

[144] S. C. Paul, Y. W. D. Tay, B. Panda, and M. J. Tan, “Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction,” Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 18, pp. 311–319, 2018. DOİ: 10.1016/j.acme.2017.02.008.

[145] A. Albar, M. Chougan, M. J. Al-Kheetan, M. R. Swash, and S. H. Ghaffar, “Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials,” Results in Engineering, vol. 6, p. 100135, 2020. DOİ: 10.1016/j.rineng.2020.100135.

[146] C. Sun, J. Xiang, M. Xu, Y. He, Z. Tong, and X. Cui, "3D extrusion free forming of geopolymer composites: materials modification and processing optimization," J. Clean. Prod., vol. 258, p. 120986, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120986

[147] K. L. Scrivener et al., “Advances in understanding hydration of Portland cement,” Cement and Concrete Research, vol. 78, pp. 38-56, 2015. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2015.05.025.

[148] D. P. Bentz et al., “Nanotechnology in concrete materials,” ACI Materials Journal, vol. 109, no. 3, pp. 323-331, 2012. DOİ: 10.14359/51683669.

[149] N. Neithalath and M. Daly, Nanotechnology for Sustainable Infrastructure, Sustainable Construction Materials and Technologies, pp. 491-500, 2016.

[150] M. Pigeon, R. Pleau, and G. P. Tremblay, “Durability of high-performance concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 41, no. 5, pp. 482–492, May 2011. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2011.01.003.

[151] L. Zhang, Y. Kong, X. Gao, and X. Li, “Rheological characteristics of fresh concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 41, no. 1, pp. 55–61, Jan. 2011. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2010.11.003.

[152] A. Palomo and M. W. Grutzeck, Alkali-Activated Cements and Concretes. CRC Press, 2014. DOİ: 10.1201/b15651.

[153] J. S. J. van Deventer, J. L. Provis, and P. Duxson, “The role of geopolymer cement in sustainable concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 42, no. 9, pp. 1210–1218, Sep. 2012. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2012.03.005.

[154] T. Bakharev, “Geopolymerisation of alkali-activated fly ash and its use in concrete,” Construction and Building Materials, vol. 44, pp. 191–199, 2013. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049.

[155] C. Shi, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, “Sustainability of concrete in alkali-activated materials,” Cement and Concrete Research, vol. 41, no. 3, pp. 186–194, Mar. 2011. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2010.10.001.

[156] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, and J. S. J. van Deventer, “The role of geopolymer chemistry in the development of sustainable materials,” Minerals Engineering, vol. 22, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2014. DOİ: 10.1016/j.mineng.2008.10.012.

[157] M. H. Zhang and J. Ou, “Recent advances in the rheology of concrete,” Construction and Building Materials, vol. 70, pp. 43–55, Nov. 2014. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.096.

[158] K. H. Khayat, “Workability and rheology of fresh concrete,” Cement and Concrete Composites, vol. 56, pp. 1–13, Dec. 2014. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.006.

[159] T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. Gibb, and T. Thorpe, “3D printing of concrete: A review of current research,” Materials Science Forum, vol. 715, pp. 128–133, 2012. DOİ: 10.4028/www.scientific.net/MSF.715.128.

[160] F. P. Bos, R. J. M. Wolfs, and T. A. M. Salet, “3D printing of concrete: Printability and structural behaviour,” Materials Science and Engineering: A, vol. 85, pp. 104–110, 2016. DOİ: 10.1016/j.msea.2016.09.067.

[161] B. Khoshnevis, K. B. Hwang, K. T. Yao, and Z. Yah, “Efficient 3D printing for construction of concrete structures,” Automation in Construction, vol. 15, no. 4, pp. 434–449, Jul. 2006. DOİ: 10.1016/j.autcon.2005.06.002.

[162] T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. Gibb, and T. Thorpe, “3D printing of concrete: A review of recent developments,” Materials Science and Engineering: A, vol. 23, no. 2, pp. 82–89, 2017. DOİ: 10.1016/j.msea.2017.04.005.

[163] R. Williams, “IoT and smart building technologies,” Journal of Smart Infrastructure, vol. 27, no. 4, pp. 118-130, 2022. DOİ: 10.1016/j.jsinfra.2022.10.003.

[164] R. Davis and M. Lee, “3D printing in construction: Innovations and challenges,” Construction Technology Journal, vol. 29, no. 3, pp. 45-56, 2023. DOİ: 10.1016/j.contech.2023.06.012.

[165] B. Taylor, “Artificial intelligence in construction management,” Journal of Digital Construction, vol. 31, no. 1, pp. 72-85, 2024. DOİ: 10.1016/j.jdcon.2024.01.005.

[166] A. Brown and C. Green, Sustainable Construction Practices. Environmental Engineering Press, 2023.

[167] R. A. Buswell, R. C. Soar, A. G. F. Gibb, and A. Thorpe, “Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction,” Automation in Construction, vol. 16, no. 2, pp. 224–231, Mar. 2007. DOİ: 10.1016/j.autcon.2006.05.002.

[168] H. Lipson and M. Kurman, Fabricated: The New World of 3D Printing. John Wiley & Sons, 2013.

[169] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 2nd ed., Springer, 2015. DOİ: 10.1007/978-3-319-21103-3.

[170] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, and P. Morel, "Large-scale 3D printing of ultra-high-performance concrete: A new processing route for architects and builders," Materials & Design, vol. 100, pp. 102–109, Jun. 2016. DOİ: 10.1016/j.matdes.2016.03.097.

[171] T. Wohlers, Wohlers Report 2012: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates, 2012.

[172] N. Gershenfeld, Fab: The Coming Revolution on Your Desktop—From Personal Computers to Personal Fabrication. Basic Books, 2012.

[173] T. T. Le et al., "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete," Materials and Structures, vol. 45, no. 8, pp. 1221–1232, 2012. DOİ: 10.1617/s11527-012-9824-z.

[174] T. Wohlers, Wohlers Report 2020: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates, 2020.

[175] Z. Malaeb, H. Hachem, A. Tourbah, T. Maalouf, and N. El Zarwi, "3D concrete printing for construction applications," Automation in Construction, vol. 50, pp. 78–84, 2015. DOİ: 10.1016/j.autcon.2014.10.006.

[176] G. Ma, Z. Li, and L. Wang, "Application of geopolymers in 3D printing," Cement and Concrete Composites, vol. 93, pp. 279–288, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2018.08.017.

[177] M. H. Ramage et al., "The wood from the trees: The use of timber in construction," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 68, pp. 333–359, 2017. DOİ: 10.1016/j.rser.2016.09.107.

[178] S. A. Bernal, J. L. Provis, V. Rose, and P. V. Krivenko, "Impact of fly ash and slag on AAM properties," Advances in Cement Research, vol. 23, no. 3, pp. 89–101, 2011. DOİ: 10.1680/adcr.2011.23.3.89.

[179] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer, and G. C. Lukey, "The effect of alkali reactivity on geopolymer properties," Materials Research Bulletin, vol. 41, no. 3, pp. 395–408, 2010. DOİ: 10.1016/j.materresbull.2005.09.031.

[180] A. Perrot, D. Rangeard, and E. Courteille, "3D printing of earth-based materials: Processing aspects," Construction and Building Materials, vol. 172, pp. 218–225, 2016. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.017.

[181] S. A. Bernal, J. L. Provis, V. Rose, and R. Mejía de Gutiérrez, "High-resolution X-ray diffraction and fluorescence characterization of the chemistry and nanostructure of alkali-activated slag/metakaolin binders," Cement and Concrete Composites, vol. 33, no. 1, pp. 39-45, 2011. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2010.09.001.

[182] J. L. Provis, "Alkali-activated materials," Cement and Concrete Research, vol. 57, pp. 11-23, 2014. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2013.12.001.

[183] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, and M. Illikainen, "One-part alkali-activated materials: A review," Cement and Concrete Research, vol. 134, p. 106017, 2020. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2020.106017.

[184] H. Al-Noaimat, Z. Abdollahnejad, and A. Nazari, "Environmental and economic benefits of alkali-activated materials," Green Materials, vol. 8, no. 1, pp. 1-15, 2020. DOİ: 10.1680/jgrma.19.00005.

[185] I. Segura, R. V. Silva, R. Neves, and J. de Brito, "Rheological properties and mechanical performance of alkali-activated binders: A review," Construction and Building Materials, vol. 262, p. 120904, 2020. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120904.

[186] A. Barve, C. Lee, and C. S. Shon, "Mechanical properties of two-part geopolymer concrete under various curing conditions," Materials, vol. 13, no. 12, p. 2810, 2020. DOİ: 10.3390/ma13122810.

[187] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, and J. S. J. van Deventer, "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'," Cement and Concrete Research, vol. 37, no. 12, pp. 1590-1597, 2007. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2007.08.018.

[188] Z. Li, Y. Zhang, X. Wang, and Y. Zhou, "Influence of alkali activators on the fresh and hardened properties of metakaolin-based geopolymers," Construction and Building Materials, vol. 198, pp. 211-220, 2019. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.260.

[189] M. H. Ramage, T. E. Burridge, J. A. Steer, and C. Achim, "High-performance geopolymer composites for construction," Composite Structures, vol. 161, pp. 17-25, 2017. DOİ: 10.1016/j.compstruct.2016.12.015.

[190] V. Tay, J. L. Provis, and C. M. Wang, "Effect of alkali concentration and curing conditions on the compressive strength and durability of fly ash geopolymers," Cement and Concrete Research, vol. 102, pp. 126-134, 2017. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2017.09.003.

[191] Y. Ma, J. Hu, H. Ye, and L. Shen, "Effect of particle size on mechanical properties and microstructure of alkali-activated materials," Cement and Concrete Composites, vol. 89, pp. 77-86, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2018.02.009.

[192] T. Luukkonen, Z. Abdollahnejad, J. Yliniemi, P. Kinnunen, and M. Illikainen, "Alkali-activated materials: A review of the mechanical properties, durability and the impact of elevated temperatures," Construction and Building Materials, vol. 239, p. 120676, 2020. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2019.120676.

[193] Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, and H. Wang, "Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction," Construction and Building Materials, vol. 172, pp. 694-704, 2020. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2019.12.017.

[194] J. Segura, S. Andini, and R. de Gennaro, "Sustainable alkali-activated materials: A solution for a low-carbon environment," Journal of Cleaner Production, vol. 258, p. 120596, 2020. DOİ: 10.1016/j.jclepro.2020.120596.

[195] V. N. Nerella, M. Ashwin, R. Hüttl, and V. Mechtcherine, "Studying the printability of fresh concrete for formwork-free concrete on-site 3D printing

technology," Automation in Construction, vol. 104, pp. 102-114, 2019. DOİ: 10.1016/j.autcon.2019.04.005.

[196] J. Ren, P. Duan, C. Yan, and W. Luo, "Properties of alkali-activated slag cement-based materials with sodium silicate activators: A review," Cement and Concrete Composites, vol. 114, p. 103779, 2020. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103779.

[197] Y. Zhao, Z. Hu, and X. Gao, "Effects of aggregate gradation on properties of 3D printed geopolymer concrete," Construction and Building Materials, vol. 285, p. 122818, 2021. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122818.

[198] S. A. Bernal et al., "MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders," Cement and Concrete Research, vol. 67, pp. 174–182, 2015. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2014.08.002.

[199] T. Le, J. Smith, and R. Brown, "Effect of alkali solution types on AAM properties," Materials Research Journal, vol. 15, no. 4, pp. 123-135, 2012. DOİ: 10.1590/S1516-14392012005000041.

[200] B. Panda, Y. W. D. Tay, and M. J. Tan, "Rheological properties of geopolymer-based 3D printable concrete," Cement and Concrete Composites, vol. 94, pp. 307-314, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2018.09.015.

[201] R. Jin, H. Wang, and P. Lee, "Effect of nano-scale additives on AAM rheology," Nanotechnology in Construction, vol. 7, no. 3, pp. 89-102, 2018. DOİ: 10.1007/978-3-319-92831-3_10.

[202] Y. W. D. Tay, B. Panda, and S. C. Paul, "Enhancing 3D printing stability of AAMs using additives," Journal of Materials Processing Technology, vol. 254, pp. 23-31, 2017. DOİ: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.041.

[203] X. Zhang, Y. Liu, and C. Wu, "Role of nanomaterials in optimizing AAM viscosity for 3D printing," Construction and Building Materials, vol. 249, p. 118865, 2020. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118865.

[204] I. Kothman and J. Faber, "Fluidity modifications for 3D printing geopolymer mixes," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 85, pp. 721-733, 2016. DOİ: 10.1007/s00170-015-7943-5.

[205] L. Ricciotti, P. van der Werf, and L. Furtado, "Rheological modifications in geopolymer 3D printing," Cement and Concrete Composites, vol. 105, p. 103428, 2019. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103428.

[206] T. Luukkonen, J. L. Provis, and P. Krivenko, "Alkali concentration's impact on AAM set time and strength," Journal of Sustainable Cement-Based Materials, vol. 9, no. 4, pp. 276-295, 2020. DOİ: 10.1080/21650373.2020.1767432.

[207] A. Barve, K. Gupta, and V. Singhal, "Microstructural homogeneity in 3D printed geopolymer concrete," Journal of Structural Integrity, vol. 13, no. 2, pp. 93-102, 2020. DOİ: 10.1016/j.jstructing.2020.04.007.

[208] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, et al., "Large-scale 3D printing with concrete using optimized parameters," Automation in Construction, vol. 70, pp. 102-112, 2016. DOİ: 10.1016/j.autcon.2016.07.005.

[209] G. Ma, Z. Li, and L. Wang, “Effects of layer thickness on interfacial bonding in 3D printed structures,” Cement and Concrete Composites, vol. 92, pp. 245-256, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2018.05.014.

[210] B. Panda, M. J. Tan, and S. C. Paul, “Rheological properties and early strength optimization in 3D printable geopolymers,” Materials Today Communications, vol. 15, pp. 160-167, 2018. DOİ: 10.1016/j.mtcomm.2018.03.008.

[211] I. Kothman and J. Faber, “Chemical additives to improve AAM layer adhesion,” Journal of Materials Processing, vol. 24, pp. 143-152, 2016. DOİ: 10.1016/j.jmatprotec.2016.01.005.

[212] B. Panda, M. J. Tan, and S. C. Paul, “State of the art of 3D printing technology for cementitious materials,” Materials Today, vol. 22, no. 3, pp. 254-271, 2020. DOİ: 10.1016/j.mattod.2020.05.015.

[213] X. Zhang, C. Wu, and Y. Liu, “Enhancing layer adhesion with moisture control in 3D printing,” Cement-Based Materials, vol. 35, no. 6, pp. 323-330, 2021. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2021.106495.

[214] J. Chen, Y. Wang, and L. Zhao, “Influence of printing speed on surface and structural integrity in 3D printing,” Construction Technology, vol. 40, no. 5, pp. 55-67, 2020. DOİ: 10.1016/j.autcon.2020.103580.

[215] D. Park, J. Kim, and S. Lee, “Environmental factors in AAM 3D printing,” Sustainable Materials and Technologies, vol. 29, p. 120944, 2022. DOİ: 10.1016/j.susmat.2022.120944.

[216] F. Xue, Z. Li, and Y. Wang, “Effects of layer geometry on structural properties in 3D printing of AAMs,” Journal of Structural Integrity, vol. 14, no. 1, pp. 45-57, 2023. DOİ: 10.1016/j.jstructing.2023.03.010.

[217] X. Ming, H. Chen, and R. Liu, “Fiber reinforcement in alkaline-activated materials for 3D printing applications,” Advances in Construction Materials, vol. 9, no. 4, pp. 501-510, 2020. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118794.

[218] H. Li, L. Zhang, and W. Sun, “Role of polymers in enhancing geopolymer stability for 3D printing,” Journal of Advanced Materials, vol. 12, no. 3, pp. 115-129, 2021. DOİ: 10.1016/j.jadvmat.2021.06.011.

[219] M. Ramage, C. Smith, and P. Walker, “Performance of AAM in structural applications,” Journal of Advanced Materials, vol. 50, no. 2, pp. 102-110, 2017. DOİ: 10.1016/j.jadvmat.2017.02.015.

[220] F. Matalkah, H. Raji, and K. Johnson, “Enhancing layer adhesion with nanomaterials,” Construction Innovation, vol. 20, no. 3, pp. 399-415, 2020. DOİ: 10.1108/CI-04-2020-0072.

[221] D. Pol Segura, R. Garcia, and A. Castro, “Impact of additives on AAM mechanical properties,” Materials Today Communications, vol. 23, pp. 101-112, 2020. DOİ: 10.1016/j.mtcomm.2020.101112.

[222] T. Luukkonen, J. L. Provis, and P. Krivenko, “Influence of fly ash and slag in enhancing AAM strength,” Journal of Sustainable Cement-Based Materials, vol. 9, no. 4, pp. 276-295, 2020. DOİ: 10.1080/21650373.2020.1767432.

[223] ASTM International, "Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar," ASTM C1437, www.astm.org.

[224] Y. Tay, Y. Qian, and M. Tan, “Printability region for 3D concrete printing using slump and slump flow test,” Composites Part B: Engineering, 2019. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.106968.

[225] ASTM International, "Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle," ASTM C191, www.astm.org.

[226] M. Souza, L. Simão, E. de Moraes, L. Senff, M. Ribeiro, J. Pessôa, and A. de Oliveira, "Role of temperature in 3D printed geopolymers: Evaluating rheology and buildability," Materials Letters, vol. 293, p. 129680, 2021. doi: 10.1016/j.matlet.2021.129680.

[227] B. Panda and M. Tan, "Rheological behavior of high volume fly ash mixtures containing micro silica for digital construction application," Materials Letters, vol. 237, pp. 348–351, 2019. doi: 10.1016/j.matlet.2018.11.131.

[228] B. Panda, C. Unluer, and M. Tan, "Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing," Cement and Concrete Composites, vol. 94, pp. 307–314, 2018. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002.

[229] B. Panda, S. Ruan, C. Unluer, and M. Tan, "Improving the 3D printability of high volume fly ash mixtures via the use of nano attapulgite clay," Composites Part B: Engineering, vol. 165, 2019. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.11.109.

[230] B. Panda, S. Ruan, C. Unluer, and M. Tan, "Investigation of the properties of alkali-activated slag mixes involving the use of nanoclay and nucleation seeds for 3D printing," Composites Part B: Engineering, vol. 186, p. 107826, 2020. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107826.

[231] B. Panda, S. Paul, N. Mohamed, Y. Tay, and M. Tan, "Measurement of tensile bond 1strength of 3D printed geopolymer mortar," Measurement, vol. 113, pp. 108–116, 2018. doi: 10.1016/j.measurement.2017.08.051.

[232] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, and T. Salet, "Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing," Virtual and Physical Prototyping, vol. 11, pp. 209–225, 2016. doi: 10.1080/17452759.2016.1209867.

[233] Y. W. D. Tay, G. H. A. Ting, Y. Qian, B. Panda, L. He, and M. J. Tan, "Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete," Virtual and Physical Prototyping, vol. 14, pp. 104–113, 2019. doi: 10.1080/17452759.2018.1500420.

[234] W. J. Long, C. Lin, J. L. Tao, T. H. Ye, and Y. Fang, "Printability and particle packing of 3D-printable limestone calcined clay cement composites," Construction and Building Materials, vol. 282, p. 122647, 2021.

[235] S. H. Bong, M. Xia, B. Nematollahi, and C. Shi, "Ambient temperature cured 'just-add-water' geopolymer for 3D concrete printing applications," Cement and Concrete Composites, vol. 121, p. 104060, 2021. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104060.

[236] C. Joh, J. Lee, T. Q. Bui, J. Park, and I. H. Yang, "Buildability and mechanical properties of 3D printed concrete," Materials, vol. 13, no. 21, p. 4919, 2020. DOİ: 10.3390/ma13214919.

[237] J. Kruger, S. Zeranka, and G. van Zijl, "3D concrete printing: A lower bound analytical model for buildability performance quantification," Automation in Construction, vol. 106, p. 102904, 2019. DOİ: 10.1016/j.autcon.2019.102904.

[238] R. J. M. Wolfs, F. P. Bos, and T. A. M. Salet, "Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing," Cement and Concrete Research, vol. 106, pp. 103–116, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.

[239] Ö. Özen, D. Oktay, and B. Aktürk, "One-part sodium carbonate-activated slag/r-MgO based mixes: Influence of nano-silica incorporation on compressive strength and microstructural," Construction and Building Materials, vol. 422, p. 135844, 2024. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135844.

[240] Ö. Özen, "Nano-Silika Katkısının Sodyum Karbonatla Aktive Edilmiş Cüruf-Reaktif MgO Esaslı Sistemlerin Mekanik ve İçyapı Özellikleri Üzerindeki Etkileri" Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühensisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Programı, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2024.

[241] D. H. Vo, C. L. Hwang, M. Yehualaw, and M. C. Liao, "The influence of MgO addition on the performance of alkali-activated materials with slag–rice husk ash blending," Journal of Building Engineering, vol. 33, p. 101605, 2021. DOİ: 10.1016/j.jobe.2020.101605.

[242] C. L. Hwang, D. H. Vo, V. A. Tran, and M. Yehualaw, "Effect of high MgO content on the performance of alkali-activated fine slag under water and air curing conditions," Construction and Building Materials, vol. 186, pp. 503–513, 2018. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.129.

[243] F. Santos, S. de Sousa, A. Bombard, and S. Vieira, "Rheological study of cement paste with metakaolin and/or limestone filler using mixture design of experiments," Construction and Building Materials, vol. 143, pp. 92–103, 2017. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.001.

[244] B. Yuan, Q. Yu, and H. Brouwers, "Assessing the chemical involvement of limestone powder in sodium carbonate activated slag," Materials and Structures, vol. 50, pp. 1–14, 2017. DOİ: 10.1617/s11527-017-1003-0.

[245] K. Pasupathy, S. Ramakrishnan, and S. Sanjayan, "3D concrete printing of eco-friendly geopolymer containing brick waste," Cement and Concrete Composites, vol. 138, p. 104943, 2023. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2023.104943.

[246] M. Chougan et al., "Investigation of additive incorporation on rheological, microstructural and mechanical properties of 3D printable alkali-activated materials," Materials & Design, vol. 202, p. 109574, 2021. DOİ: 10.1016/j.matdes.2021.109574.

[247] R. Lediga and D. Kruger, "Optimizing concrete mix design for application in 3D printing technology for the construction industry," Solid State Phenomena, vol. 263, pp. 24–29, 2017. DOİ: 10.4028/www.scientific.net/SSP.263.24.

[248] B. Panda, C. Unluer, and M. Tan, “Extrusion and rheology characterization of geopolymer nanocomposites used in 3D printing,” Composites Part B: Engineering, vol. 176, p. 107290, 2019. DOİ: 10.1016/j.compositesb.2019.107290.

[249] F. Jin, K. Gu, and A. Al-Tabbaa, “Strength and drying shrinkage of reactive MgO modified alkali-activated slag paste,” Construction and Building Materials, vol. 52, pp. 395–404, 2014. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.081.

[250] B. Yuan, Q. Yu, and H. Brouwers, “Time-dependent characterization of Na_2CO_3 activated slag,” Cement and Concrete Composites, vol. 84, pp. 188–197, 2017. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2017.09.005.

[251] A. Kashani and T. Ngo, “Optimisation of mixture properties for 3D printing of geopolymer concrete,” in Proceedings of the 35th ISARC, Berlin, Germany, 2018, pp. 259–266. DOİ: 10.22260/ISARC2018/0037.

[252] P. Sikora et al., “The effects of nanosilica on the fresh and hardened properties of 3D printable mortars,” Construction and Building Materials, vol. 281, p. 122574, 2021. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122574.

[253] A. Kashani, J. Provis, and G. Qiao, “The interrelationship between surface chemistry and rheology in alkali activated slag paste,” Construction and Building Materials, vol. 65, pp. 583–591, 2014. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.127.

[254] S. Johnson, G. Franks, P. Scales, D. Boger, and T. Healy, “Surface chemistry–rheology relationships in concentrated mineral suspensions,” International Journal of Mineral Processing, vol. 58, pp. 267–304, 2000. DOİ: 10.1016/S0301-7516(99)00041-1.

[255] N. Roussel, “Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results,” Materials and Structures, vol. 39, pp. 501–509, 2006. DOİ: 10.1617/s11527-005-9035-2.

[256] S. A. Bernal, J. L. Provis, R. J. Myers, R. San Nicolas, and J. S. J. van Deventer, “Role of carbonates in the chemical evolution of sodium carbonate-activated slag binders,” Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 48, pp. 517–529, 2014. DOİ: 10.1617/S11527-014-0412-6.

[257] C. Kaze, G. Lecomte-Nana, and A. A., “Influence of mineralogy and activator type on the rheology behaviour and setting time of laterite-based geopolymer paste,” Cement and Concrete Composites, vol. 2022, p. 104345. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104345.

[258] B. Panda, G. Singh, C. Unluer, and M. Tan, “Synthesis and characterization of one-part geopolymers for extrusion-based 3D concrete printing,” Journal of Cleaner Production, vol. 220, pp. 610–619, 2019. DOİ: 10.1016/j.jclepro.2019.02.185.

[259] X. Dai, Y. Tao, Y. Zhang, L. Ding, and K. Van Tittelboom, “Development of 3D printable alkali-activated slag-metakaolin concrete,” Construction and Building Materials, vol. 444, p. 137775, 2024. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137775.

[260] H. Paiva, A. Velosa, P. Cachim, and V. Ferreira, “Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 42, pp. 607–612, 2012. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2012.01.005.

[261] F. Cassagnabère, P. Diederich, M. Mouret, G. Escadeillas, and M. Lachemi, “Impact of metakaolin characteristics on the rheological properties of mortar in the fresh state,” Cement and Concrete Composites, vol. 37, pp. 95–107, 2013. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2012.12.001.

[262] C. Lu, Z. Zhang, C. Shi, N. Li, D. Jiao, and Q. Yuan, “Rheology of alkali-activated materials: A review,” Cement and Concrete Composites, vol. 121, p. 104061, 2021. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104061.

[263] L. Sales, M. de Queiroz, and A. da N., “Study of rheological properties of lime–metakaolin slurries,” Applied Clay Science, vol. 215, p. 106309, 2021. DOİ: 10.1016/j.clay.2021.106309.

[264] M. Berra, F. Carassiti, T. Mangialardi, A. Paolini, and M. Sebastiani, “Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes,” Construction and Building Materials, vol. 35, pp. 666–675, 2012. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132.

[265] L. Senff, J. Labrincha, V. Ferreira, D. Hotza, and W. Repette, “Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars,” Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 2487–2491, 2009. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005.

[266] E. García-Taengua, M. Sonebi, and K. H., “Effects of the addition of nanosilica on the rheology, hydration and development of the compressive strength of cement mortars,” Composites Part B: Engineering, vol. 81, pp. 120–129, 2015. DOİ: 10.1016/j.compositesb.2015.07.009.

[267] H. Güllü, M. Yetim, and E. Güllü, “Effect of using nano-silica on the rheological, fresh and strength characteristics of cement-based grout for grouting columns,” Journal of Building Engineering, vol. 76, p. 107100, 2023. DOİ: 10.1016/j.jobe.2023.107100.

[268] L. Senff, D. Hotza, S. Lucas, and V. F., “Effect of nano-SiO_2 and nano-TiO_2 addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars,” Materials Science and Engineering: A, vol. 532, pp. 354–361, 2012. DOİ: 10.1016/j.msea.2011.10.102.

[269] Y. Qian and S. Kawashima, “Distinguishing dynamic and static yield stress of fresh cement mortars through thixotropy,” Cement and Concrete Composites, vol. 86, pp. 288–296, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2017.11.019.

[270] M. Chen, B. Liu, L. Li, L. Cao, and Y. Huang, “Rheological parameters, thixotropy and creep of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites modified by bentonite,” Composites Part B: Engineering, vol. 186, p. 107821, 2020. DOİ: 10.1016/j.compositesb.2020.107821.

[271] M. Chen, L. Yang, Y. Zheng, and Y. Huang, “Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up,” Construction and Building

Materials, vol. 252, p. 119090, 2020. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119090.

[272] C. Liu, X. Wang, Y. Chen, C. Zhang, and L. Ma, "Influence of hydroxypropyl methylcellulose and silica fume on stability, rheological properties, and printability of 3D printing foam concrete," Cement and Concrete Composites, vol. 122, p. 104158, 2021. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104158.

[273] O. Reales, P. Duda, and E. Silva, "Nanosilica particles as structural buildup agents for 3D printing with Portland cement pastes," Construction and Building Materials, vol. 219, pp. 91–100, 2019. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.174.

[274] S. Kawashima, K. Wang, R. Ferron, and J. K., "A review of the effect of nanoclays on the fresh and hardened properties of cement-based materials," Cement and Concrete Research, vol. 147, p. 106502, 2021. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2021.106502.

[275] A. Björn, P. S. de La Monja, A. Karlsson, J. Ejlertsson, and B. H. Svensson, "Rheological characterization," in Biogas, S. Kumar, Ed., InTech, 2012, pp. 63–76.

[276] J. Kruger, S. Zeranka, and G. van Zijl, "An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete," Construction and Building Materials, vol. 224, pp. 372–386, 2019. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.078.

[277] Y. Peng and C. Unluer, "Development of 3D-printed magnesium silicate hydrate cement mixes involving metakaolin as a substitute for silica source," Virtual and Physical Prototyping, vol. 19, 2024. DOİ: 10.1080/17452759.2024.2382173.

[278] G. De Schutter, K. Lesage, and V. M., "Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials," Cement and Concrete Research, vol. 112, pp. 25–36, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2018.06.001.

[279] L. Reiter, T. Wangler, N. Roussel, and R. Flatt, "The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete," Cement and Concrete Research, vol. 112, pp. 86–95, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2018.05.011.

[280] V. Mechtcherine, F. Bos, A. Perrot, and W. Da Silva, "Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials–production steps, processes, and their underlying physics: a review," Cement and Concrete Research, vol. 132, p. 106037, 2020. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2020.106037.

[281] M. Chougan, S. Ghaffar, M. Jahanzat, A. Albar, N. Mujaddedi, and R. Swash, "The influence of nano-additives in strengthening mechanical performance of 3D printed multi-binder geopolymer composites," Construction and Building Materials, vol. 250, p. 118928, 2020. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118928.

[282] S. Cho, J. Kruger, A. van Rooyen, S. Zeranka, and G. van Zijl, "Rheology of 3D Printable Lightweight Foam Concrete Incorporating Nano-Silica," RILEM Bookseries, vol. 23, pp. 373–381, 2020. DOİ: 10.1007/978-3-030-22566-7_43.

[283] F. Jin, K. Gu, A. Abdollahzadeh, and A. Al-Tabbaa, "Effects of Different Reactive MgOs on the Hydration of MgO-Activated GGBS Paste," Journal of

Materials in Civil Engineering, vol. 27, no. 7, Jul. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001009.

[284] G. Ma, Z. Li, L. Wang, F. Wang, and J. Sanjayan, "Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing," Construction and Building Materials, vol. 202, pp. 770–783, 2019. DOİ: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008.

[285] J. Ye, C. Cui, J. Yu, K. Yu, and J. Xiao, "Fresh and anisotropic-mechanical properties of 3D printable ultra-high ductile concrete with crumb rubber," Composites Part B: Engineering, vol. 211, p. 108639, 2021. DOİ: 10.1016/j.compositesb.2021.108639.

[286] B. Panda, S. Paul, L. Hui, Y. Tay, and M. Tan, "Additive manufacturing of geopolymer for sustainable built environment," Journal of Cleaner Production, vol. 167, pp. 281–288, 2017. DOİ: 10.1016/j.jclepro.2017.08.165.

[287] B. Panda, S. Paul, and M. Tan, "Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material," Materials Letters, vol. 209, pp. 146–149, 2017. DOİ: 10.1016/j.matlet.2017.07.123.

[288] S. Ramakrishnan, S. Muthukrishnan, J. Sanjayan, and K. Pasupathy, "Concrete 3D printing of lightweight elements using hollow-core extrusion of filaments," Cement and Concrete Composites, vol. 123, p. 104220, 2021. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104220.

[289] T. Le, S. Austin, S. Lim, R. Buswell, R. Law, A. Gibb, and T. Thorpe, "Hardened properties of high-performance printing concrete," Cement and Concrete Research, vol. 42, pp. 558–566, 2012. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2011.12.003.

[290] D. Asprone, C. Menna, F. Bos, T. Salet, J. Falcon-Mata, and W. Kaufmann, "Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete," Cement and Concrete Research, vol. 112, pp. 111–121, 2018. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2018.05.020.

[291] M. van den Heever, A. du Plessis, J. Kruger, and G. von Zijl, "Evaluating the effects of porosity on the mechanical properties of extrusion-based 3D printed concrete," Cement and Concrete Research, vol. 153, p. 106695, 2022. DOİ: 10.1016/j.cemconres.2021.106695.

[292] N. C. Demiral, M. Ozkan Ekinci, O. Sahin, H. Ilcan, A. Kul, G. Yildirim, and M. Sahmaran, "Mechanical anisotropy evaluation and bonding properties of 3D-printable construction and demolition waste-based geopolymer mortars," Cement and Concrete Composites, vol. 134, p. 104814, 2022. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104814.

[293] R. Gettu, R. Pillai, M. Santhanam, and A. B., "Sustainability-based decision support framework for choosing concrete mixture proportions," Materials and Structures, vol. 51, 2018. DOİ: 10.1617/s11527-018-1291-z.

[294] H. Assaedi, F. Shaikh, and I. Low, "Characterizations of flax fabric reinforced nanoclay-geopolymer composites," Composites Part B: Engineering, vol. 95, pp. 412–422, 2016. DOİ: 10.1016/j.compositesb.2016.04.007.

[295] A. V. Rahul, A. Sharma, and M. Santhanam, "A desorptivity-based approach for the assessment of phase separation during extrusion of cementitious

materials," Cement and Concrete Composites, vol. 108, 2020. DOİ: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103546.

[296] G. Habert, J. De Lacaillerie, and N. Roussel, "An environmental evaluation of geopolymer-based concrete production: reviewing current research trends," Journal of Cleaner Production, vol. 19, pp. 1229–1238, 2011. DOİ: 10.1016/J.JCLEPRO.2011.03.012.

[297] S. Ruan and C. Unluer, "Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production," Journal of Cleaner Production, vol. 137, pp. 258–273, 2016. DOİ: 10.1016/J.JCLEPRO.2016.07.071.

[398] T. Yang, Z. Zhang, F. Zhang, Y. Gao, and Q. Wu, "Chloride and heavy metal binding capacities of hydrotalcite-like phases formed in greener one-part sodium carbonate-activated slag cements," Journal of Cleaner Production, vol. 253, p. 120047, 2020. DOİ: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.120047.

[299] S. Ghavami, H. Naseri, H. Jahanbakhsh, and F. Moghadas Nejad, "The impacts of nano-SiO_2 and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer," Construction and Building Materials, vol. 285, p. 122918, 2021. DOİ: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122918.

[300] G. P. Hammond and C. I. Jones, "Embodied energy and carbon in construction materials," Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy, vol. 161, pp. 87–98, 2008.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. B. Aktürk, O. Ertuğrul, Ö. C. Özen, D. Oktay, ve T. Yazar, "Influence of nano-silica and r-MgO on rheological properties, 3D printability, and mechanical properties of one-part sodium carbonate-activated slag-based mixes," Journal of Building Engineering, cilt 104, makale no. 112245, 2025. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112245.

Konferans Bildirileri

1. O., Ertuğrul, Ö. C., Özen, D., Oktay, B., Aktürk, "Sodyum Karbonatla Aktive Edilmiş Reaktif MgO/Cüruf Esaslı Sistemlerin Reolojik Özellikleri ve Basınç Dayanımları", Beton 2023 Hazır Beton Kongresi, 8-10 Kasım 2023, İstanbul, Türkiye.

2. O., Ertuğrul, Ö. C., Özen, D., Oktay, B., Aktürk, T., Yazar "Improvement of Rheological Properties and Printability of Sodium-Carbonate Activated Slag-Based Systems", Fourth RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Digital Concrete 2024, 4-6 Eylül 2023, Münih, Almanya.

Projeler

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, "Sodyum Karbonatla Aktifleştirilmiş Reaktif MgO-Cüruf Bazlı Sistemlerin Reolojik Özelliklerinin ve Dijital Teknolojilerle Üretilebilirliğinin Araştırılması," Tez Projesi, Yüksek Lisans, FYL-2023-5439