

**NANOMALZEME İÇEREN METAKAOLİN VE UÇUCU KÜL
TABANLI 3B YAZICI İLE ÜRETİLEN GEOPOLİMER
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MAKSUT SELOĞLU

OCAK 2024

DİYARBAKIR

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANOMALZEME İÇEREN METAKAOLİN VE UÇUCU KÜL
TABANLI 3B YAZICI İLE ÜRETİLEN GEOPOLİMER
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MAKSUT SELOĞLU

DİCLE ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM-ÖĞRETİM VE SINAV
YÖNETMELİĞİNİN BİR PARÇASI OLARAK
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALINDA
DOKTORA TEZİ
OLARAK HAZIRLANMIŞTIR

OCAK 2024

DİYARBAKIR

**NANOMALZEME İÇEREN METAKAOLİN VE UÇUCU KÜL TABANLI 3B
YAZICI İLE ÜRETİLEN GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE
DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Maksut SELOĞLU tarafından Dicle Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin bir parçası olarak hazırlanan bu çalışma, aşağıda bilgileri yazılı jüri üyeleri tarafından değerlendirilerek **İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Neslihan DALKILIÇ
Müdür, **Fen Bilimleri Enstitüsü**

Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ
Danışman, **İnşaat Mühendisliği Bölümü,**
Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Harun TANYILDIZI
İkinci Danışman, **İnşaat Mühendisliği Bölümü,**
Fırat Üniversitesi

Sınav Jürisi:

Prof. Dr. Erkut SAYIN (*)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ (**)
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Kadir TURAN
Makine Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dicle Üniversitesi

Doç. Dr. Onur ONAT
İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnönü Üniversitesi

ONAY

Savunma Tarihi: 09 / 01 / 2024

(*) Jüri Başkanı
(**) Tez Danışmanı

Aileme...



Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tez çalışmasında yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bahse konu bu kural ve ilkelerin gerektirdiği üzere, bu çalışmada özgün olmayan tüm bilimsel içerikleri kurallara uygun biçimde alıntılıyıp kaynak gösterdiğimi beyan ederim. Beyanımınla çelişen herhangi bir delil bulunduğu takdirde tüm sorumluluğu üstleneceğimi kabul ederim.

Ad, Soyad: Maksut SELOĞLU

İmza:

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmamın fikir aşamasından son aşamasına kadarki süreçte bilgisi, birikimi, tecrübesiyle daima bana rehberlik eden, değerli katkılarını sunan ve yardımlarını esirgemeyen ikinci danışman hocam Prof. Dr. Harun TANYILDIZI'na can-ı gönülden çok teşekkür ederim. Tez süresince çalışmamın daha nitelikli hale gelmesi için desteğini esirgemeyen ve her zaman çözüm odaklı olan danışman hocam Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ'ye çok teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince hazırladığım raporları değerlendirerek çalışmamın daha nitelikli hale gelmesini sağlayan tez izleme jüri üyelerim Prof. Dr. Kadir TURAN'a ve Dr. Öğr. Üyesi Senem YILMAZ ÇETİN'e çok teşekkür ederim.

Doktora sürecimde özellikle laboratuvar çalışmalarında beni hep destekleyen Dr. Öğr. Üyesi Ahmet COŞKUN'a ve teknik olarak her sorunda çözüm odaklı olan Öğr. Gör. Taner DURMAZ'a çok teşekkür ederim. Tez çalışmama yapmış olduğu olumlu eleştirilerinden, yönlendirmelerinden ve motivasyonumu daima diri tutmalarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Fahrettin Burak DEMİR'e, Öğr. Gör. Dr. Mustafa ALBAYRAK'a ve Arş. Gör. Dr. Çağrı KAYMAK'a ve de doktora tez yazım sürecinde manevi desteğinden ötürü kıymetli dostum Kenan SÜTÇÜ'ye can-ı gönülden teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince her türlü fedakarlığı gösteren eşim Meliha SELOĞLU'na, zaman zaman ihmal ettiğim can parem kızım Zerem Neşve'ye ve oğlum Yağız Hazar'a teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak hayatımın her aşamasında verdikleri sonsuz desteklerden dolayı değerli anneme, babama, ablama ve kardeşime sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. GEOPOLİMER.....	6
2.1 Bağlayıcılar	8
2.2 Agregalar.....	9
2.3 Alkali Aktivatörler	10
2.4 Kimyasal ve Puzolanik Katkılar.....	10
2.5 Kür Koşulları.....	11
2.6 Geopolimerlerin Avantajları	12
2.7 Geopolimerlerin Durabilitesi	13
2.8 Nanomalzemeler	15
2.8.1 Çok duvarlı karbon nanotüp (MW-CNT)	17
2.8.2 Nano silis (nano-SiO ₂)	18
2.8.3 Diğer nanomalzemeler	20
2.9 Üç Boyutlu (3B) Yazıcı	25
2.9.1 3B yazıcı ile geopolimer üretim süreci	27
2.9.2 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harcın sahip olması gereken genel özellikler.....	29

2.9.3	3B geopolimer harçların reolojik özellikleri ve test yöntemleri	32
3.	MALZEME VE YÖNTEM	36
3.1	Kullanılan Malzemeler	36
3.1.1	Bağlayıcılar	36
3.1.2	Alkali aktivatörler	37
3.1.3	Kimyasal ve puzolanik katkıları.....	38
3.1.4	Nanomalzemeler	38
3.2	Geopolimer Harcın Karışım Oranları.....	40
3.3	3B Geopolimer Harç Numuneleri Hazırlama Prosedürü	41
3.4	3B Geopolimer Harçlara Uygulanan Mekanik Deneyler.....	43
3.4.1	Eğilme dayanımı	44
3.4.2	Basınç dayanımı	45
3.4.3	Ultrases geçiş hızı testi.....	46
3.5	3B Geopolimer Harçlara Uygulanan Durabilite Deneyleri.....	46
3.5.1	Donma-çözülme deneyi	47
3.6	3B Geopolimer Harçların Mikro Yapısal Analizleri.....	47
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	50
4.1	3B Geopolimer Harçların Reolojik Deney Sonuçları	50
4.1.1	Akış tablası deney sonuçları.....	51
4.1.2	İnşa edilebilirlik deney sonuçları	52
4.1.3	Yayılma tablası deney sonuçları	54
4.1.4	Viskozite deney sonuçları	55
4.2	3B Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri.....	56
4.2.1	Eğilme dayanımı sonuçları.....	56
4.2.2	Basınç dayanımı sonuçları	58
4.2.3	Ultrases geçiş hızı sonuçları.....	61
4.3	3B Geopolimer Harçların Donma-Çözülme Deney Sonuçları.....	61
4.3.1	Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı sonuçları	62

4.3.2	Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları	64
4.3.3	Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerin UPV sonuçları	65
4.3.4	Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerin ağırlık değışimleri	66
4.4	3B Geopolimer Harçların Mikro Yapı Analizi Sonuçları	68
5.	SONUÇLAR	78
	KAYNAKLAR	80
	ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Geopolimer bağlayıcı üretimi [39].....	8
Şekil 2.2 Geopolimer kompozit üretiminde kullanılan bazı kaynak malzemeler [41]...	8
Şekil 2.3 Geleneksel yöntem ve 3B yazıcı teknolojisi ile otomatik yapı üretiminin karşılaştırılma şeması [106].....	26
Şekil 2.4 Akışkanlık test yöntemleri [50].....	33
Şekil 3.1 Alkali aktivatörler.....	37
Şekil 3.2 Viskozite düzenleyici katkı maddesi.....	38
Şekil 3.3 MW-CNT.....	39
Şekil 3.4 Nano-SiO ₂	40
Şekil 3.5 a) NS, b) M-CNT içeren alkaliler ultrasonik karıştırıcıda.....	41
Şekil 3.6 a) 3B yazıcı ile geopolimer harç üretimi, b) 3B yazıcının şematik gösterimi.....	42
Şekil 3.7 3B yazıcı ile laboratuvarıda üretilmiş geopolimer harç numuneleri.....	43
Şekil 3.8 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunesi.....	44
Şekil 3.9 Eğilme dayanımı test numunesi.....	44
Şekil 3.10 Basınç dayanımı test numuneleri	45
Şekil 3.11 Basınç dayanımı presinde test numunesi	46
Şekil 3.12 Donma-çözölmeye maruz kalan harç numuneleri	47
Şekil 3.13 SEM analizleri için kaplama yapılan cihaz.....	48
Şekil 3.14 SEM-EDX analizlerinin yapıldığı cihaz.....	48
Şekil 3.15 XRD analizlerinin yapıldığı cihaz.....	49
Şekil 4.1 3B yazıcı ile üretilen nanomalzeme içeren geopolimer harç numuneleri....	50
Şekil 4.2 Akış tablası şematik çizim ve deney aşamalarına ait temsili görseller [146].....	51
Şekil 4.3 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların akışkanlık indeksleri.....	52
Şekil 4.4 İnşa edilebilirlik deneyin detaylarını gösteren şematik çizim ve deney aşamalarına ait temsili görseller [146]	53
Şekil 4.5 3B geopolimer harçların inşa edilebilirlik deney sonuçları.....	53
Şekil 4.6 3B geopolimer harçların yayılma tablası deney sonuçları.....	54
Şekil 4.7 3B geopolimer harçların viskozite-açısız dönme hızı değişim sonuçları.....	55
Şekil 4.8 3B geopolimer harçların viskozite sonuçları.....	56

Şekil 4.9 3B geopolimer harçların eğilme dayanımı sonuçları.....	57
Şekil 4.10 3B geopolimer harçların basınç dayanımı sonuçları.....	58
Şekil 4.11 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların UPV deney sonuçları.....	61
Şekil 4.12 Donma-çözülme deneyine maruz bırakılan numuneler	62
Şekil 4.13 Donma-çözölmeye maruz kalmış numuneler	62
Şekil 4.14 Donma-çözölme sonrası numunelerin eğilme dayanımı sonuçları	63
Şekil 4.15 Donma-çözölme sonrası numunelerin basınç dayanımı sonuçları	64
Şekil 4.16 Donma-çözölme sonrası numunelerin UPV deney sonuçları	66
Şekil 4.17 3B geopolimer harçların ağırlık değişimleri (%)	67
Şekil 4.18 K serisinin SEM/EDX sonuçları	68
Şekil 4.19 M-CNT 1 serisinin SEM/EDX sonuçları	69
Şekil 4.20 M-CNT 3 serisinin SEM/EDX sonuçları	70
Şekil 4.21 NS 3 serisinin SEM/EDX sonuçları	71
Şekil 4.22 NS 1 serisinin SEM/EDX sonuçları	72
Şekil 4.23 K serisinin XRD sonuçları	73
Şekil 4.24 M-CNT 1 serisinin XRD sonuçları	73
Şekil 4.25 M-CNT 3 serisinin XRD sonuçları	74
Şekil 4.26 NS 1 serisinin XRD sonuçları	75
Şekil 4.27 NS 3 serisinin XRD sonuçları	76

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Bağlayıcı türünün bazı reolojik özellikler üzerinde etkisi [43].	29
Tablo 2.2 3B yazıcı ile üretilen taze harcın ve betonun sahip olması gereken genel özellikler [110].	30
Tablo 3.1 MK özellikleri.	36
Tablo 3.2 UK özellikleri.	37
Tablo 3.3 Sodyum hidroksit (SH) çözeltisinin ve sodyum silikat (SM)'in özellikleri.	38
Tablo 3.4 MW-CNT'nin genel özellikleri.	39
Tablo 3.5 NS'nin genel özellikleri.	40
Tablo 3.6 Geopolimer harç karışım oranları	40

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge	Açıklama
%	Yüzde
°C	Santigrat derece
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
NASH	Sodyum Alüminyum Silikat Hidrat
CASH	Kalsiyum Alüminyum Silikat Hidrat
TiO ₂	Titanyum oksit
T ₃₀	Titanyum oksit
CuO	Bakır oksit
CaCO ₃	Kalsiyum karbonat
KOH	Potasyum hidroksit
NaOH	Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum silikat
K ₂ SiO ₃	Potasyum silikat
MPa	Mega Pascal
Pa	Pascal
M	Molarite
Mm	Milimetre
CaO	Kalsiyum oksit
Ca(OH) ₂	Kalsiyum hidroksit
SiO ₂	Silisyum dioksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
W/mk	Watt/metre kelvin derecesi
g	Gram
Kg/m ³	Kilogram/metreküp
cm ² /g	Santimetrekare/gram
g/cm ³	Gram/santimetreküp

Kısaltma

Açıklama

MW-CNT

Çok duvarlı karbon nano tüp

Nano-SiO₂

Nano silisyum dioksit

Nano-ZnO

Nano çinko oksit

Nano-TiO₂

Nano titanyum dioksit

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

EDX

Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

XRD

X-Işını Toz Kırınımı Analizi

UK

Uçucu kül

MK

Metakaolin

D-Ç

Donma-çözülme

UPV

Ultrases geçiş hızı

TS

Türk Standartları

CAD

Bilgisayar Destekli Tasarım

TS-EN

Türk Standartları Avrupa Normu

ASTM

American Society for Testing and Materials

GGBFS

Granüle Yüksek Fırın Cürufu

3B

3 Boyutlu

SH

Sodyum Hidroksit Çözeltisi

SM

Sodyum silikat

AAÇ/B

Alkali Aktivatör Çözeltisi/Bağlayıcı

D_{max}

Maksimum Agrega Boyutu

ÖZET

NANOMALZEME İÇEREN METAKAOLİN VE UÇUCU KÜL TABANLI 3B YAZICI İLE ÜRETİLEN GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SELOĞLU, Maksut

Doktora, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ

İkinci Danışman: Prof. Dr. Harun TANYILDIZI

Ocak 2024, 112 sayfa

Çok büyük özgül yüzey alanına sahip olan ve kimyasal aktiviteleri oldukça yüksek olan nano boyutlu malzemeler, çok az miktarda bile geopolimer harçlara eklendiklerinde mekanik dayanım ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadırlar. Bu doktora tez çalışmasında, farklı nanomalzemeler içeren 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların mekanik dayanım ve donma-çözülme durabilite özellikleri araştırılmıştır. Kompozitlerde bağlayıcı olarak metakaolin (MK) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit çözeltisi (NaOH) kullanılmıştır. Tezde nanomalzemeler olarak çok duvarlı karbon nanotüp (MW-CNT) ve nano- SiO_2 (NS) kullanılmıştır. Nanomalzeme içermeyen geopolimer harç numuneleri kontrol numuneleri olarak belirlenmiş ve 3B yazıcı ile ağırlıkça %0,25, %0,5 ve %0,75 oranlarda MW-CNT ve NS içeren geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Üretilmiş olan tüm numuneler 7, 28 ve 90 gün boyunca 20 ± 2 °C laboratuvar koşullarında kür edilmiştir. Kürü tamamlanan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numuneleri, mekanik dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Nanomalzeme içeren bütün 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin mekanik dayanımı test sonuçları kontrol numunelerine göre artış göstermiştir. En yüksek mekanik dayanım NS içeren 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinden elde edilmiştir. Bu numuneleri MW-CNT içeren geopolimer harç numuneleri takip etmiştir. Ayrıca 20 ± 2 °C laboratuvar koşullarında 28 gün kür edilmiş tüm numuneler, TS EN 15177 standartına göre donma-çözülme durabilitesine maruz bırakılmıştır. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin donma-çözülme durabilitesine maruz bırakılmadan önceki ve maruz bırakıldıktan sonraki mekanik özellikleri de karşılaştırılmıştır. Donma-çözülme durabilitesi sonrası en yüksek mekanik dayanım NS içeren geopolimer harç numunelerinden elde edilmiş ve numune %97,26 dayanımını korumuştur. Bu numuneleri MW-CNT içeren 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numuneleri takip etmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç, çok duvarlı karbon nanotüp (MW-CNT), nano- SiO_2 , donma-çözülme durabilitesi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF GEOPOLYMER MORTARS PRODUCED WITH A 3D PRINTER BASED ON METAKAOLIN AND FLY ASH CONTAINING NANOMATERIAL

SELOĞLU, Maksut

Ph.D., Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ

Co-Supervisor: Prof. Dr. Harun TANYILDIZI

January 2024, 112 pages

Nano-sized materials, which have a very large specific surface area and have very high chemical activities, contribute to the improvement of mechanical strength and durability properties when added to geopolymer mortars even in small amounts. This Ph.D. thesis study investigated the mechanical strength and freeze-thaw durability properties of geopolymer mortars produced with a 3D printer containing different nanomaterials. Metakaolin (MK) and fly ash (FA) were used as binders in the composites. Sodium metasilicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide solution (NaOH, 12 M.) were used as alkali activators. Multi-walled carbon nanotube (MW-CNT), and nano- SiO_2 (NS) were used as nanomaterials in the thesis. Geopolymer mortar samples without nanomaterials were determined as control samples and 3D-printed geopolymer mortar samples containing 0,25%, 0,5%, and 0,75% MW-CNT, and NS were produced. All produced samples were cured at 20 ± 2 °C laboratory conditions for 7, 28, and 90 days. The cured 3D-printed geopolymer mortar samples were subjected to mechanical strength tests. The mechanical strength test results of all 3D-printed geopolymer mortar samples containing nanomaterials showed an increase compared to the control samples. The highest mechanical strength was obtained from 3D-printed geopolymer mortar samples containing NS. These samples were followed by geopolymer mortar samples containing MW-CNT. In addition, all samples cured at 20 ± 2 °C laboratory conditions for 28 days were exposed to freeze-thaw durability according to TS EN 15177 standard. The mechanical properties of geopolymer mortar samples produced with a 3D printer before and after exposure to freeze-thaw durability were also compared. The highest mechanical strength after freeze-thaw durability was obtained from geopolymer mortar samples containing NS and the sample preserved its strength of 97,26%. These samples were followed by geopolymer mortar samples produced with a 3D printer containing MW-CNT.

Keywords: 3D-printed geopolymer mortar, multi-walled carbon nanotube (MW-CNT), nano- SiO_2 , freeze-thaw durability

1. GİRİŞ

Harç ve beton, dünyada özellikle inşaat sektöründe en sık kullanılan yapı malzemesidir. Betonun en önemli ana bileşeni ve bağlayıcısı olan çimento, dünyadaki CO₂ salınımlarının %7'sine neden olmaktadır [1, 2]. Ayrıca çimento üretimi 1400-1500°C gibi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilebildiği için, önemli ölçüde enerji gereksinimini de zorunlu kılmaktadır. Enerji fiyatlarındaki artış çimento üretim maliyetini de artırmaktadır. Çimentonun miktarı, dozajı ve teknik özellikleri betonun maliyetini, performansını ve işlenebilirliğini doğrudan etkiler. Bu durumda kullanılan çimento miktarını azaltmaya, beton maliyetini düşürmeye ve betonu daha sürdürülebilir hale getirmeye yönelik araştırmalarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü vb. kullanılmıştır. Mekanik özellikleri ve dayanımı artırabilecek endüstriyel atık malzemelerin yeniden kullanımı ortaya çıkarılmıştır [3, 4]. Ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı çimentoya alternatif bağlayıcı arayışları son zamanlarda ciddi bir önem kazanmıştır. Bu durumda geopolimer adı verilen çimentoya alternatif bir kompozit malzeme ön plana çıkmış ve her geçen gün yaygın kullanım alanı bularak yapı teknolojisi sektöründe kendine yer edinmiştir. Geopolimerler, doğal ve atık puzolanların çeşitli alkali aktivatörler ile aktif hale getirilmesiyle oluşturulan alümina silikat tipi bağlayıcı malzemelerdir. Geopolimer üretiminin çimento üretimine göre %80 daha az CO₂ salınıma neden olduğu [5-7] ve %60 enerji tasarrufu sağladığı çeşitli kaynaklarda defalarca belirtilmiştir [8, 9]. Geopolimer harç veya beton, üretim sürecinde atık malzeme olarak değerlendirilen bileşenlerden bir veya birkaçını kullanan ve çevreye zarar vermeyen harç veya beton olarak tanımlanmaktadır. Literatür araştırmalarına göre geopolimer harç veya beton çevre dostu bir beton türü olarak bilinse de "çimentosuz" yani çimento içermeyen beton anlamına da gelmektedir. Geopolimerler, alkali çözünür alüminyum silikattan yapılmış üç boyutlu Si-O-Al çerçeveli inorganik malzemelerdir [10]. Geopolimer harç veya beton üretiminde puzolanik özellikli ve sınırlı depolama alanlarına sahip endüstriyel atıkların kullanılması, onun çevre dostu beton olarak bilinmesine neden olmaktadır. Geopolimer, düşük enerji tüketimi ve düşük CO₂ salınımları gibi sürdürülebilirlik nitelikleri ile bazı uygulamalarda çimentoya alternatif bir bağlayıcı haline gelmiştir. Hatta kireç ve çimentodan sonra geopolimer üçüncü nesil bağlayıcı olarak düşünülmeye başlanmıştır. Endüstriyel atıkların çimento yerine kullanılabilmesi, çimento tüketimini azaltmakta ve harç veya betonun fiziksel ve

mekanik özelliklerine olumlu katkılar sağlamaktadır. Ayrıca üstün performansa ve uzun ömürlülüğe de sahiptir [11]. Uçucu kül (UK), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atıklar, pişmiş killeri ve şeyiller, metakaolin (MK) gibi ısıtıl işlem görmüş malzemeler, volkanik küller, traslar ve diatomit topraklar gibi doğal puzolanlar, volkanik camı yapıda bir kayaç türü olan ve sünger taşı olarak da bilinen pomza ve volkanik bir kayaç olan öğütülmüş perlit gibi malzemeler alkali aktivatörlerle aktive edilerek geopolimer harçlar üretilebilmektedir.

Son zamanlarda yapı sektörüne, yeni bir teknoloji olan 3 boyutlu (3B) yazıcılar dahil olmuştur. Chuck Hull'un 1983 yılında ilk olarak icat ettiği katman kontrolüne sahip otomatik bir üretim prosesi olan 3B yazıcı ile üretim, son yıllarda hızlı bir gelişme göstermiştir. 3B yazıcı ile otomatik yapı üretim teknolojisi, robotik temelli olup katmanlı bir üretim teknolojisidir [12]. Bu üretim teknolojisi, özel mimari tasarım elemanları ya da büyük ölçekli yapı elemanlarını kalıp kullanmaksızın katman şeklinde üretebilmeye olanak sağlamaktadır. Bir bileşenin geometrik karmaşıklığı 3B yazıcıda önem taşımamakta ve üretim sürecine herhangi bir ek maliyet getirmemektedir. 3B yazıcıda kullanılan harçta farklı malzemelerin kullanılabilmesi, kalıpsız serbest biçimli yapıların oluşturulması, daha az insan gücüne rağmen daha hızlı üretilebilmesi ve inşaat maliyetini azaltması katman tabanlı üretim tekniğini geleneksel döküme göre daha avantajlı kılmaktadır. 3B yazıcı ile üretim teknolojileri, maliyeti en aza indirmek, zaman tasarrufu sağlamak, çevre kirliliğini azaltmak, şantiyelerde yaralanma ve ölümleri azaltmak gibi sayısız fayda ile hem mimari hem de yapısal tasarım için özgürlük sağlar [13]. Bu teknik, kalıp kullanmadan serbest şekil yapımını kolaylaştırmak için dijital teknolojiyi ve yeni sonuçları birleştirir [13, 14]. İnşaat sektöründe ve özellikle beton teknolojisinde geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında tasarım özgürlüğü sağlaması, inşaat süresinin kısılması, insan gücünün azalması, daha az malzeme israfı ve daha az atık madde açığa çıkması, ekonomik ve pratik olması nedenlerinden dolayı 3B yazıcı ile üretim teknolojisine ilgi artmaktadır [15].

Nanoteknoloji, yeni özelliklere ve işlevlere sahip malzemeler üretmek amacıyla nanometre düzeyinde (1-100 nm.) maddenin ifadesi olup, üstün özelliklere ve yüksek performansa sahip yeni malzemeler geliştirmek için ortaya çıkan alanlardan biridir

[16]. Yapı malzemelerinin özellikleri nanomalzemeler kullanılarak daha da iyileştirilebilir. Nano boyutlu malzemeler, daha büyük boyutlara sahip aynı ürünlerden tamamen farklı olan üstün fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikleri nedeniyle geopolimer harçların mekanik dayanım özelliklerini geliştirmektedir [17]. Nanomalzemelerin geopolimer harçlara ilavesi, metakaolin (MK) ve silis dumanı gibi mikro esaslı malzemelerin etkisine benzer bir etkiye sahip olup, mekanik dayanım özelliklerini geliştirmektedir [18]. Homojen dağılım sağlandığı takdirde, kullanılan malzeme tipi ve oranına bağlı olarak mekanik ve durabilite özellikleri yüksek kompozit malzemeler üretilmektedir. Küçük dane boyutlarına sahip nanomalzemeler, çok büyük özgül yüzey alanlarına sahip oldukları için kimyasal aktiviteleri oldukça yüksektir. Bu yüksek reaktivite özelliği ve malzemelerin filler etkisi ile gözenekleri doldurma mekanizmaları sayesinde yüksek mikro-yapı yoğunluğu elde edilmektedir. Nanomalzeme ilavesi harçların hem erken yaş, hem de ileri yaş basınç dayanımını artırır ve agrega ile çimento hamuru ara yüzeyini iyileştirir. Bu nedenle nanomalzemelerin geopolimer harçların ve betonların mekanik özelliklerinde iyileşmelere yol açtığı görülmüştür [19-21]. Geopolimer harçlara, mekanik özelliklerini geliştirmek için nanomalzemeler eklenmiştir. Birçok özellik, kullanılan farklı nanomalzemelere göre değişmektedir. Teorik olarak alüminosilikat sınıfına giren tüm malzemeler alkallerle aktive edilip bağlayıcılık özelliği gösterebilir. Ancak, nanomalzemelerin fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikleri geopolimer bağlayıcının davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu açıdan kullanılacak nanomalzemenin özelliklerinin bilinmesi ortaya çıkacak geopolimer bağlayıcının performansının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir [22]. En yaygın olarak geopolimer harçlara eklenen nanomalzeme, yüksek bir aktiviteye sahip olan nano-SiO₂'dir. Nano-SiO₂ (NS), çözeltideki alkali aktivatörler ile reaksiyona girerek ve gözenek yapısını iyileştirmek için jeller meydana getirerek geopolimer harçların mekanik özelliklerini iyileştirmekte [23] ve geopolimer harçların kireçlenmesini önlemektedir [24]. NS kullanımının geopolimer harçlarda mekanik özellikleri iyileştirmesi ayrıca yüksek puzolanik aktivitesinden ve filler etkisinden kaynaklanmaktadır [25]. Literatürde ağırlıkça farklı hacimsel oranlarda kuru ve ıslak karıştırma yöntemiyle kompozite eklenen NS içeren geopolimer harç ve beton üretilen birçok çalışma mevcuttur [26, 27]. Özellikle bağlayıcı oluşumunun ilk aşamalarını ve dolayısıyla mekanik performansı etkileyen %1 hacimsel oranda NS içeren geopolimer

kompozitler [9, 21, 28-31] yüksek mekanik dayanım sonuçları vermiştir. Uçucu küller, silisli ve alüminli amorf yapıya sahip çok ince taneli malzemeler olmaları nedeniyle puzolanik özellik göstermektedir. Metakaolin (MK) ise yüksek miktarda amorf silis içermesi nedeniyle ve özel üretimi ile geopolimer harç ve beton üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. MK, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve su ile reaksiyona girerek C-S-H jel oluşumunu sağlayarak geopolimere yüksek dayanım kazandırır. Literatürde, farklı nanomalzeme içeren metakaolin (MK) ve uçucu kül (UK) tabanlı geopolimer harçların mekanik dayanımlarının ve durabilite özelliklerinin karşılaştırıldığı çalışmalar sınırlıdır. Ayrıca, farklı nanomalzeme içeren MK-UK tabanlı 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların mekanik dayanım ve donma-çözülme durabilite özelliklerinin incelendiği bir çalışmaya literatürde rastlanılamamıştır. Bu tez çalışmasında %0, %0,25, %0,50 ve %0,75 hacimsel karışım oranlarında farklı nanomalzemeler içeren, MK ve UK eşit miktarda bağlayıcı olarak kullanılarak ve alkaliler ile aktive edilerek 3B geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Bu amaçla çok duvarlı karbon nanotüp (MW-CNT) ve nano silisyum dioksit (nano- SiO_2) dört farklı hacimsel oranlarda kompozite eklenerek 3B geopolimer harçlar üretilmiş ve hem kendi aralarında, hem de nanomalzeme içermeyen kontrol numuneleri ile mekanik dayanım ve durabilite özellikleri karşılaştırılmıştır. Üretilen harç numuneleri 7, 28 ve 90 gün oda sıcaklığında küre tabi tutulduktan sonra mekanik özellikleri (eğilme ve basınç) incelenmiştir. Durabilite özelliklerini karşılaştırmak amacıyla 3B yazıcı ile üretilen nanomalzeme içermeyen, üç farklı hacimsel oranlarda ve iki farklı nanomalzeme kullanılarak üretilen geopolimer harç numuneleri donma-çözülme durabilitesi testlerine maruz bırakılmıştır. Donma-çözölmeye maruz bırakılan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin donma-çözölme sonrası mekanik dayanımları, ultrases geçiş hızı sonuçları ve ağırlık değişimleri tespit edilip, incelenmiş ve diğer numune serileri ile detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca numunelerin mikroyapısal analizleri yapılarak nanomalzemelerin 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç içerisindeki mikroyapıya olan katkıları incelenmiştir.

Literatürde, farklı nanomalzeme içeren metakaolin (MK) ve uçucu kül (UK) tabanlı 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların mekanik ve durabilite özelliklerini inceleyen bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Bu doktora tezinin amacı, farklı nanomalzemeler ile kalıp kullanılmadan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç

numunelerin reolojik, mekanik ve durabilite özelliklerini araştırmaktır. Tez çalışmasının ikinci bölümünde geopolimer ana başlığı altında, geopolimerler ve özellikleri, nanomalzemeler ve yapı sektöründe kullanımları, 3B yazıcıların yapı sektöründeki yeri ve 3B yazıcı ile geopolimerlerin üretim süreci ve genel özellikleri verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, malzeme ve yöntem ana başlığı altında tezde kullanılan bütün malzemeler ve nanomalzemeler özellikleri ile birlikte verilmiştir. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların karışım oranları, numune hazırlama prosedürleri ve kür koşulları bu bölüm içerisinde aktarılmıştır. Son olarak 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerine uygulanan deneyler ve deney prosedürleri verilmiştir. Dördüncü bölümde, bulgular ve tartışma ana başlığı altında 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerine uygulanan deneylere ait sonuçlar detaylı olarak verilmiştir. Tezin beşinci ve son bölümünde ise, dördüncü bölümde yapılan tüm deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen veriler genel olarak değerlendirilmiştir.

2. GEOPOLİMER

Geopolimerler, doğal ve atık puzolanların çeşitli alkali aktivatörler ile aktive edilmesiyle oluşan alümin silikat tipi bağlayıcı malzemelerdir. Geopolimer harç ve beton, atık malzeme olarak kabul edilen bileşenlerden bir veya birkaçını kullanan veya üretim sürecinde çevreye zarar vermeyen malzeme olarak tanımlanır. Literatür araştırmalarına göre geopolimer harç ve beton, çevreci bir beton çeşidi olarak bilinmekle birlikte “without cement” yani çimentosuz beton anlamına da gelir. Geopolimer üretiminin çimento üretiminden %80 daha az CO₂ salınımına yol açtığı ve %60 oranında enerji tasarrufu sağladığı çeşitli kaynaklarda ifade edilmiştir [8, 9, 32]. Aynı zamanda geopolimer bağlayıcıların hidratasyonu sonucunda C₃A ve Ca(OH)₂ gibi ürünler oluşmadığından, geopolimer bağlayıcılı harçların durabilite özellikleri de geleneksel çimento ile üretilen harçlardan daha iyi olmaktadır.

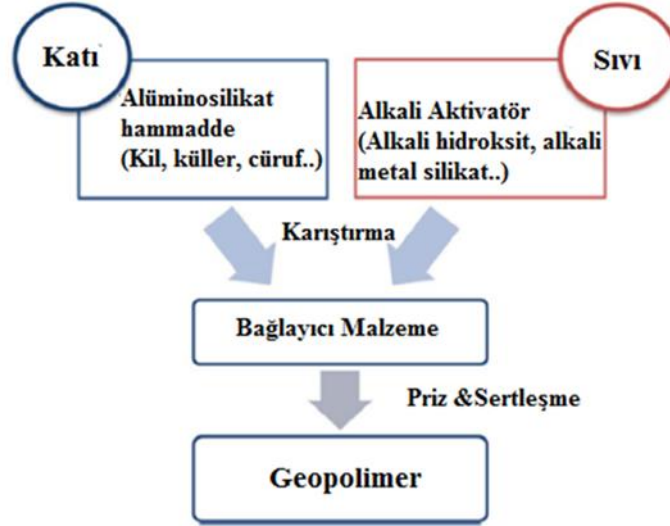
Geopolimerleri ilk olarak 1978’de Prof. J. Davidovits tanımlamış ve sınıflandırmıştır. Davidovits’e göre geopolimer; doğal mineralli malzemelerin kimyasal kompozisyonlarının ve kristal yapılarının çeşitli yöntemlerle değiştirilmesi ile elde edilen malzemeler grubudur. Bu yöntemler sonucunda geopolimer hem kristal yapıda hem de amorf yapıda olabilmektedir. Silis ve alümin içerikli malzemelerin alkali ortamda jeolojik oluşumlu kayalara benzer şekilde bağlayıcılık özelliği gösteren malzemeler laboratuvar ortamında üretilmiştir. Kısacası geopolimerler doğal kayalarla benzer özellikler göstermektedir [33].

Dünya çapında birçok geopolimer teknolojisi ürünü yaygın olarak üretilmekte ve bazı ülkelerde bu ürünlerin üretimi ve dağıtımı (patentleri de alınarak) yapılmaktadır. Fransa’da yüksek sıcaklıkta yüksek teknolojik geopolimer kompozit malzemeler üretilmekte, otomotiv ve uçak endüstrisinde kullanılmaktadır. Almanya’da geopolimer köpük, yangına dayanıklı ve asitli ortama dirençli geopolimer malzeme, yanmaya dirençli geopolimer boya ve bağlayıcı malzeme olarak geopolimerler kullanılmaktadır. Avustralya’da uçucu kül ve cüruf kaynak malzemeleri kullanılarak üretilen geopolimer beton üstyapıda, geopolimer teknolojisi ile üretilen betonarme borular çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. İrlanda’da rüzgar değirmeni enerjisi ve uzay alanında yüksek sıcaklıkta kompozit araçlar kullanılmaktadır. Amerika’da geo-köpük adında (geo-foam) geopolimer köpük çimento uygulamaları yapılmakta, hafif ağırlıklı

ve yangına dirençli özellikte üretimi yapılmaktadır. Amerika’da zemin düzenlemelerinde geopolimer harç kullanılmakta ve geopolimer seramik kompozitler yüksek sıcaklıkta üretilmektedir. Asite dirençli geopolimer beton ve doğal mineral tabanlı geopolimer üretimi düşük karbon emisyonu ile yüksek dayanımlı geopolimer teknolojisi de Amerika’da kullanılmaktadır. Singapur’da prekast geopolimer paneller üretilmektedir. Çin’de yangına dayanıklı geopolimer kompozit panel üretimi yapılmaktadır. Rusya’da 3B yazıcı teknolojisini ile geopolimer harç inşaat alanında özellikle de zemin kaplamalarında ve yüzey tesviye uygulamalarında kullanılmaktadır. İngiltere’de yüksek tehlikeli nükleer, kimyasal ve radyoaktif atık alanında çeşitli kapsülleme için özel bir geopolimer teknik uygulaması yapılmaktadır. Brezilya’da iç ve dış mekan için mimari alanında, dekoratif amaçlı geopolimer bağlayıcı panel teknolojisi kullanılmaktadır. Belçika’da düşük sıcaklıkta priz alan geopolimerler kullanılmaktadır [34].

Dünya genelinde geopolimerler ile ilgili özellikle on altı genel araştırma başlığı bulunmaktadır. Bunlar geopolimerin polimerik özellikleri, polimerik silikat çözeltiler, metakaolin bazlı geopolimerler, kaya ve silika bazlı geopolimerler, uçucu kül, fosfat, organik mineral tabanlı geopolimerler, uzun süre durabilite gösterebilen geopolimerler, fiber kompozit geopolimerler, seramik üretiminde geopolimerler, geopolimer çimentonun üretimi, inşaat uygulamaları için 3B yazıcı ile üretilen geopolimer formüle etme yöntemi, radyoaktif atıklar, partiküller ve gaz salınımı için geopolimer malzemeler ve geopolimer betondur [35]. Geopolimerler, doğal puzolanların NaOH ve Na₂SiO₃ solüsyonuyla aktive edilmesiyle oluşan alümin silikat tipi maddelerdir. Geopolimerlerin moleküler yapısı alümin silikat ağlarından oluşur. Son yıllarda araştırmacılar genellikle; geopolimer çimento üretiminde ham maddeler üzerinde çalışmaktadırlar. Geopolimer çimentolar, portland çimentolarıyla kıyaslandığında ileri mühendislik özellikleri sergileyen aktive edilmiş bir malzeme grubudur. Yüksek basınç dayanımı, priz süresinin kısılması ve boşluk oranının azalması gibi konularda betonun ve harcın performansını iyileştirebildiği birçok araştırmada belirtilmiştir. Geopolimer kompozit üretiminde kullanılan toplam enerji, normal portland çimentosu üretimindeki kullanılan enerjiye göre yaklaşık %40 daha az olmaktadır [36, 37]. Bu malzemelerin eşsiz özelliklerinden bazıları erken yüksek dayanımı ve düşük büzülmenin yanında, donma-çözölmeye, sülfat etkisine ve

korozyona karşı dayanıklılıktır. Ayrıca, geopolimer hava kirliliğinin azalmasına da önemli katkıda bulunmaktadır [38]. Şekil 2.1’de geopolimer bağlayıcı üretiminin şematik bir gösterimi verilmiştir [39, 40]. Geopolimer kompozit üretiminde kullanılan bazı kaynak malzemeler ise Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Geopolimer bağlayıcı üretimi [39]



Şekil 2.2 Geopolimer kompozit üretiminde kullanılan bazı kaynak malzemeler [41]

2.1 Bağlayıcılar

Bu tez çalışmasında 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçlarda bağlayıcı olarak metakaolin ve uçucu kül kullanılmıştır. Metakaolin kullanımı ile daha düşük gözenekliliğe ve daha yüksek dayanıma sahip geopolimer kompozitler üretilebilmektedir. 3B yazıcı ile geopolimer üretiminde ince agrega taneciklerinin metakaolin ile kaplanması ve metakaolinin alkali aktivatörler ile tepkimeye girmesi

geopolimer bağlayıcı matrisin oluşumunu kolaylaştırmaktadır [42]. Metakaolin kullanımının artmasıyla karışımların inşa edilebilirliğinin arttığı da gözlemlenmiştir. Genel olarak, yüksek akma gerilmesine ve düşük viskoziteye sahip geopolimer malzemeler 3B yazıcı ile üretim için uygundur. 10-15 dakika baskı süresi ve 0,6-1 kPa akma gerilmesi aralığı, geopolimer karışımının ekstrüde edilebilirliği için uygun kabul edilmiştir [43]. Genel olarak uçucu kül kullanımının, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer karışımların akma gerilmesini ve viskozitesini azalttığı belirtilmiştir [44]. Ancak uçucu kül kullanım oranının ve inceliğinin geopolimer karışımlarının reolojik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği birçok araştırmada belirtilmiştir. Uçucu kül kullanım oranının düşük olmasının ve uçucu külün tane boyutu dağılımının artması karışımların akma gerilmesini azalttığı, yüksek kullanım oranlarının ise akma gerilmesi değerini artırdığı görülmüştür [45, 46]. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer numunelerde en sık kullanılan bağlayıcı türü düşük kalsiyumlu F sınıfı uçucu küllerdir. Bunun nedeni yaygın olarak bulunabilmeleri, yüksek silisyum ve alüminyum oksit içermeleridir [47].

2.2 Agregalar

3B yazıcı ile üretilen geopolimer kompozitlerde kullanılan agrega tipi ve büyüklüğü basınç dayanımında önemli bir parametredir. Nozül çapı genel olarak 20-40 mm aralığında olduğu için kullanılan agrega boyutunun 4-6 mm aralığında kullanılması tercih edilmektedir [48]. Ancak, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç karışımlarında daha estetik olması ve düzgün (pürüzsüz) bir yüzey oluşturması nedeniyle ince agrega (0-2 mm) kullanılması önerilmektedir [49]. Kaba agrega kullanımının, karışımların ekstrüzyon işleminden sonra işlenebilirlikte önemli bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. Ekstrüde edilebilirliği etkilemeden dahil edilebilecek kaba agrega içeriğinin hacimce %30 olduğu ve bu değerden sonraki her artışın sıvı faz ayrışmasından dolayı ekstrüde edilebilirliği olumsuz etkilediği görülmüştür. Maksimum dane çapı 8 mm olan kaba agrega kullanılan 3B yazıcı ile üretilen karışımlarda 10 katmana kadar başarıyla 3B yazıcı ile karışım üretimi gerçekleştirilmiştir [50]. Ancak nozül tıkanmalarını önlemek için, ince agrega kullanımı ile dane çapı azaltılarak 1-2 mm dane boyutlu agregalar 3B yazıcı ile üretimde kullanılmaktadır [50].

2.3 Alkali Aktivatörler

3B yazıcı ile üretilen geopolimer karışımlarında kullanılan alkali aktivatörler genel olarak hidroksit çözeltileri ve silikatlar olarak gruplandırılmaktadır [47]. Hidroksit çözeltileri olarak sodyum hidroksit (NaOH), kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ve potasyum hidroksit (KOH), silikat olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) alkali aktivatörler olarak kullanılmaktadır. Sodyum bazlı aktivatör içeren 3B yazıcı ile üretilen geopolimerler, potasyum bazlı aktivatör içeren 3B yazıcı ile üretilen geopolimerlere göre daha yüksek işlenebilirlik, daha yüksek basınç dayanımı ve daha düşük akma gerilmesi özelliklerine sahiptir [51]. Aktivatör tipi ile birlikte molarite ve alkali aktivatör oranı da geopolimerlerin reolojisi ve mekanik dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Geopolimer hammaddelerin aktivasyonu için sıklıkla tercih edilen alkali aktivatör, kolay bulunabilirliği ve viskozitesi nedeniyle sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve cam suyu olarak adlandırılan sodyum silikattır (Na_2SiO_3).

2.4 Kimyasal ve Puzolanik Katkılar

3B yazıcı ile üretilen harç karışımlarında kullanılan kimyasal katkılar akıcı kıvam oluşturmak ve yüksek akışkanlık özelliği karışımlara kazandırmak için önemli bir parametredir. Kimyasallar 3B yazıcı ile üretilen karışımların bazı özelliklerini değiştirerek performanslarını artırmak ve maliyeti azaltmak için kullanılmaktadır [49]. 3B yazıcı ile üretilen karışımlarda en çok kullanılan kimyasal katkıların yüksek oranlı su azaltıcı katkıları, viskozite düzenleyici katkıları ve priz kontrol edici katkıları olduğu görülmektedir [52]. Ekstrüzyon kapasitesini ve baskı kalitesini artırmak için hemen hemen tüm 3B karışımlarda yüksek oranda su azaltıcı katkıların kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu katkıların 3B karışımlarının akma gerilmesini ve viskozitesini düşürerek ekstrüzyonu kolaylaştırdığı ve baskı kalitesini artırdığı belirtilmiştir. Viskozite düzenleyici katkıları ve nano kil, nano silis gibi organik olmayan katkıların ekstrüzyon sonrası şekil stabilitesini, kohezyonu ve viskoziteyi arttırmak için kullanıldığı görülmüştür. Alt katın üzerine gelecek olan katın ağırlığını taşıyabilmesi için hızlı bir şekilde priz alması gerekir. Bunun için de 3B karışımlarda priz hızlandırıcı katkıları kullanılmaktadır. Priz süresinin azalması 3B karışımların yazdırılabilirliğini olumsuz yönde etkiler ve nozülü tıkararak kalıcı hasara neden olabilir. Bu durumda da priz geciktirici katkıları kullanılarak sorun çözümlenmelidir. 3B

harç karışımlarda katkı kullanımı çok önemli ve hassas bir konudur. Olumlu etki de, olumsuz etki de yapabilir. Bu nedenle kullanılan katkı ile karışımın uyumu, katkının eklenme yöntemi, kullanım oranı ve katkı türü seçimi özenle yapılmalıdır. Bir ekstrüzyon harcının tiksotropisi, süper akışkanlaştırıcı ve viskozite düzenleyici katkı maddelerinin birlikte karışıma eklenmesiyle iyileştirilebilir. Harç nozülünden ilerledikten sonra aniden inşa edilebilirlik kazanabilir. 3B harçlarının ekstrüde edilebilirliğini ve inşa edilebilirliğini dengelemek için alternatif bir çözüm stratejisi olarak uygulanabilir. Geleneksel harçtan (betondan) farklı olarak, 3B harç (beton), doğası gereği biraz çelişkili olan ekstrüde edilebilirlik (düşük viskozite) ve inşa edilebilirlik (yüksek akma gerilmesi) gibi özelliklere sahip olmalıdır. Bu nedenle, karışım tasarımında kimyasalların ve katkıların stratejik kullanımının dikkate alınması önemlidir [53]. Rahul ve arkadaşları [54] nano kil, silis dumanı ve viskozite artırıcı katkıların kullanımının karışımların akma gerilmesinde artışa neden olduğu ve karışımların inşa edilebilirliğini olumlu yönde etkilediğini vurgulamışlardır. Viskozite artırıcı katkı ve silis dumanı ilavesinin sert ve kararlı bir karışımla sonuçlandığı da gözlemlenmiştir. En yavaş yapı oluşumu gösteren karışımın viskozite artırıcı katkı içeren karışım ve en hızlı yapısal yapılanma gösteren karışımın ise silis dumanı içeren karışımın olduğu görülmüştür. Kullanılan bazı kimyasal katkı maddeleri bor nitrür, sodyum karboksimetil nişasta, attapulgit kili, magnezyum alümino silikat, sükroz, grafen oksit, polietilen glikol, nano grafit olarak sıralanabilir [47].

2.5 Kür Koşulları

3B yazıcı ile üretilen harç karışımlarında ortam koşullarında (20 ± 2 °C) [42, 55-57] yüksek sıcaklıkta (40-100 °C) kürleme [58-62] ve mikrodalga kürü [63, 64] yapılmaktadır. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer karışımlarda yüksek sıcaklıkta kürleme (40-100 °C), genellikle ortam sıcaklığında kürlemeye göre daha yüksek mekanik dayanım elde edilmesine olanak sağlamaktadır [47]. 60 °C'de kür edilen 3B yazıcı ile üretilen geopolimer numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları 57,6 MPa iken, eğilme dayanımı 11 MPa olarak bulunmuştur [60]. Pompalama ve ekstrüzyon, düşük viskoziteye ve akma gerilmesine sahip bir karışıma ihtiyaç duyarken, sonraki katmanların gerilmelerinden kaynaklanan çökme veya deformasyonu en aza indirmek için betonun üretim yoluyla yüksek bir akma mukavemetine sahip olması gerekmektedir [57]. Mikrodalga kürü ile 10 saniyede inşa edilebilirlik deformasyon

olmadan gerçekleşirken, filamentler 10 saniye ısıtılarak geopolimer deformasyona uğramadan kolayca ekstrüzyon sağlanmaktadır [63].

2.6 Geopolimerlerin Avantajları

Geopolimer kompozitlerin, imento bağlayıcılı harçlara göre daha hafif, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olduğu bilinmektedir. Bunlara ek olarak geopolimerlerin pek çok avantajları vardır [37]:

1. Hammadde kaynaklarının çokluğu: Alkali özeltide çözünen silikat veya alüminli silikatlar doğada çok miktarda mevcuttur. Geopolimerler sanayi atıklarından ve doğal puzolanlardan üretilabilmektedirler.
2. Enerji tutumu ve evre korunumu: Geopolimerler, yüksek enerji tüketimi gerektirmezler. Doğal alüminosilikatların 600-800 °C’de ısıtılma süreci, portland çimentosunun harcadığı enerjinin %60’ını kullanarak uygun hammaddeleri sağlar. Az miktarda CO₂ açığa çıkar.
3. Kolay hazırlama yöntemi: Geopolimerler, alüminosilikat reaktif malzemelerin, güçlü alkali çözeltiyle düzenli karışdırılmasıyla basit olarak sentezlenebilir. Daha sonra oda sıcaklığında kür edilir. Kısa sürede kayda değer bir dayanım elde edilir. Bu yöntem çimentolu betonların hazırlanması gibidir.
4. İyi hacim kararlılığı: Geopolimerler imentoların 4/5’inden daha az rötreyle sahiptirler.
5. Erken dayanım kazanımı: Geopolimerler, prizın ilk 4 saatinde nihai basınç dayanımının yaklaşık %70’ini kazanabilirler.
6. Üstün dayanıklılık özelliği: Geopolimer kompozitler, dayanımlarını önemli ölçüde kaybetmeden binlerce yıl çevresel ve dış etkilere karşı dayanabilirler.

7. Düşük ısı iletkenliği ve yüksek sıcaklıklara karşı direnç: Geopolimerler 1200 °C sıcaklıklara kadar önemli bir hasar görmeden direnç gösterebilirler. Isıl iletkenlikleri ise hafif tuğlalara nazaran daha az olup, 0,24 -0,32 W/mK arasındadır [37].

2.7 Geopolimerlerin Durabilitesi

Geopolimerler birçok inşaat uygulaması için uygun olan amorf yapıli malzemelerdir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde geopolimer harçların ve betonların reolojik, fiziksel ve mekanik özellikler bakımından normal Portland çimentolu harçlara ve betonlara göre özellikle daha yüksek değerlere (yüksek basınç dayanımı, yüksek sıcaklık direnci, donma-çözölme direnci gibi) sahip olduğu incelenen çalışmalardan gözlenmiştir. Geopolimer malzemeler üstün reolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerine ek olarak, üstün kimyasal dayanıklılığa sahiptirler. Geopolimer hamurlar ve harçlar sülfat, deniz suyu, asidik ortam ve alkali silika reaksiyonu etkilerine karşı tatmin edici dayanıklılığa sahiptirler [32, 65]. Geopolimer bağlayıcıların hidrasyonu sonucunda C_3A ve $Ca(OH)_2$ gibi ürünler oluşmadığından, geopolimer bağlayıcılı harçların durabilite özelliklerinin de geleneksel çimento ile üretilen harçlardan daha iyi olacağı beklenmektedir. Ayrıca geopolimer harçlar yüksek sıcaklıklara da dayanıklıdır [66]. Bakharev [67], F tipi uçucu kül bazlı geopolimer numuneleri %5 asetik asit ve %5 sülfürik asit ortamlarına maruz bırakmış ve geopolimer numunelerin normal Portland çimentolu numunelere kıyasla daha üstün performans gösterdiklerini incelemelerinde elde etmişlerdir. Lacroix ve arkadaşları [68] NaOH ile aktive edilmiş ve yüksek sıcaklıkta kür edilmiş geopolimer numunelerin en iyi performansı sergilediklerini çalışmalarında belirtmişlerdir.

Betonda gerçekleşen donma-çözölme etkisini açıklamak için birçok teori ileri sürölmüştür. Bunlar arasında en çok hidrolik basınç teorisi ve osmotik basınç teorisi araştırmalarda ön plana çıkmıştır. Betondaki boşlukların içerisinde bulunan su donduğunda henüz donmamış su yaklaşık %9 kadar bir hacim artışı nedeniyle dışarıya doğru hareket etmeye çalışmaktadır. Yani su ne kadar güçlü etkiyle karşılaşır ise buna paralel olarak o kadar fazla hidrolik basınç oluşmaktadır. Betonda bulunan kapiler boşluktaki suyun bir kısmında donma görülürken, diğer kısmında sıvı olarak kalabilmektedir. Bu durumda suyun sıvı ve katı durumları arasında önemli oranda yoğunluk farkı meydana geldiğinden ötürü osmotik basınç oluşmaktadır [69].

Donma-çözülme betonda çatlama, parça kopması, dökülme ve ufalanma şeklinde kendini gösteren en önemli durabilite etkilerinden biridir. Sertleşmiş ve suya doygun haldeki bir beton don etkisi altında kalınca, çimento harcının içindeki kapiler boşluklardaki su donar ve yaklaşık %9 oranında hacimsel olarak genişir. Çözülmeyi takip eden yeniden donma sonrasında bu boşluklar kümülatif olarak artar. Betonun kesiti boyunca çatlaması durumu çok şiddetli ve uzun süreli donma-çözülme etkisine maruz kalan kompozitte görülürken, yüzey hasarları çevremizde en çok karşılaşılan durumdur. Beton taze halde iken don olayının gerçekleşmesi durumunda dayanım kayıpları olabilmektedir. Gerçekte tam priz başlangıcında don olayı tehlikelidir, bu nedenle soğuk havalarda beton dökülürken gerekli önlemler alınmalıdır [70]. Tekrarlanan donma-çözülme döngülerine maruz kalan, gevrek bir malzeme olan beton kritik doygunluk seviyesinde bozulmadan daha çok etkilenecek hasara uğrar [71]. Art arda donma-çözülme maruz kalan yapıya etkisi, çözünme olayının meydana gelmediği uzun süreli don etkisine göre çok daha etkilidir. Bu durum bir önceki donma periyodunda oluşmuş ince bir çatlağın yeniden donma sırasında daha da büyümesiyle ifade edilir. Gerilmelerin çekme mukavemetine ulaştığı bölgelerde çatlaklar oluşur veya var olan çatlaklar daha da genişler. Fakat donma-çözülme döngülerinin tekrarlanması halinde çatlak oluşan betonda, çözülme sırasında boşluklarına daha fazla su girerek ve donma sırasında buz hacmi de artarak daha fazla gerilmeye ve çatlamaya neden olacaktır. Bu çatlaklar daha da genişleyerek birbirleriyle birleşerek adeta bir çatlaklar silsilesi meydana getirecektir [72]. Donma-çözülme döngülerinin devam etmesi ile betondan ufak parça kopması veya betonda dökülme meydana gelir ve bunu betonun tamamen parçalanması takip eder [73].

Donma-çözülme durabilitesine maruz kalan geopolimer harç veya beton numuneler üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Şahin ve arkadaşları [74] 180 donma-çözülme döngüsüne maruz bıraktıkları metakaolin bazlı geopolimer harçların durabilite ve mikroyapı analiz sonuçlarında daha kararlı ve yoğun bir yapı elde ettiklerini belirtmişlerdir. Chakkor ve arkadaşları [75] mermer, kireçtaşı ve bazalt tozu olmak üzere üç farklı dolgu malzemeleri ile MK ve kırmızı çamur tabanlı ürettikleri geopolimer numuneleri 180 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakmışlardır. Kireçtaşı tozu içeren numuneler 180 donma-çözülme döngüsü sonucunda en iyi performans göstermişlerdir. Shamsa ve arkadaşları [76] üç farklı geopolimerin donma-

çözülme durabilitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla numuneler 100, 200 ve 300 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. İncelenen UK tabanlı, MK tabanlı ve granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerlerin donma-çözülme durabiliteleri sırasıyla %77, %68 ve %81 olmuştur. İncelenen geopolimerlerin basınç dayanımı kayıpları ise sırasıyla %23, %43 ve %26 olarak kaydedilmiştir. Sherwani ve arkadaşları [77] UK bazlı kendiliğinden yerleşen geopolimer betonun taze, mekanik ve durabilite özelliklerine cüruf eklenmesinin etkisini incelemişlerdir. %50 cüruf eklenen UK bazlı donma-çözölmeye maruz kalan numunelerin donma-çözölme durabilitesi %79 olmuştur. Bumanis ve arkadaşları [75] çalışmalarında birkaç geopolimerin mekanik ve durabilite özelliklerini karşılaştırmışlardır. MK tabanlı geopolimerlerin, kırmızı kil içeren geopolimerlere göre daha iyi mekanik performans sergilediklerini gözlemlemişlerdir. %10 ila 65 dayanım kaybıyla ve 25 ila 50 donma-çözölme döngüsüne karşı dayanıklı olduğu sonuçlarına varmışlardır. Liang ve arkadaşları [78] çalışmalarında, pirinç kabuğu külü ve silis dumanının donma-çözölme durabilitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlardan, kullanılan bu malzemelerin gözenekli yapıyı iyileştirerek donma-çözölmeye karşı direnç gösterdiğini elde etmişlerdir. Özellikle silis dumanının boşlukları doldurarak tamamlayıcı malzeme görevi gördüğünü, dolayısıyla da donma-çözölme durabilitesini artırdığı görölmüştür. Feng ve arkadaşları [79] çalışmalarında MK tabanlı geopolimerin 25-50 donma-çözölme döngülerine dayanıklı olduğunu belirtmişlerdir.

2.8 Nanomalzemeler

Araştırmacıların nanomalzemelere ve nanopartiküllere olan ilgisi son zamanlarda özellikle inşaat mühendisliği ile ilgili uygulamalarda artmaktadır [80]. Nanokristaller olarak da bilinen nanopartiküllerin boyut aralığı tipik olarak 1-100 nm arasındadır [81]. Nanomalzemelerde daha küçük parçacık boyutları, daha büyük spesifik yüzey alanlarına neden olur. Bu özellik, çok az miktarda kullanılmasının bile zeminin morfolojik yapısını değiştirdiği anlamına gelir. Nanopartiküllerin etkisi nedeniyle nanoteknoloji, zeminin kimyasal ve fiziksel özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [82]. Harçların ve betonların dayanım ve performans özelliklerinin geliştirilmesinde boşluk yapılarının iyileştirilmesi çok büyük öneme sahiptir. Mineral katkı malzemeleri kullanılarak kısmen iyileştirilen boşluk yapılarının, gelişen nano

teknoloji ile birlikte çok daha küçük, özellikle makro ve mezo boyutlardaki değişik nanomalzemeler kullanılarak değişimi son zamanlarda oldukça yaygın olarak araştırılmaktadır [36, 83-85]. Homojen dağılım sağlandığı takdirde, kullanılan malzeme tipi ve oranına bağlı olarak mekanik ve durabilite özellikleri yüksek kompozit numuneler üretilebilmektedir. Nano katkı ilavesi betonun basınç dayanımını artırır ve agregası ile çimento hamuru ara yüzeyini iyileştirir. Bu sebeple nanomalzemelerin geopolimer harçlarda ve betonlarda mikro yapıda iyileşmelere yol açacağı düşünülmektedir. Benzer şekilde yapılan araştırmalarda nano katkıların geopolimerlerin mekanik özelliklerinde iyileşmelere yol açtığı görülmüştür [19-21].

Nanoteknoloji, yeni özelliklere ve işlevlere sahip malzemeler üretmek amacıyla nanometre düzeyinde (1-100 nm.) maddenin ifadesi olup, üstün özelliklere ve yüksek performansa sahip yeni malzemeler geliştirmek için ortaya çıkan alanlardan biridir [21]. Yapı malzemelerinin özellikleri nanomalzemeler kullanılarak daha da iyileştirilebilir. Nano boyutlu malzemeler, daha büyük boyutlara sahip aynı ürünlerden tamamen farklı olan üstün fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikleri nedeniyle geopolimer harçların mekanik dayanım özelliklerini geliştirmektedir [15]. Nanomalzemelerin geopolimer harçlara ilavesi, metakaolin (MK) ve silis dumanı gibi mikro esaslı malzemelerin etkisine benzer bir etkiye sahip olup, mekanik dayanım özelliklerini geliştirmektedir [17]. Homojen dağılım sağlandığı takdirde, kullanılan malzeme tipi ve oranına bağlı olarak mekanik ve durabilite özellikleri yüksek kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Küçük dane boyutlarına sahip nanomalzemeler, çok büyük özgül yüzey alanlarına sahip oldukları için kimyasal aktiviteleri oldukça yüksektir. Bu yüksek reaktivite özelliği ve malzemelerin filler etkisi ile gözenekleri doldurma mekanizmaları sayesinde yüksek mikro-yapı yoğunluğu elde edilmektedir. Nanomalzeme ilavesi harçların hem erken yaş, hem de ileri yaş basınç dayanımını artırır ve agregası ile çimento hamuru ara yüzeyini iyileştirir. Bu nedenle nanomalzemelerin geopolimer harçların ve betonların mekanik özelliklerinde iyileşmelere yol açtığı görülmüştür [19-21]. Geopolimer harçlara, mekanik özelliklerini geliştirmek için nanomalzemeler eklenmiştir. Birçok özellik, kullanılan farklı nanomalzemelere göre değişmektedir. Teorik olarak alüminosilikat sınıfına giren tüm malzemeler alkalilerle aktive edilip bağlayıcılık özelliği gösterebilir. Ancak, nanomalzemelerin fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikleri geopolimer

bağlayıcının davranışını doğrudan etkilemektedir. Bu açıdan kullanılacak nanomalzemenin özelliklerinin bilinmesi ortaya çıkacak geopolimer bağlayıcının performansının belirlenmesi açısından oldukça önemlidir [22]. En yaygın olarak geopolimer harçlara eklenen nanomalzeme, yüksek bir aktiviteye sahip olan nano-SiO₂'dir. Nano-SiO₂ (NS), çözeltideki alkali aktivatörler ile reaksiyona girerek ve gözenek yapısını iyileştirmek için jeller meydana getirerek geopolimer harçların mekanik özelliklerini iyileştirmekte [23] ve geopolimer harçların kireçlenmesini önlemektedir [24]. NS kullanımının geopolimer harçlarda mekanik özellikleri iyileştirmesi ayrıca yüksek puzolanik aktivitesinden ve filler etkisinden kaynaklanmaktadır [25]. Literatürde farklı hacimsel oranlarda kuru ve ıslak karıştırma yöntemiyle kompozite eklenen NS içeren geopolimer harç ve beton üretilen birçok çalışma mevcuttur [26-27]. Uçucu küller, silisli ve alüminli amorf yapıya sahip çok ince taneli malzemeler olmaları nedeniyle puzolanik özellik göstermektedir. Metakaolin (MK) ise yüksek miktarda amorf silis içermesi nedeniyle ve özel üretimi ile geopolimer harç ve beton üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. MK, Ca(OH)₂ ve su ile reaksiyona girerek C-S-H jel oluşumunu sağlayarak geopolimere yüksek dayanım kazandırır. Tez çalışmasında kullanılan nanomalzemeler çok duvarlı endüstriyel sınıf karbon nanotüp (MW-CNT) ve nano silisyum dioksit (nano-SiO₂)'tir. Literatürde nanomalzeme içeren geopolimer kompozitler ile ilgili birçok araştırma bulunmaktadır. Bu araştırmalar alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

2.8.1 Çok duvarlı karbon nanotüp (MW-CNT)

Alvi ve arkadaşları [86] çalışmalarında nano Al₂O₃ (AL-0450) ve bir hidroksil grubu karbon nanotüp (MWCNT-OH) kullanarak ürettikleri kaya bazlı geopolimer kompozitlerin reolojik ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca nanomalzemelerin geopolimer kompozitlerin donma süresine ve mikroyapısına etkisini incelemişlerdir. Nanomalzemeler, geopolimerin viskozitesini artırmıştır. MWCNT-OH, geopolimerin sıvı kaybını azaltmıştır. Bununla birlikte, AL-0450, saf geopolimere göre sıvı kaybını artırmıştır. AL-0450 ve MWCNT-OH'nin her ikisi de saf geopolimerin basınç dayanımını 28 gün sonra 2945 psi'den sırasıyla 4154 psi ve 4274 psi'ye artırmıştır. Çekme dayanımı deney sonuçları, hem AL-0450 hem de MWCNT-OH içeren karışımlarda 7 gün sonra artış gösterirken; 28 gün sonra AL-0450 içeren karışımlarda pek değişim görülmemiştir ve MWCNT-OH içeren

karışımlarda ise saf geopolimer karışımlara göre artış göstermiştir. 7 günlük çekme dayanımı sonuçları AL-0450 nanomalzeme içeren geopolimer numunelerde %123 artış gösterirken, MWCNT-OH nanomalzeme kullanılarak üretilen geopolimer numunelerde %68 artış göstermiştir.

2.8.2 Nano silis (nano-SiO₂)

Phoo-ngernkham ve arkadaşları [19] yaptıkları çalışmada kaynak malzemesi olarak uçucu kül, kullanarak ürettikleri geopolimer numunelerde %1, %2 ve %3 oranlarında katkı olarak nano silis ve nano alümin kullanmışlardır. Normal Portland çimentolu numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri ile uçucu kül içeren geopolimer numunelerin basınç dayanımı değerleri karşılaştırılan çalışmada, nano silis ve nano alümin kullanılan uçucu kül içeren geopolimer numunelerinin basınç dayanımı değerleri normal Portland çimentolu numunelerin basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Geopolimer matrisine ilave SiO₂ ve Al₂O₃ sağlayan ve aynı zamanda mikro dolgu maddesi olarak işlev gören nano partiküllerin, geopolimer matrisinde ilave kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum alüminyum silikat hidrat (C-A-S-H) ve sodyum alüminyum silikat hidrat (N-A-S-H) jelleri ile birlikte yoğun bir geopolimer yapı oluşumuna olanak sağladığını belirtmişlerdir. Behfarnia ve Rostami [87] yaptıkları çalışmada alkali ile aktive edilmiş cüruf esaslı geopolimer betonların basınç dayanımı deney sonuçlarına nano silis ve mikro silis ilavesinin etkisini hem ayrı ayrı, hem de birlikte nano silis ve mikro silis kullanarak araştırmışlardır. Deney sonuçları; mikro silis ve nano silis ilavesinin numunelerin basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir. Bu etkiye bakıldığında, %10 mikro silis ilavesinin 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %24 ve %28 oranlarında arttırırken, nano silis ilavesi bakımından optimum karışım oranı olarak bulunan %3 nano silis ilavesinin numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %12 ve %11 oranlarında arttırdığı gözlenmiştir. Aynı anda %10 mikro silis ve %1 nano silis ilavesi 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %26 ve %10 oranlarında kontrol karışımına kıyasla arttırdığı gözlenmiştir. Bharat [88] yaptığı çalışmada metakaolin (MK), nano silis (SiO₂) ve alkofin (ultra ince cüruf) kullanarak ürettiği düşük kalsiyum uçucu kül esaslı geopolimer harç ve betonun mekanik ve durabilite özelliklerini farklı kür koşullarında araştırmıştır. Nano silisin ilave edilmesi ile silis ve alüminyum fazlarının çözünme oranını iyileştirdiği ve ortam sıcaklığında

mekanik ve durabilite özelliklerini daha da arttırdığı sonucuna ulaşmıştır. Çalışmada %2 oranında nano silis kullanımında en yüksek basınç dayanımı sonucuna varılmıştır. Alkofin, ultra inceliği ve doğal kalsiyum oksit içeriği nedeniyle C-S-H ve geopolimerik jel oluşumunu arttırmış, geçirgen boşluk yüzdesini azaltmıştır. Bu da basınç dayanımını ve durabiliteyi arttırmıştır. Adak ve arkadaşları [89] yaptıkları çalışmada nano silisin uçucu kül esaslı geopolimer harcın dayanımına ve durabilitesine olan etkisini araştırmışlardır. Üç farklı molar konsantrasyonda (8 M, 10 M ve 12 M) ve %0-10 oranlarda nano silis ilave edilerek üretilen geopolimer harç numunelerinde %6 nano silis kullanımı ile yüksek basınç dayanımı ve durabilitede iyileşme görülmüştür. Oda sıcaklığı kür koşullarında 28 günde basınç ve eğilme mukavemeti değerlerinde artma, su emme değerlerinde azalma görülmüştür. Durak ve arkadaşları [90] yaptıkları çalışmada nano silis (SiO_2) ve nano kalsiyum karbonat (CaCO_3) kullanarak ürettikleri uçucu kül içeren geopolimer kompozitlerin işlenebilirlik, dayanım ve mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. Bunun için 24, 48 ve 72 saat boyunca 60, 75 ve 90 °C kür koşullarında 8 M, 10 M ve 12 M konsantrasyonlarda numuneler deneylere tabi tutulmuştur. Nanomalzemelerin kullanılmasıyla işlenebilirlik azalmıştır. UPV değerlerinde artış ve daha yoğun mikroyapı oluşmuştur. 24 saat küre tabi tutulan geopolimer harçların basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde sırasıyla %65 ve %45 artış görülmüştür. Her iki nanomalzeme için de deney sonuçlarından optimum %2 oranında harca ilave edilmesinin uygun olduğu görülmüştür. Nano silis ve nano kalsiyum karbonat kullanımları ile erken yaş mukavemetinde artış görülmüştür. Zidi ve arkadaşları [91] çalışmalarında %0 ve %5 nano silis içeren metakaolin tabanlı geopolimer harcın 24 saat süreyle 20 ve 80°C kür koşullarında 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları üzerinde etkisini incelemiştir. N-A-S-H jeli oluşturan geopolimerizasyon işleminin bir sonucu olarak tüm kür koşullarında basınç dayanımında bir artış açıkça gözlemlenmiştir. %5 nano silis ilavesi, 80°C kür sıcaklığında 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımını %40'tan fazla arttırmıştır. Ancak bu artış 20°C kür sıcaklığında yaklaşık %57 olmuştur. UPV değerleri de basınç dayanımı sonuçlarına paralellik göstermiştir. Ayrıca ilk donma süreleri %5 nano silis içeren geopolimer numunelerde (%0 nano silis) nano silis içermeyen geopolimer numunelere göre 8 kat azalmıştır. Son priz sürelerinin %5 nano silis ilavesiyle 360 dakikadan 45 dakikaya düştüğü görülmüştür. Su emme değeri nano

silis içermeyen geopolimer numunelerde %19 iken, %5 nano silis içeren numunelerde %17'ye düşmüştür.

2.8.3 Diğer nanomalzemeler

Zailan ve arkadaşları [92] çalışmalarında fotokatalizör olarak çinko oksit (ZnO) nanopartiküllerinin doğrudan güneş ışığına maruz kaldığında kendi kendini temizleyen geopolimer harcın mekanik özelliklerini ve fotokatalitik aktivitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Ağırlıkça %2,5, %5, %7,5 ve %10 oranlarında ZnO nanopartikül kullanılarak oluşturulan ZnO içeren geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla 51,61 MPa, 35,56 MPa, 33,2 MPa ve 40,3 MPa olarak bulunmuştur. Görüldüğü gibi maksimum basınç dayanımı (51,61 MPa) ağırlıkça %2,5 oranda ZnO nanopartikül ilave edilen numunelerde elde edilmiştir. Bu da bize gösteriyor ki yüksek oranda nanomalzeme kullanımının geopolimerizasyondan kaynaklı ve bazı kimyasal etkileşimlerden ötürü yüksek basınç dayanımı sonucunu vermemektedir. Bu nedenle optimum nano katkı oranının belirlenmesi en ideal olanıdır. Ağırlıkça %10 ZnO ilavesi, yeni kristalli fazların oluşumuna bağlı olduğuna inanılan geopolimer harcın basınç dayanımı değerini yeniden arttırmıştır. Mikroyapı analiz edildiğinde geopolimerizasyon işlemi sırasında oluşan ZnO'nun kristal fazları, geopolimerik matrisin kristal fazlarını arttırdığından dolayı, basınç dayanımını yeniden artırdığı yorumlanabilir. UV ışığı altında ZnO içeren geopolimer harcın yüzeylerine uygulanan metilen mavisinin fotokatalitik bozunması incelenmiştir. 0, 30, 60, 90, 120 ve 150 dakika boyunca her bir numune deneye tabi tutulmuştur. ZnO içeren geopolimer harcın, ZnO nanopartikülleri içermeyen örneklerle göre fotokatalitik bir performans gösterdiği çalışmada görülmüştür. En iyi performans ağırlıkça %10 ZnO içeren numunelerde sergilenmiştir. Assaedi ve arkadaşları [93] yaptıkları çalışmada nano kil parçacıkları ile güçlendirilmiş geopolimer kompozitler üreterek bunların fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında nano kil partikülleri eklenerek oluşturulan deneysel çalışmalar sonucunda ağırlıkça %2 nano kil ilavesinin yoğunluğu arttırdığı, gözenekliliği azalttığı, eğilme dayanımı ve tokluğu ise geliştirdiği gözlenmiştir. Dolayısıyla optimum nano kil kullanımı için en ideal oran %2'dir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, nano kilin hem bağlayıcının mikroyapısını iyileştiren dolgu maddesi olarak kullanılabildiğini hem de geopolimer tepkimesini destekleyen bir aktivatör gibi

davrandığını belirtmişlerdir. Maiti ve arkadaşları [94] yaptıkları çalışmalarında farklı boyutlardaki (100, 50 ve 30 nm) titanyum oksit (TiO_2) nanopartiküllerinin geopolimer kompozitlere ilave edilmesiyle ürettikleri uçucu kül bazlı geopolimer numunelerin gelişmiş durabilite özelliklerini incelemiştir. Basınç dayanımı deney sonuçları %5 oranda TiO_2 kullanılarak hazırlanan üç farklı nano titanyum oksit numunelerinde sırasıyla %11,7, %19 ve %26,5 oranda artış göstermiştir. 30 nm titanyum oksit (T_{30}) içeren geopolimer kompozit numunelerin basınç dayanımı değeri 53,59 MPa ve çekme dayanımı değeri 6,8 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca çalışmadan nano TiO_2 partiküllerinin porozite ve pürüzlülük özelliklerinde azalma ve dolayısıyla su emme kapasitesinde de azalma görülmüştür. Rashad [95] yaptığı çalışmada nano silis, nano alümin, nano titanyum oksit, nano kil ve jeotermal nano silis atığı kullanarak; bu nanomalzemelerin geopolimer numuneler üzerindeki mekanik, durabilite ve mikroyapı özelliklerine etkilerini kapsamlı olarak araştırmıştır. Nanomalzemelerin eklenmesi, daha yüksek yüzey alanlarından dolayı işlenebilirliği azaltmıştır, başlangıç ve son priz sürelerini kısaltmıştır. Birçok faktörden etkilenen, optimum oranda geopolimer kompozite ilave edilmeyince topaklanma gösteren ve homojen dağılım göstermeyen nanomalzemelerin %1-2 oranında kullanımı deneysel çalışmalar neticesinde uygun görülmüştür. Porozite ve su emme kapasitesinde azalma görülmüştür. Deneysel sonuçlardan deniz suyuna ve magnezyum sülfata karşı direnç gösteren nanomalzemeli geopolimer kompozitlerin, sülfürük aside karşı direnç göstermediği gözlenmiştir. Gutierrez ve arkadaşları [96] çalışmalarında metakaolin içeren geopolimer kompozit üretmek için ağırlıkça %10 titanyum oksit (TiO_2) ve ağırlıkça %5 bakır oksit (CuO) nanomalzemelerini kullanmışlardır. Çalışmada geopolimer numunelerin fiziksel ve mikroyapısal özelliklerinin yanı sıra geopolimer malzemelerin antibakteriyel aktivitesinin değerlendirilmesi de yapılmıştır. İnce agrega olarak cam atığı içeren geopolimer harç numunesinin su emme kapasitesinde, camsız referans geopolimer numunenin su emme kapasitesine göre %56,73 azalma görülmüştür. Aynı şekilde cam parçacıkları, malzemenin daha pürüzsüz ve daha homojen bir yüzeye sahip olmasını sağlamıştır. Yine cam atığı içeren geopolimer harcın porozitesi %37,97 daha düşük ve hacimsel yoğunluğu ise %40,36 daha yüksek olarak görülmüştür. Guerrero ve arkadaşları [97] alkali ile aktifleştirilen malzemelerde TiO_2 nanopartiküllerinin eklenmesinin etkisi adlı çalışmalarında metakaolin (MK), granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufu (GGBFS) ve her ikisi ile alkali aktifleştirilmiş

geopolimer numuneler üretmek için %0, %0,5 ve %1 oranlarında nano TiO_2 kullanmışlardır. Mekanik ve mikroyapı özelliklerine olan etkisi ile kendi kendini temizleme özelliklerine de çalışmada yer verilmiştir. Tamamen granüle öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren geopolimer numuneler en iyi basınç dayanımı sonucunu vermiştir. Yarı yarıya MK-GGBFS içeren karışım numuneleri yalnız MK içeren geopolimer numunelere göre daha iyi basınç dayanımı sonucunu vermiştir. Bu durum C-A-S-H oluşumuna izin veren cüruflarda Ca^{2+} iyonlarının varlığına ve alkali ile aktive edilen MK içeren geopolimer numunelerde oluşabilen N-A-S-H'a bağlanabilir. 7 günlük kürlemede cüruf içeren geopolimerlerde 97 MPa basınç dayanımı sonucuna karşılık MK içeren numunelerde 46 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Yine sırasıyla 90 günlük basınç dayanımı sonuçları cüruf içeren geopolimer numunelerde pek bir artış göstermezken, MK içeren geopolimerlerde %26 oranda artış göstermiştir. Bu en iyi basınç dayanımı sonuçları içeren numunelerdeki nanomalzeme oranı 7 ve 90 günlük küre tabi tutulan tüm numunelerde %0,5 nano TiO_2 kullanılan numunelerde elde edilmiştir. Nanomalzeme ilavesi daha yoğun reaksiyon matrisinde mikro dolgu görevi görerek geopolimer numunelerde çatlakların azalmasına ve yüksek basınç dayanımına sebep olmuştur. Singh ve arkadaşları [26] geopolimer harçların ve betonların özelliklerini iyileştirmede farklı nanomalzemelerin işlevlerine çalışmalarında değinmişlerdir. Nano TiO_2 eklendiğinde fotokatalizör görevi görmüştür. Nano gümüş antibakteriyel olarak işlev göstermiştir. Nano grafen oksit, karbon nanotüp (CNT) ve nano silis gibi nanomalzemeler ise eklendiğinde geopolimer harçların ve betonların mekanik, durabilite ve mikroyapı özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Qadry ve arkadaşları [98] metakaolin (MK) içeren geopolimer numunelerde CuO_2 nanopartiküllerini %0,25, %0,5, %0,75 ve %1 oranlarında kullanarak üç noktalı eğilme dayanımı deney sonuçlarına ve mikroyapı özelliklerine çalışmalarında yer vermişlerdir. Mikroyapı analizleri sonucunda CuO_2 'nin yüksek bir saflığa sahip olduğu sonucuna varmışlardır. %0,75 ve %1 oranda nano CuO_2 içeren geopolimer numunelerde yüzeydeki geopolimer dağılımı beyaz partiküller şeklinde daha net olarak görülmüştür. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, geopolimer numunelerdeki nano CuO_2 yüzdesi arttıkça dayanımın da buna paralel olarak arttığı görülmüştür. Ancak %0,75 ve %1 oranda nano CuO_2 içeren numunelerdeki artış pek değişmemiştir. Dolayısıyla karışım için optimum nano CuO_2 oranı %1'dir. MK içeren geopolimer numunelerde %1 nano CuO_2 katkı kullanımı en yüksek eğilme dayanımı

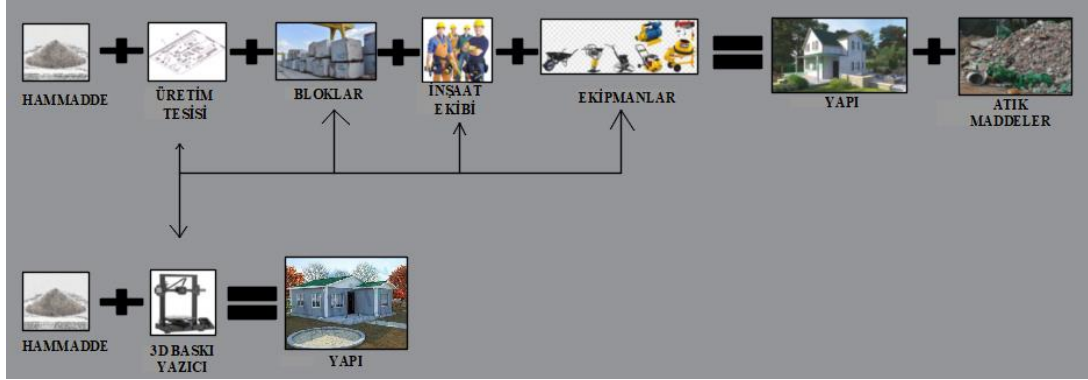
sonucunu vermiştir. Thamer Alomayri [99] çalışmasında uçucu kül içeren geopolimer kompozit numunelere ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 oranlarında nano alümin (Al_2O_3) ilave ederek, geopolimer numunelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmıştır. Geopolimer numunelerin mekanik özelliklerini geliştirmek için optimum nano Al_2O_3 içeriğinin deneysel çalışmaların sonuçlarından %2 olduğuna ulaşmıştır. Mikroyapısal özellikleri incelemek için yapılan SEM analizleri sonucunda, ağırlıkça %3'ten az nanopartikül kullanımının geopolimerin daha az gözenekli ve daha kompakt bir yapıda olduğunu ortaya koymuştur. Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, %2 nano Al_2O_3 içeren geopolimer numunelerde nano katkı içermeyen numunelere göre %44,5 kadar bir artış görülmüştür. %0 nano Al_2O_3 içeren numunelerde eğilme dayanımı 3,03 MPa iken; %2 nano Al_2O_3 içeren numunelerde bu değer 4,38 MPa'dır. En yüksek basınç dayanımı deney sonuçları da eğilme dayanımında olduğu gibi %2 nano Al_2O_3 içeren geopolimer numunelerde elde edilmiştir. Nano Al_2O_3 içermeyen numunelerde basınç dayanımı 23,9 MPa iken; %2 nano Al_2O_3 içeren numunelerde bu değer 29,4 MPa bulunmuştur. Ayrıca kırılma tokluğu, eğilme modülü, sertlik gibi diğer mekanik özelliklerinde de eğilme ve basınç dayanımı sonuçları gibi optimum %2 nano alümin içeren geopolimer numunelerde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Zeineb Zidi ve arkadaşları [100] çalışmalarında metakaolin (MK) içeren geopolimerlerde nano silis (SiO_2), nano alümin (Al_2O_3) ve nano çinko oksit (ZnO) nanomalzemelerinin mekanik, fiziksel ve mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. Ağırlıkça %1, %3, %5, %7 ve %10 nano silis içeren karışım numunelerinde optimum nano silis miktarı %5 olarak belirlenmiştir. Çalışmada, ağırlıkça %1, %2 ve %3 nano alümin içeren karışım numunelerinde optimum %2 nano alümin ve %0,3, %0,5 ve %0,7 nano çinko oksit içeren karışım numunelerinde de optimum %0,5 nano çinko oksit kullanılması gerektiği deneysel sonuçlardan tespit edilmiştir. Basınç dayanımı deney sonuçlarından sırasıyla optimum %5 nano silisli, %2 nano alüminli ve %0,5 nano çinko oksitli MK içeren geopolimer numunelerde artışlar yaklaşık %40, %30 ve %27 olmuştur. Her üç nanomalzeme de MK içeren geopolimer numunelerde basınç dayanımı değerlerinde artışa sebep olmuştur. Porozite sonuçlarına bakıldığında nano alüminli MK içeren geopolimer numunelerde, diğer numunelere göre daha iyi sonuçlar görülmüştür. Su emme değerlerinde nano silisli MK içeren numunelerden alınan sonuçlar diğerlerine göre daha düşük olmuştur. Çalışmada ayrıca aynı mekanik mukavemet elde etmek için maliyet karşılaştırması yapılmış olup, en ekonomik nanomalzeme belirlenmiştir.

Bunun için US Research Nanomaterials adlı firmadan kg başına nano silis, alümin ve çinko oksit fiyatları sırasıyla 185, 205 ve 185 dolar olarak alınmıştır. Sonuçta maliyet karşılaştırması yapıp, aynı mekanik mukavemeti elde etmek için, en ekonomik kullanım sağlayan nanomalzemenin nano ZnO olduğu görülmüştür. Ayrıca bu üç nanomalzemenin kullanımı da mikroyapısal özelliklerde iyileşme sağlamıştır. Assaedi ve arkadaşları [101] yaptıkları çalışmada nano kalsiyum karbonat (CaCO_3) kullanarak ürettikleri uçucu kül içeren geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. Ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 oranda nano CaCO_3 içeren numunelere basınç ve eğilme dayanımı deneyleri uygulanmış, ayrıca darbe dayanımı ve sertlik özellikleri de incelenmiştir. Sırasıyla geopolimer numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları 16,07 MPa, 22,40 MPa, 25,25 MPa ve 22,32 MPa olarak bulunmuştur. Eğilme dayanımı deney sonuçları ise sırasıyla 2,71 MPa, 3,09 MPa, 4,30 MPa ve 4,21 MPa olarak bulunmuştur. Bu deney sonuçlarından da açık bir şekilde görüldüğü gibi ideal olan nano CaCO_3 optimum değeri %2'dir. Hem basınç, hem de eğilme dayanımı deney sonuçlarından en yüksek değerler %2 nano CaCO_3 içeren uçucu küllü geopolimer numunelerde görülmüştür. Basınç ve eğilme dayanımında optimum nano katkı içeren geopolimer numunelerde sırasıyla nano katkı içermeyen referans numunelere göre %57 ve %58 artış görülmüştür. Mikroyapısal analizler sonucunda da nano CaCO_3 kullanımı ile geopolimer numunelerde iyileşme olduğu görülmüştür. Abdul ve arkadaşları [102] yaptıkları çalışmada seramik atık nanopartiküller içeren geopolimer harcın mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Normal Portland çimentosuna ikame olarak nano partüküller içeren seramik atığı %0, %20, %40 ve %60 oranlarda ilave edilerek oluşturulan harç numunelerinin basınç dayanımları test edilmiştir. Karışım numunelerinde 28 ve 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarında en iyi sonucu %40 nanopartikül içeren numuneler sergilemiştir. Buradan Al_2O_3 - SiO_2 nanopartikülleri şeklindeki seramik atığın %40'a kadar çimento ikamesinde kullanılabileceği sonucuna varılabilir. Mikroyapı analizi, SEM görüntüleri incelendiğinde nanopartikül seramik atık tozu içeren karışımlarda ekstra C-S-H jeli yüzeyde oluşturmuş, dolayısıyla karışım numunelerinde iyileşme göstermiştir. Ancak %40 nanopartikül seramik atığı içeren numuneler en iyi performansı göstermiştir. Kaur ve arkadaşları [103] çalışmalarında uçucu kül içeren geopolimer harç numunelerine ağırlıkça %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında nano metakaolin (NMK) ikame ederek, geopolimer harç numunelerin

mekanik ve mikroyapısal özelliklerine NMK'nın etkisini araştırmışlardır. 14 M. molar konsantrasyonda hazırlanan 24 saat kürlenmiş tüm harç numunelerinde 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçlarının %4 nano metakaolin içeren geopolimer harç numunelerinde en yüksek olduğu görülmüştür. Mikroyapısal özellikler için yapılan SEM analizlerinden %4 NMK içeren geopolimer harç numunelerinde iyileşme görülmüştür. Hem basınç dayanımındaki artış, hem de mikroyapıdaki iyileşmenin geopolimerizasyonda NMK'nın silis ve alümin oksit katkısından kaynaklı olduğu açıktır.

2.9 Üç Boyutlu (3B) Yazıcı

Son zamanlarda yapı sektörüne, yeni bir teknoloji olan 3B yazıcılar dahil olmuştur. Chuck Hull'un 1983 yılında ilk olarak icat ettiği katman kontrolüne sahip otomatik bir üretim prosesi olan 3B yazıcı ile üretim, son yıllarda hızlı bir gelişme göstermiştir. 3B yazıcı ile otomatik yapı üretim teknolojisi, robotik temelli olup katmanlı bir üretim teknolojisidir [104]. Bu üretim teknolojisi, özel mimari tasarım elemanları ya da büyük ölçekli yapı elemanlarını kalıp kullanmaksızın katman şeklinde üretebilmeye olanak sağlamaktadır. Bir bileşenin geometrik karmaşıklığı 3B yazıcıda önem taşımamakta ve üretim sürecine herhangi bir ek maliyet getirmemektedir. 3B yazıcıda kullanılan harçta farklı malzemelerin kullanılabilmesi, kalıpsız serbest biçimli yapıların oluşturulması, daha az insan gücüne rağmen daha hızlı üretilmesi ve inşaat maliyetini azaltması katman tabanlı üretim tekniğini geleneksel döküme göre daha avantajlı kılmaktadır. 3B yazıcı ile üretim teknolojileri, maliyeti en aza indirmek, zaman tasarrufu sağlamak, çevre kirliliğini azaltmak, şantiyelerde yaralanma ve ölümleri azaltmak gibi sayısız fayda ile hem mimari hem de yapısal tasarım için özgürlük sağlar [13]. Bu teknik, kalıp kullanmadan serbest şekil yapımını kolaylaştırmak için dijital teknolojiyi ve yeni sonuçları birleştirir [13, 105]. İnşaat sektöründe ve özellikle beton teknolojisinde geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında tasarım özgürlüğü sağlanması, inşaat süresinin kısalması, insan gücünün azalması, daha az malzeme israfı ve daha az atık madde açığa çıkması, ekonomik ve pratik olması nedenlerinden dolayı 3B yazıcı ile üretim teknolojisine ilgi artmaktadır [15]. 3B yazıcı ile otomatik yapı üretiminin, geleneksel yöntemle karşılaştırılmasının şematik görseli Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 Geleneksel yöntem ve 3B yazıcı ile otomatik yapı üretiminin karşılaştırılma şeması [106]

Yapı veya yapı elemanları üretiminde kullanılan, katmanlı imalat teknolojisi olarak da bilinen 3B yazıcı ile üretim teknolojisi tipik bir yığma yöntemine benzemektedir [107]. Kullanılan malzemeler katman katman (üst üste) inşa edilirken, alt katmanlar da üst katmanları taşımaktadır. Böylece istenen yapı veya yapı elemanı oluşturulmaktadır [108]. 3B yazıcı ile üretim sürecinde karışım içeriği performansta önemli rol oynar [107]. Karışımın özelliklerini geliştirmek için yapı veya yapı elemanına nanomalzemeler, lifler gibi takviye edici birçok malzeme eklenebilmektedir. Böylece katmanlı üretim teknolojisiyle kompleks yapılar veya yapı elemanları da daha kolay ve istenilen özelliklere uygun olarak elde edilebilmektedir. 3B yazıcı ile üretim yöntemleri Bağlayıcı Püskürtme (Binder Jetting) ve Ergiyik Biriktirme Modellemesi (FDM)'dir [109]. 3B yazıcı ile yazdırma teknikleri geçmişten günümüze Pegna, Contour Crafting, Concrete Printing ve D-Shape olarak kullanılmaktadır [110].

3B yazıcı ile üretilen olarak da ifade edilen eklemeli imalat, inşaat ve özellikle yapı sektöründe son yıllarda yaygın olarak önemli alanlarda gelişme göstermiştir [62]. Daha yüksek kalite ve üretkenlik, daha hızlı inşa edilebilirlik süreçleri, daha geniş geometrik özgürlük, özgün mimari tasarım ve maliyet verimliliği açısından 3B yazıcı ile üretim teknolojisine ilgi artmıştır [111]. Ayrıca 3B yazıcı ile üretim teknolojisi, eklemeli bir teknik olduğundan üretim esnasında daha az atık üretimine sebep olmaktadır [112]. Katmanlı yapı üretim teknolojisinde CO₂ emisyonu ve enerji sarfiyatının da düşmesi nedeniyle inşaat endüstrisine önemli faydalar sağlayacağı öngörüldüğünden, 3B yazıcılara yönelik bilimsel araştırmalar ve ticari faaliyetler gün geçtikçe artmaktadır [110, 113]. Bununla birlikte, inşaat sektöründe 3B yazıcı uygulanmasına ilişkin araştırmaların henüz başlangıç aşamasında olduğu

unutulmamalıdır. 3B yazıcının inşaat sektörüne getirebileceği potansiyelin tamamını keşfetmek için birçok yeni deneyler yapılmaya devam etmektedir. Ancak katmanlı yapı üretim teknolojisinde kullanılacak harcın özellikleri hakkında çalışmalar oldukça azdır. 3B yazıcıda kısa sürede üst üste binen katmanlar şeklinde döküm yapıldığı için harcın taze (reolojik) özellikleri çok önemli olmaktadır [114]. Üst üste gelen katmanlar yıkılmadan durabilmeli ve harç katmanları birbirine kenetlenmelidir. 3B yazıcılar ile daha kolay karmaşık şekiller üretilebileceğinden; kalıp kısıtlamaları olmaksızın ürün tasarımında yeni bir mimari özgürlük mümkün olacaktır. Üst üste eklemeli üretim yöntemi, sadece ihtiyaç duyulan yerlerde beton baskı yapılmasına ve beton tüketiminden tasarruf edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu teknolojide robotlarla üretimde artık betonun vibrasyonla yerleştirilmesine gerek duyulmamaktadır. Kalıp gerektirmemesi nedeniyle üretim artabilir ve 3B yazıcılar 7 gün, 24 saat kesintisiz olarak çalışabilmektedir [115]. Ayrıca 3B otomatik yapı üretim teknolojisi ile yerinde inşaatların tek bir aşamada geliştirilmesini kolaylaştırıp; inşaat ekipmanlarının taşınması, montaj işlemleri, işçilik maliyetleri ve inşaat işleri sırasında yaralanma riskini azaltabilmek mümkün olacaktır [49].

3B yazıcı ile üretim teknolojisinde kalıpsız imalat nedeniyle malzeme maliyetinde azalma, tasarımda özgürlük, özgünlük ve sınırsızlık sağlanmaktadır. Yapı sektöründe otomasyon kullanımı ile işçilikten bağımsız, kaliteli imalat yapılmaktadır. Hem hızlı sertleşme hem de yüksek erken dayanım sergileyen geopolimer kompozitler 3B yazıcı ile üretim yöntemi için uygun bağlayıcı malzemelerdir [116].

2.9.1 3B yazıcı ile geopolimer üretim süreci

3B yazıcı ile geopolimer üretimi, yüksek dayanıma sahip son derece karmaşık yapıların üretilmesi için uygun olan toz tabanlı teknik ve ekstrüzyona dayalı teknik olmak üzere iki prosestir. Toz tabanlı teknikte harç veya beton katmanlar, özellikle toz partiküllerini güvenli bir şekilde tutmak için bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeli tarafından verilen ve seçilen yol boyunca, toz yataklarına sıvı bağlayıcı uygulanarak bu yaklaşım kullanılarak inşa edilir. Bitirme işleminden sonra, bileşen geometrisini oluşturmak için yapı platformundan fazla bağlayıcı tozu kazınır. Baskı tamamlandığında takılabilen paneller, içyapılar ve kalıcı kalıplar gibi küçük ölçekli ve karmaşık yapı elemanlarının üretilmesi için bir yöntemdir [117]. Ekstrüzyona dayalı

teknikte ise harç veya beton malzemeler, üzerine yerleştirilmiş bir nozülden sıralı olarak ekstrüde edilerek 3B yazıcı ile geopolimer üretimi yapılan bir prosestir. En yaygın kullanılan üretim tekniği olan ekstrüzyona dayalı teknikte, karmaşık geometriye sahip büyük ölçekli mimari bileşenler gibi yapısal uygulamalar başarıyla yapılmaktadır. Ayrıca, RILEM Teknik Komitesi 276  imento bazlı malzemelerle dijital imalatı [118] ekstrüzyona dayalı 3B yazıcı ile üretimin üç ana kategorisini řu şekilde tanımlamaktadır:

1-Geleneksel ekstrüzyona benzer sert malzemelerin ekstrüzyonu.

2-Yazıcı kafasında katkılar eklenerek veya eklenmeden akıcı malzemenin ekstrüzyonu.

3-Sert karışımların verilmesini ve biriktirilmesini kolaylaştırmak için vibrasyon gibi ek enerji girdisi kullanılarak malzemenin ekstrüzyonu.

Her bir kategoriye ve her bir üretim adımına, yani yapı malzemesinin taşınması, baskı kafası işlemi, yapı malzemesinin biriktirme sırasında deformasyonu ve yapı malzemesinin biriktirme sonrasındaki davranışı ve ilgili süreçler sunulmaktadır [119]. Başlangıçta düşük viskozite sergileyen karışımlar daha iyi ekstrüde edilirken, ekstrüzyondan sonra viskozitedeki ani bir artış  retebilirliği olumlu yönde etkilemektedir [120].

Wang Shen'e [121] göre 3B yazıcı ile üretim süreci; kod oluşturma, materyal hazırlama ve yazıcıya taşıma, yazdırma adımı olmak üzere üç aşamada uygulanmaktadır. Başlamak için, herhangi bir bilgisayar destekli tasarım uygulaması kullanılarak bir 3B model oluşturulur. Daha sonraki adımda 3B yazıcı ile üretilen karışım için malzeme bileşenleri hazırlanır. Malzemeler hazırlanırken, huni-pompa-nozül sistemi kullanılarak yazıcı ile üretim işlemi gerçekleştirilir. Bilgisayar destekli tasarım uygulamasında oluşturulan geopolimer kompozitin yazdırılma süreci tamamlanır [122].

2.9.2 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harcın sahip olması gereken genel özellikler

3B yazıcı ile üretim kriterlerini karşılamak için malzemelerin yüksek reolojik ve mekanik özelliklere sahip olması gerekir. Bağlayıcı türünün bazı reolojik özellikler üzerindeki etkileri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Bağlayıcı türünün bazı reolojik özellikler üzerinde etkisi [43]

Bağlayıcı türü	Akma	Viskozite
Silis dumanı	Artar	Artar
Uçucu kül	Azalır	Azalır
Cüruf	Artar	Artar
Metakaolin	Artar	Artar
Kireçtaşı	Azalır	Azalır

Nozül çaplarının oldukça küçük olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle karışımlarda ince agrega kullanımı, nozülün zarar görmemesi için tercih edilir. Kaba agrega kullanılarak üretilen numunelerin olduğu bilinmektedir. 3B yazıcı nozülünün sorunsuz üretim yapabileceği boyutta kaba agrega kullanılması mekanik performansları artıracığından tavsiye edilmektedir. Nano kil ve viskozite düzenleyici katkıların kullanılması, 3B yazıcı ile üretilen karışımların ekstrüzyon öncesi ve sonrası istenen reolojik özellikleri sağlayabilmesi için kullanılması önerilmektedir. Sürdürülebilirliği sağlamak ve döngüsel ekonomiye katkıda bulunmak için, 3B yazıcı ile üretilen karışımın tasarımında geopolimer, geri dönüştürülmüş beton agregaları veya atık malzemelerin kullanımı yaygın hale getirilmelidir. Kısa ve esnek liflerin kullanılması tavsiye edilmektedir. Genel olarak, düşük viskoziteye ve yüksek akma gerilmesine sahip malzemelerin 3B yazıcı ile üretilen harç ve beton için kullanımı uygun kabul edilir [53].

3B yazıcı ile üretilen karışımlarda kısa sürede üst üste binen katmanlar şeklinde harç ve beton üretimi yapıldığı için, reolojik özellikler çok büyük öneme sahiptir [114]. Harç veya beton katmanları birbirine kenetlenmelidir ve üst üste gelen katmanlar yıkılmadan durabilmelidir. 3B yazıcıda pompalanabilir kıvamda harç ve beton olmalıdır. Yazdırma süresince sıkılabilmeli ve şekil verebilmelidir. Ayrıca verilen şekli kaybetmeden, akışkanlığını da koruyarak yazdırma işlemini devam ettirebilmelidir. Genel olarak 3B yazıcı ile üretimde kullanılan optimal karışımın

tasarlanması ve kendisinden beklenen özellikleri yerine getirmesi çok önemlidir. Taze harçtan ve betondan akışkanlık, yüksek akma gerilmesi, düşük viskozite, priz alma ve çalıştırılabilirlik süresi başlıca beklenen reolojik özellikler olarak sıralanabilir. Optimal harç veya beton karışımlarının en önemli mekanik özelliklerinden olan basınç dayanımı değerlerini maksimum yapabilmek için su/çimento oranının minimum tutulması gerekliliği geleneksel harç veya beton karışımlardan bilinmektedir. Bununla birlikte işlenebilirliği aynı zamanda malzemede belirli bir su seviyesinin korumasına da bağlıdır. Ayrıca sistem karışımının akışkan olması ve üst üste binen katmanların alt katmanlar tarafından desteklenerek erken dayanım kazanması öngörülmektedir. Bu nedenle, basılı malzemenin sertleşmesi için, taze harcın veya taze betonun reolojik özelliklerinin, basılı malzemenin yüksekliği arttıkça zamanla değişmesi gerekir [123]. Genişliklerini korumak ve yeni katmanlar basıldığında baskılı harç veya betonun çökmesini önlemek için alt katmanların belirli bir yükseklikte sertleşmeye başlaması gerekir. Sonuçta ikinci katmanın basılması için gereken karışımın, ilk katmanın basılmasından sonra hazır olması gerekir. Genel olarak bu sürenin (çalıştırılabilirlik süresi) yaklaşık 20 dakika olduğu literatürden görülmektedir [63, 124]. 3B yazıcı ile üretim 20 dakikada tamamlanmalıdır. Geliştirilen karışım bu şartları sağladığında, 3B yazıcı ile üretilen harç veya beton olarak kabul edilir [125]. 3B yazıcı ile katmanlı taze harç ve beton üretimde dikkat edilecek hususlar Tablo 2.2’de kısaca özetlenmiştir:

Tablo 2.2 3B yazıcı ile üretilen taze harcın ve betonun sahip olması gereken genel özellikler [110]

Genel özellikler	Açıklamalar
Pompalanabilirlik	Malzeme dağıtımında taşıma kolaylığı.
Baskılanabilirlik	Malzeme biriktirme kolaylığı ve güvenilir yazdırma prosesi.
Ekstrüde edilebilirlik	İşleme hızı ve nozülünden karışımın kesintisiz ve düzgün olarak güvenli akışı.
İnşa edilebilirlik	Biriktirilen taze bir karışımın deformasyon ve çökme olmadan, şeklini koruması ve yük altındaki direnci.
Çalıştırılabilirlik	Uygulama süresi boyunca kabul edilebilir tutarlılık, karışımın baskı için uygun kıvama geldiği zaman aralığı.

3B yazıcı ile üretim teknolojisinde kalıp olmadığından, geopolimerin reolojik (taze hal) özellikleri çok önemlidir. Ekstrüzyondan sonra deformasyonu ve sarkmayı önlemek için harcın veya betonun düşük bir çökme değeri göstermesi (0 slump) gereklidir. Taze harç ve beton gerilme altındayken, akma gerilmesi olarak

nitelendirilen kritik bir kayma gerilmesi altında kohezyonlu davranış sergiler ve bu kritik kayma gerilmesi değerinin üzerindeyse akışkan gibi davranır. 3B ekstrüde karışımlar aynı zamanda visko-plastik malzemeler olarak işlev görür. Akma gerilmesinden daha yüksek gerilmeye maruz kaldıklarında akıcı bir yapı sergiler. Bir diğer önemli özellik ise viskozitedir. Karışımlar akıştan sonra viskoz davranış sergiler ve kayma hızı plastik viskozite adı verilen bir sabit boyunca kayma gerilmesi ile orantılıdır. 3B yazıcı ile üretilen karışımda inşa edilebilirlik için yüksek akma gerilmesi gerekiyken; pompalanabilirlik ve ekstrüde edilebilirlik için düşük viskozite gereklidir [126]. Ekstrüde edilebilirlik, pompalanan karışımların 3B yazıcı kafasından (boru akışını bozmadan) nozüle düzgün bir şekilde (akma yeteneğidir) taşınmasıdır. Ekstrüde edilen karışımlarda katmanlarda süreksizlik ve boşluk olmamalıdır. Nozül içerisinde tıkanma, malzemede segregasyon ve karışımdan sıvı akışı engellenmelidir. Bunun için nozül boyutu önemli bir parametredir. Sürekli ve üniform ekstrüzyon katmanları elde etmek için optimum ekstrüzyon hızı ve karışım akış hızı belirlenmelidir. Pürüzsüz bir yüzey tabakası elde etmek için, yüksek akış hızı ve düşük ekstrüzyon hızı şartları sağlanmalıdır. Eğer düşük akış hızı ve yüksek ekstrüzyon hızı durumu sağlanırsa, ekstrüde edilen karışım katmanlar boyunca kırılabilir ve süreklilik sağlanamaz. Bu durum için optimum ekstrüzyon hızı ve akış hızı belirlenmiştir. Başlangıçta düşük viskoziteye sahip olan karışımlar daha iyi ekstrüde edilirken, ekstrüzyondan sonra ani bir viskozite artışı üretilebilirliği olumlu yönde etkilemektedir [126]. 3B yazıcı ile üretilen taze harcın veya betonun reolojik özelliklerini geliştirmekte cürufun, %25 uçucu kül ile veya %10 silis dumanı ile ikame edilmesiyle üretilen geopolimer kompozitlerin dozajı daha uygun hale gelir [127]. Uçucu külün %0'dan %100'e kullanımı ile viskozite 4,1 Pa/dk'dan 30,4 Pa/dk'ya kademeli olarak artış göstermektedir. %100 cüruf kullanılan karışıma %25 uçucu külün ikame edilmesiyle 36,8 Pa/dk'dan 40,1 Pa/dk'ya viskozite artış göstermektedir. %10 silis dumanının, cüruf içeren karışıma ikame edilmesi ile 38,8 Pa/dk'dan 142,7 Pa/dk'ya viskozite artış göstermiştir [127].

3B geopolimer karışımlarının ekstrüzyon sırasında ve sonrasında farklı reolojik özelliklere sahip olması gerektiği bilinmektedir. Bu nedenle katkı ve farklı özelliklere sahip kimyasalların kullanımı 3B yazıcı ile üretim uygulamalarında dikkat edilmesi gereken önemli bir parametredir. Lif takviyesi ile betonun veya harcın inşa

edilebilirliği artırılabilir. Bununla birlikte, ekstrüde edilebilirlik aynı zamanda azalmaktadır. Bu her iki özelliği de optimum lif dozajı ile dengelemek mümkündür. Bir ekstrüzyon harcının tiksotropisi, süper akışkanlaştırıcı ve viskozite değiştirici katkı maddelerinin birlikte eklenmesiyle iyileştirilebilir. Böylece, nozül başlığından yüksek oranda ekstrüde edilebilir yumuşak bir beton veya harç karışımı çıktığında, beton veya harç nozülden ayrıldıktan sonra aniden inşa edilebilirlik kazanabilir. Hedef odaklı ekstrüzyon performansına ulaşmak için süperakışkanlaştırıcı kullanılmalı ve optimum dozajları da özenle ayarlanmalıdır. Priz hızlandırıcıların ve priz geciktiricilerin birlikte kullanımı, 3B yazıcı ile üretilen harçlarının ekstrüde edilebilirliğini ve inşa edilebilirliğini dengelemek için alternatif bir çözüm stratejisi olarak değerlendirilmelidir [53].

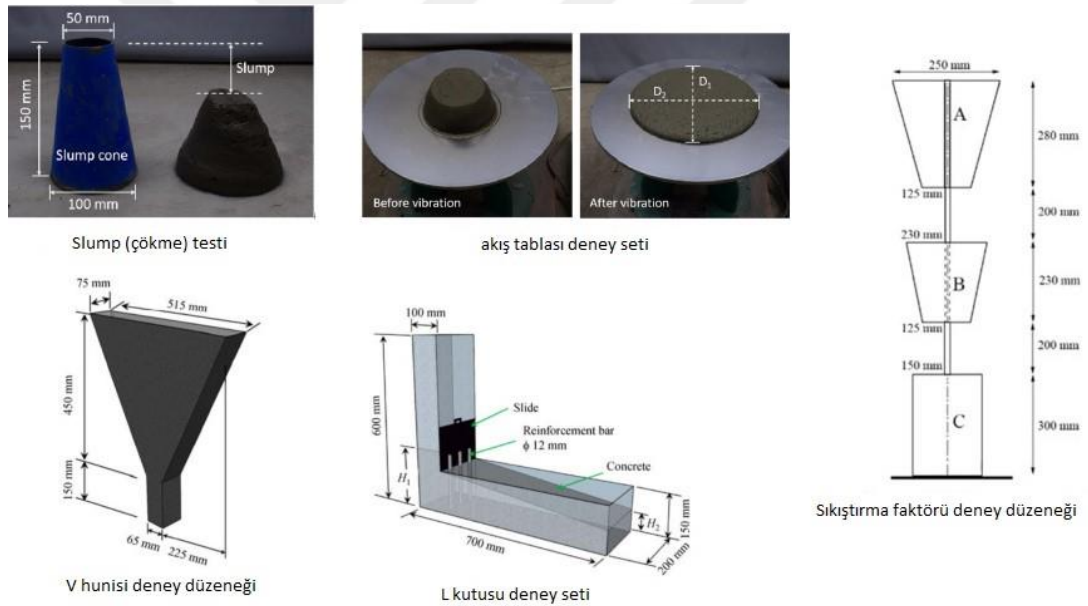
3B yazıcılar ile üretilen beton veya harçlar için herhangi bir standart oluşturulmamışken, 3B yazıcılar ile üretilen beton ve harç için en iyi bileşimin belirlenmesi amacıyla numuneler geleneksel üretim yöntemi kullanılarak testlere tabi tutulmaktadır [15]. Bu amaçla 3B yazıcı ile üretilen taze harç ve beton geopolimer kompozitlerin akışkanlık, akma gerilmesi ve viskozite, çalıştırılabilirlik ve priz süreleri özellikleri incelenmektedir.

2.9.3 3B geopolimer harçların reolojik özellikleri ve test yöntemleri

3B yazıcı ile üretilen betonların veya harçların malzeme verimliliği için hazırlanmış veya tanımlanmış standart testler yoktur. Genişliklerini korumak ve daha fazla katman basıldığında basılı yapının kaymasını önlemek için alt katmanların belirli bir yükseklikte sertleşmeye başlaması gerekir. Son olarak, ikinci katmanı basmak için gereken karışım, ilk katman üretildikten sonra mümkün olan en kısa sürede değiştirilmelidir. Ek olarak, sonraki katmana düzgün bir şekilde bağlanmayı önlemek için bu işlem çok hızlı olmamalıdır. Harcın reolojik özellikleri bu özelliklerin tümüne bağlıdır. 3B yazıcı ile üretilen betonlar ve harçlar için özel geliştirilmiş test yöntemleri olmadığından, geleneksel üretim yöntemine uygulanan testler numunelere uygulanarak beton ve harç için en uygun karışım optimize edilmeye çalışılmaktadır [15]. Bu amaçla 3B yazıcı ile üretilen taze harç ve beton geopolimer kompozitler için akışkanlık, akma gerilmesi ve viskozite, çalıştırılabilirlik ve priz süreleri özellikleri genel olarak incelenmektedir.

2.9.3.1 Akışkanlık özellikleri

Karışımların akışkanlığı, 3B yazıcı ile üretilen numunelerin performansları için hayati bir parametredir. Bir malzemenin ilk özelliklerini korurken basınç altında hareket etme ve kararlı kalma yeteneği akışkanlık olarak ifade edilir. Akışkanlık, pompalama sistemindeki taze malzemelerin akış davranışını değerlendiren kritik bir özelliktir ve pompalanabilirlik olarak da bilinmektedir. Parçacık boyutu, taze durumda reolojisinin ve akışkanlığının ana belirleyicisidir. Daha geniş bir boyut dağılımına sahip parçacıklar, daha yoğun bir şekilde toplanma ve daha iyi akma eğiliminde olmaktadır. Karışımların akışkanlığı genellikle çökme testi, reometre testi ve akış tablosu yöntemi uygulanarak ölçülmektedir [128]. Akış testi yöntemi ASTM C1437'ye [129] göre yapılmaktadır. Akışkanlık kontrolünde kullanılan tüm testlerin şematik görüntüsü Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Akışkanlık test yöntemleri [50]

Literatürde en çok kullanılan test slump (çökme) testidir. 3B yazıcı ile üretilen karışımın akış davranışını bulmak için yaygın olarak kullanılır ve uygulanır. Akma gerilmesi ve viskozite bulunan reometre testi en yeni ve en güncel araştırmalarda malzeme akış davranışını karakterize etmek ve temel reolojik değişkenleri elde etmek için uygulanır. Karışımların akışkanlığında değişkenliğe yol açan faktörler, karıştırma bileşenlerinin boyutu ve şekli, kimyasal ve mineral katkıları, hava sürükleyici katkıları ve lif içermesidir. İnce toz içeriği, uygun karışım oranı, kullanılan katkı kompakt ve

yoğun içyapının üretilmesine yardımcı olmaktadır. Silis dumanı, uçucu kül, cüruf gibi mineral katkıları parçacık boyutundan küçük olup, yüksek bir özgül yüzey alanına sahiptir. Silis dumanının ve uçucu külün küresel parçacıkları, parçacıklar arasındaki sürtünmeyi ve parçacıkların sıvı taleplerini azaltarak karışımların kolayca akmasını sağlamaktadırlar. Cürufun eklenmesi de akışkanlığı artırmaya yardımcı olmaktadır. Karışımlara metakaolin ve nano kil eklenmesi karışımların su gereksinimini artırırken, akışkanlığı azaltmaktadır. 3B yazıcı ile üretilen karışımlarda süper akışkanlaştırıcılar gibi kimyasal katkıların kullanımı, bağlayıcı parçacıklarının dağılması nedeniyle akışkanlığı artırmaktadır. Hava sürükleyici katkıların kullanımı da akışkanlığı iyileştirmeye yönelik etki etmektedir [50].

2.9.3.2 Akma gerilmesi ve viskozite

Viskozite, bir akışkanın yüzey gerilmesi altında deforme olmaya karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Viskozitenin artması segregasyonu önlediği için önemlidir. Yüksek akıcılığa sahip beton veya harcın reolojisi akma gerilmesi ve plastik viskozite parametreleri ile açıklanabilir [130]. Lee, Kim [117], geopolimer karışımlarının ekstrüzyonu için 0,6-1 kPa'lık akma gerilmesi aralığının kabul edilebilir olduğunu ve spesifikasyona bağlı olarak geometrik stabilite katsayısının 0,85 ile 0,90 arasında olması gerektiğini ifade etmiştir. Zhang ve arkadaşları [131] çeşitli Si/Na oranlarında alkali ile aktive edilmiş 3B yazıcı ile üretilen geopolimer karışımlarının akma gerilmesi ve yapısal oluşumunu incelemişlerdir. Si/Na oranının, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer karışımlarının inşa edilebilirliği ve ekstrüde edilebilirliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. Alkali aktivatörlerin Si/Na oranının arttırılmasının, karışımların viskozitesini ve akma gerilmesini düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca alkali aktivatörün Si/Na oranının düşürülmesinin karışımların yapı oluşumunu hızlandırdığı saptanmıştır. Ayrıca, Nematollahi'ye [51] göre, SiO_2/Na_2 alkali aktivatör oranı 3,22 olduğunda elde edilen geopolimerin kabul edilebilir bir işlenebilirlik sergilediği görülmüştür.

2.9.3.3 Çalıştırılabilirlik süresi

Malzemenin herhangi bir tıkanıklık olmaksızın nozülde akış kolaylığını koruduğu ve katman katman üstüne inşa edilirliliğinin kesinti olmaksızın devam ettiği süre olarak tanımlanmaktadır. İyi basılabilirlik için, 3B yazıcı ile üretilen karışımların

çalıştırılabilirlik süresi malzemenin ekstrüzyonu için gerekli olan süreden daha uzun olmalıdır. Ekstrüde edilen filamentlerin ekstrüzyonda süreksizliği göstermeye başladığı zaman, çalıştırılabilirlik süresinin sonu olarak bilinmektedir [50]. Bu süre betonun veya harcın viskozitesinin ve akma gerilmesinin önemli ölçüde değişmediği zaman olarak da tanımlanmaktadır [132]. Ortalama 20 dakika kesintisiz baskılanabilirlik veya sürekli baskı olmalıdır. Bu süre tespit edilirken, 3B yazıcı ile üretilen karışımlarında soğuk derz oluşumuna ve filament kopmasına dikkat edilmelidir. Karışımlarda kullanılan bağlayıcı türü ve miktarı, katkı içeriği bu süreyi daha uzun hale getirmekte önemli bir parametredir. Panda ve arkadaşları [124], 3B yazıcı ile üretilen harca %15 cüruf ilavesinin çalıştırılabilirlik süresini azalttığını, ancak %5 cüruf ilavesinin ise harcın çalıştırılabilirlik süresini artırdığını belirtmişlerdir. Malaeb ve arkadaşları [133] %0,5 kimyasal katkı içeren karışım numunelerinde %1 kimyasal katkı içerenlere göre çalıştırılabilirlik süresinin 20 dakikaya düştüğünü ifade etmişlerdir. Kesintisiz akış, katman kalınlığının ve katman yüksekliğinin korunduğu üretimin sürdürülmediği an, çalıştırılabilirlik süresinin sona erdiği anlamına gelmektedir. Nozülde tıkanma başlangıcı ve katmanlar arasında malzemenin kesik kesik gelmeye başlaması da çalıştırılabilirlik süresinin sona erdiğini ifade etmektedir.

2.9.3.4 Priz süresi tayini

Priz süresi, Vicat iğnesi kullanılarak genellikle tespit edilmektedir. Vicat testi sırasında penetrasyon derinliğine bağlı olarak, priz başlangıcı ve priz sonu süreleri kategorize edilmektedir. Priz süresi iyi kontrol edilmezse, özellikle çalıştırılabilirlik süresi ekstrüzyon ve üretim aşamalarını olumsuz olarak etkileyebilir. Geopolimer kompozitlerin priz başlangıcı süresi cüruf dozajı azaldıkça, artış göstermektedir. Priz başlangıcı süresi cüruf oranı %0 olan karışımlarda 151 dakika olarak kaydedilirken, cüruf oranı %30 olan karışımlarda bu süre 18 dakika olarak kaydedilmiştir. Bu durum cürufun CASH ve N oluşturmak için reaksiyonu hızlandıran yüksek kalsiyum içeriğine atfedilmektedir [134]. Ayrıca karışımlara katkı ilavesi de priz süresini etkilemektedir. Sodyum karboksimetil nişasta katkısının karışımlara eklenmesi priz süresini artırmıştır [134].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Bağlayıcılar

Bu tez çalışmasında bağlayıcı malzemeler olarak metakaolin (MK) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır.

3.1.1.1 Metakaolin (MK)

Bu tez çalışmasında kullanılan metakaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 MK özellikleri

Kimyasal bileşenleri	%
SiO ₂	56,10
Al ₂ O ₃	40,25
Fe ₂ O ₃	0,85
CaO	0,19
MgO	0,16
Na ₂ O	0,24
K ₂ O	0,55
SO ₃	1,58
Fiziksel özellikleri	
LOI	1,11
Özgül ağırlığı (g/cm ³)	2,52

3.1.1.2 Uçucu kül (UK)

Bu tez çalışmasında kullanılan uçucu kül, ASTM C 618 [135]'e göre F sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır. Uçucu kül ilavesinin betonun reolojik özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğu literatürde vurgulanmıştır [136]. Bu tez çalışmasında Adana ili Yumurtalık ilçesindeki Sugözü termik santralının ithal taşkömürünün yakılmasıyla üretilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 UK özellikleri

Kimyasal bileşenleri	%
SiO ₂	58,25
Al ₂ O ₃	22,95
Fe ₂ O ₃	7,25
CaO	2,58
MgO	2,42
Na ₂ O	0,92
K ₂ O	0,99
SO ₃	0,53
Fiziksel özellikleri	
LOI	0,91
Blaine (cm ² /g)	3000
Özgöl ağırlığı (g/cm ³)	2,31

3.1.2 Alkali aktivatörler

Bu tez çalışmasında, aktivatör çözeltisi hazırlamak için katı NaOH kullanılmıştır. NaOH konsantrasyonu 12 M olarak seçilmiş ve çözelti 24 saat laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Daha sonra geopolimer harç karışımına sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat ilave edilmiştir. Alkali aktivatörler Şekil 3.1’de ve alkali aktivatörlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.1 Alkali aktivatörler

Tablo 3.3 Sodyum hidroksit (SH) çözeltisinin ve sodyum silikat (SM)'in özellikleri

Özellikler	SH	SM
Kimyasal Formülü	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Molekül ağırlığı (g/mol)	40,00	122,06
Rengi	Beyaz	Renksiz
pH	13-14	–
Yoğunluk (g/cm ³)	2,13	1,39
Na ₂ O (%)	–	8,9
SiO ₂ (%)	–	28,7
H ₂ O (%)	–	64,8

3.1.3 Kimyasal ve puzolanik katkılar

Metakaolin, içerdiği kil yapısı nedeni ile harcın su ihtiyacını artırmaktadır. Bu nedenle bağlayıcı olarak MK içeren bu tez çalışmasında viskozite düzenleyici katkı maddesi kullanılmış ve oranları bağlayıcı miktarının %1'i olarak seçilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan viskozite düzenleyici katkı maddesi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Viskozite düzenleyici katkı maddesi

3.1.4 Nanomalzemeler

Tez çalışmasında kullanılan nanomalzemeler çok duvarlı endüstriyel sınıf karbon nanotüp (MW-CNT) ve nano silisyum dioksit (nano-SiO₂)'tir. Her iki nanomalzemede, bağlayıcının %0, %0,25, %0,50 ve %0,75'i oranlarında karışımlara eklenmiştir. Bu nanomalzemeler sırasıyla M-CNT ve NS olarak tez çalışmasında ifade edilmiştir.

3.1.4.1 Çok duvarlı karbon nanotüp (M-CNT)

Bu tez çalışmasında 3B yazıcı ile geopolimer harç üretmek için kullanılan çok duvarlı endüstriyel sınıf karbon nanotüp (MW-CNT) görüntüsü Şekil 3.3'te ve MW-CNT'nin genel özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3 MW-CNT

Tablo 3.4 MW-CNT'nin genel özellikleri

M-CNT	
Formül	MWCNT-OH ⁻
Renk	Siyah
Safılık (%)	92
Ortalama partikül çapı (nm)	8-28
Uzunluk (µm)	10-35
Yüzey alanı (m ² /g)	220
Tip	Endüstriyel
Kimyasal yapısı	Kararlı

Nanomalzeme içermeyen 3B geopolimer harç numuneleri tez çalışmasında K olarak ifade edilmiştir. %0,25, %0,5 ve %0,75 MW-CNT nanomalzeme içeren 3B geopolimer harç numuneleri ise tez çalışmasında sırasıyla M-CNT 1, M-CNT 2 ve M-CNT 3 olarak ifade edilmiştir.

3.1.4.2 Nano silisyum dioksit (NS)

Bu tez çalışmasında 3B yazıcı ile geopolimer harç üretmek için kullanılan nano silisyum dioksit (nano-SiO₂)'in görüntüsü Şekil 3.4'te ve NS'nin genel özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir. Nanomalzeme içermeyen 3B geopolimer harç numuneleri tez çalışmasında K olarak ifade edilmiştir. %0,25, %0,5 ve %0,75 Nano-SiO₂

nanomalzeme içeren 3B geopolimer harç numuneleri ise tez çalışmasında sırasıyla NS 1, NS 2 ve NS 3 olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.4 Nano-SiO₂

Tablo 3.5 NS'nin genel özellikleri

NS	
Formül	SiO ₂
Renk	Beyaz
Safılık (%)	99,95
Ortalama partikül çapı (nm)	13-22
Yüzey alanı (m ² /g)	165-195
Tip	Gözeneksiz
Kimyasal yapısı	Amorf
Şekil	Küresel

3.2 Geopolimer Harcın Karışım Oranları

Tez çalışmasında 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçlar için kullanılan karışım oranları Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Geopolimer harç karışım oranları

Karışım	MK*	UK*	Agrega	SH*	SM*	AAÇ/B*	Katkı	Nanomalzeme
K	0,5	0,5	2,57	0,25	0,56	0,81	0,01	0
M-CNT 1	0,5	0,5	2,57	0,25	0,56	0,81	0,01	0,0025
M-CNT 2	0,5	0,5	2,57	0,25	0,56	0,81	0,01	0,005
M-CNT 3	0,5	0,5	2,57	0,25	0,56	0,81	0,01	0,0075
NS 1	0,5	0,5	2,57	0,25	0,56	0,81	0,01	0,0025
NS 2	0,5	0,5	2,57	0,25	0,56	0,81	0,01	0,005
NS 3	0,5	0,5	2,57	0,25	0,56	0,81	0,01	0,0075

MK*: Metakaolin, UK*: Uçucu Kül, SH*: Sodyum Hidroksit Çözeltisi, SM*: Sodyum Metasilikat, AAÇ/B*: Alkali Aktivatör Çözelti/Bağlayıcı Oranı

3.3 3B Geopolimer Harç Numuneleri Hazırlama Prosedürü

MK ve UK önce bir karıştırıcıda yaklaşık bir dakika karıştırılmıştır. Daha sonra üzerlerine ince agrega ilave edilerek yaklaşık üç dakika karıştırılmıştır. Nanomalzemeler, tabanında saf su bulunan ultrasonik özel bir karıştırıcıda homojen olana dek yaklaşık 1 saat karıştırılarak alkali aktivatör çözeltisine eklenerek hazırlanmıştır. Daha sonra nanomalzeme içeren alkali aktivatör çözeltisi kuru karışıma eklenmiştir. Kuru malzemeler eklendikten sonra karıştırmaya dört dakika kadar devam edilmiştir. Daha sonra geopolimer harç karışımına akışkanlaştırıcı ilave edilerek yaklaşık iki dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Toplamda, karıştırma süresi yaklaşık on dakikadır. Bu tez çalışmasında alkali aktivatör çözeltisi/bağlayıcı (AAÇ/B) oranı tüm karışımlar için 0,81'de tutulmuştur. Karışımlarda maksimum agrega boyutu (D_{max}) 0,600 mm olan ince nehir kumu kullanılmıştır. Katkı olarak, viskozite düzenleyici katkı kullanılmıştır. Viskozite düzenleyici katkı oranları bağlayıcı miktarının %1'i olarak seçilmiştir. Şekil 3.5'te nanomalzeme içeren alkaliler, numune üretimi için ultrasonik karıştırıcıda hazırlanırken verilmiştir. Şekil 3.6'da 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerine ait üretim aşamasından görseller ve 3B yazıcının şematik çizimi verilmiştir. Şekil 3.7'de ise 3B yazıcı ile laboratuvar ortamında üretilmiş geopolimer harç numuneleri verilmiştir. Geopolimer harç numuneleri oda sıcaklığı (20 ± 2 °C) kür koşullarında 7, 28 ve 90 gün bekletildikten sonra eğilme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur.



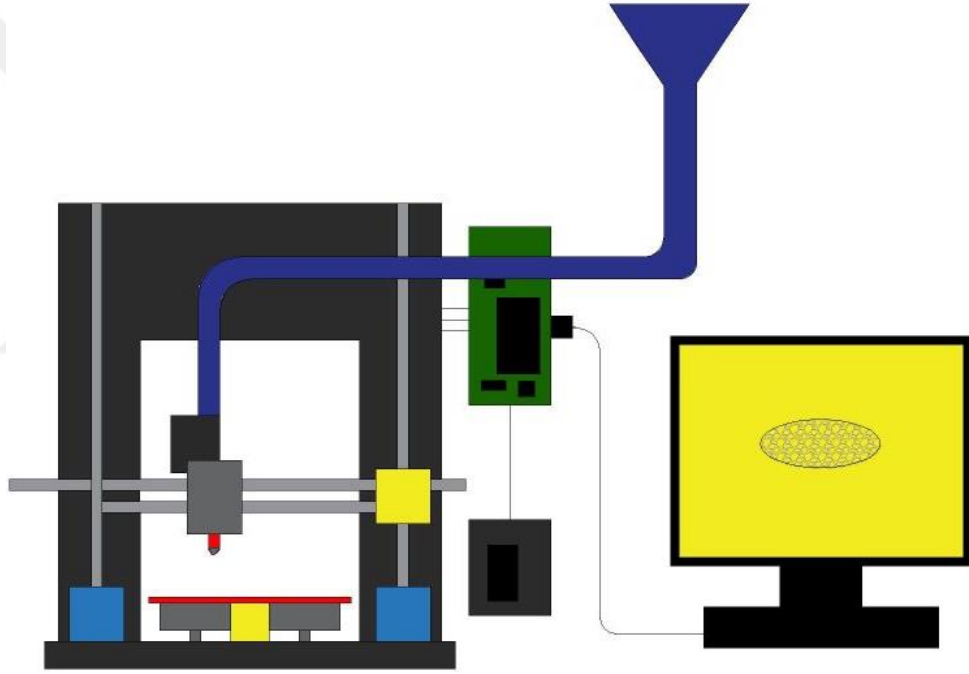
a)

b)

Şekil 3.5 a) NS, b) M-CNT içeren alkaliler ultrasonik karıştırıcıda



a)



b)

Şekil 3.6 a) 3B yazıcı ile geopolimer harç üretimi, b) 3B yazıcının şematik gösterimi



Şekil 3.7 3B yazıcı ile laboratuvarında üretilmiş geopolimer harç numuneleri

3.4 3B Geopolimer Harçlara Uygulanan Mekanik Deneyler

3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların ve betonların mekanik özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak ve yapım süreçleri yoluyla değiştirilebilmektedir. Baskı hızı, süresi ve yönü, nozül şekli, boyutu ve hareket hızı yapım süreçleri olarak mekanik özellikleri etkilemektedir. Ayrıca baskı işleminin anizotropik özelliği nedeniyle 3B yazıcı ile üretilen geopolimer kompozitlerin mekanik özellikleri yükleme yönünden de etkilenmektedir [117]. Baskı yönünün karışım üzerindeki etkisini araştıran Paul [125], lif içermeyen numuneler için 8 mm çaplı dairesel nozüller kullanırken, cam lif içeren numuneler için ise 10x20 mm boyutlarında dikdörtgen nozüller kullanmışlardır. Kalıp döküm numuneler ile karşılaştırıldıklarında, baskı yönünün %15'e kadar mekanik dayanımlarda artışa neden olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca dairesel nozüllerin, dikdörtgen nozüllere göre numunelerde daha fazla boşluk oluşturduğu ve daha düşük mekanik dayanım elde edildiği görülmüştür. Ancak karmaşık tasarımlarda dairesel nozül kullanımı, dikdörtgen nozül kullanımına göre daha yaygındır. Bu tez çalışmasında 9x10 mm boyutlarında dikdörtgen nozül kullanılmıştır. 3B yazıcı ile

Üretilen geopolimer harç numuneleri 5 katmandan oluşturulmuş olup, her katman yüksekliği yaklaşık 8 mm'dir. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunesi şekil 3.8'de verilmiştir.



şekil 3.8 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunesi

3.4.1 Eğilme dayanımı

Bu tez çalışmasında eğilme dayanımı deneylerinde her seri için 3'er adet yaklaşık 40x40x160 mm boyutlarında, kalıp kullanılmadan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numuneleri kullanılmıştır. Oda sıcaklığında 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin ASTM C348 [137] standardına uygun olarak otomatik kontrollü preste eğilme dayanımları belirlenmiştir. şekil 3.9'da ASTM C348'e göre  noktalı eğilme yöntemiyle eğilme dayanımı testine tabi tutulan 3B geopolimer harç numunesi, eğilme dayanımı test cihazı ile birlikte verilmiştir.



şekil 3.9 Eğilme dayanımı test numunesi

Her seriye ait numunenin eğilme dayanımı değeri 3 adet numunenin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir. Eğilme dayanımı aşağıdaki denklem (3.1) kullanılarak her bir taze geopolimer harç karışım serileri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$Eğilme\ dayanımı = \frac{3P \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (3.1)$$

Bu denklemde P : numuneye kırılma anında etki eden kuvvet (N), L : mesnetler arası uzaklık (mm), b : numunenin genişliği (mm) ve d : numunenin yüksekliği (mm)'dir.

Kullanılan nozüle göre eğilme dayanımı sonuçları değişiklik göstermektedir. Dairesel nozüller kullanılan numunelerin temas alanları kare ve dikdörtgen nozüllere göre daha az olduğundan daha düşük dayanım elde edilebilmektedir [49]. Bu nedenle, 3B yazıcı ile üretimde tasarım yaparken malzemenin mekanik özelliklerini etkilemesinden ötürü nozül şekli ve boyutu göz önünde bulundurulması gereken önemli parametrelerdendir [49]. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer kompozitlere liflerin eklenmesi eğilme dayanımını artırmaktadır.

3.4.2 Basınç dayanımı

Literatürde betonun veya harcın kalitesini belirlemek için en etkin yolun betonun veya harcın basınç dayanımını belirlemek olduğu ortaya konulmuştur [138]. Bu tez çalışmasında 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerine ASTM C348'e göre üç noktalı eğilme dayanımı testlerine tabi tutulan ve ikiye bölünmüş harç numuneleri üzerinde basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Oda sıcaklığında 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonunda 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin ASTM C349 [139] standardına uygun olarak otomatik kontrollü presle basınç dayanımları belirlenmiştir. Basınç dayanımı testlerinde kullanılan numuneler, eğilme dayanımı testine tabi tutulan ve her bir numune için ikiye ayrılan numunelerdir. Her seriye ait numunelerin basınç dayanımı değeri 6 adet numunenin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir. Şekil 3.10'da 3B yazıcı ile üretilen ve eğilme dayanımı testine tabi tutulup, basınç dayanımı testi için hazırlanan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunesi verilmiştir.



Şekil 3.10 Basınç dayanımı test numuneleri

Şekil 3.11’de ise ASTM C349’e göre basınç dayanımı testine tabi tutulan 3B geopolimer harç numunesi, deney presi ile birlikte verilmiştir.



Şekil 3.11 Basınç dayanımı presinde test numunesi

3.4.3 Ultrases geçiş hızı testi

Ultrases geçiş hızı testi (UPV), ses üstü dalgaların harcın içerisine gönderilerek harcın bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçme süresi ölçülmesi prensibine dayanan bir deneydir. Elde edilen ses üstü dalga hızı ile harcın basınç dayanımı özellikleri için bir fikir edinilmektedir [140, 141]. Bu tez çalışmasında, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin 28 ve 90 günlük ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmüştür. Ayrıca donma-çözölmeye maruz bırakılan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin UPV değerleri ölçölerek, karşılaştırma yapılmıştır.

3.5 3B Geopolimer Harçlara Uygulanan Durabilite Deneyleri

Durabilite için donma-çözölme deneyleri seçilerek, tüm deney serisine (M-CNT ve NS içeren) uygulanmıştır. Toplamda iki farklı nanomalzeme ve dört farklı hacimsel oran (%0, %0,25, %0,50 ve %0,75) olmak üzere 7 seri, 56 döngü donma-çözölme maruz bırakılmıştır. Donma-çözölme deneyi sonrası numunelerin mekanik dayanım sonuçları (eğilme ve basınç), ağırlık değişimleri ve UPV sonuçları irdelenmiştir. Sonuçlar nanomalzeme içermeyen kontrol numuneleri ile farklı hacimsel oranlarda en iyi seriyi belirlemek için ve en yüksek mekanik performans gösteren nanomalzeme ve kullanılan nanomalzeme oranı tespit edilerek detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

geopolimer harç numunelerinin yüzey morfolojileri çeşitli ölçeklerde taramalı elektron mikroskobu (SEM, Hitachi SU3500) ile karakterize edilmiştir. Taranan bölgeler için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX, Oxford INCA X-ışını spektrometresi) yapılmıştır. SEM analizleri için kaplama yapılan cihaz Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13 SEM analizleri için kaplama yapılan cihaz

SEM-EDX analizlerin yapıldığı cihaz Şekil 3.14'te verilmiştir. Numunelerin X-ışını kırınım desenleri, bir Rigaku miniflex600 kırınım ölçer ile kaydedilmiştir. Numuneler, 40 kV voltaj ve 15 mA akımda Cu-K α radyasyonundan ışınlanmıştır. Ayrıca XRD analizleri 1,5406 (λ) dalga boyunda 10 ile 90° arasında, 0,02° adım hızında ve dakikada 2° tarama hızında gerçekleştirilmiştir. XRD analizleri yapılan cihaz Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.14 SEM-EDX analizlerinin yapıldığı cihaz



Şekil 3.15 XRD analizlerinin yapıldığı cihaz

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, bağlayıcı olarak metakaolin ve uçucu kül kullanılmıştır. Bağlayıcıların aktive edilmesi için sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Tez çalışmasında iki farklı nanomalzeme kullanılmıştır. Bu nanomalzemeler nano silisyum dioksit (nano- SiO_2) ve çok duvarlı karbon nano tüp (MW-CNT)'tür. Nanomalzemeler toplam bağlayıcının %0, %0,25, %0,50 ve %0,75 oranlarında kullanılarak 3B yazıcı ile geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Daha sonra bu numuneler 7, 28 ve 90 günlük kür süresinde oda sıcaklığında (20 ± 2 °C) bekletilerek mekanik dayanım deneylerine (eğilme ve basınç) tabi tutulmuştur. Bu aşamadan sonra nanomalzeme içeren 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numuneleri, durabilite özelliklerini incelemek amacıyla donma-çözülme testlerine maruz bırakılmıştır. Donma-çözülme testlerine maruz bırakılan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların donma-çözülme sonrası mekanik dayanımları, ultrases geçiş hızı sonuçları ve ağırlık değişimleri tespit edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca numunelerin mikroyapısal analizleri yapılarak nanomalzemelerin 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç içerisindeki mikroyapıya olan katkıları incelenmiştir. Şekil 4.1'de iki farklı nanomalzeme kullanılarak, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numuneleri verilmiştir.



Şekil 4.1 3B yazıcı ile üretilen nanomalzeme içeren geopolimer harç numuneleri

4.1 3B Geopolimer Harçların Reolojik Deney Sonuçları

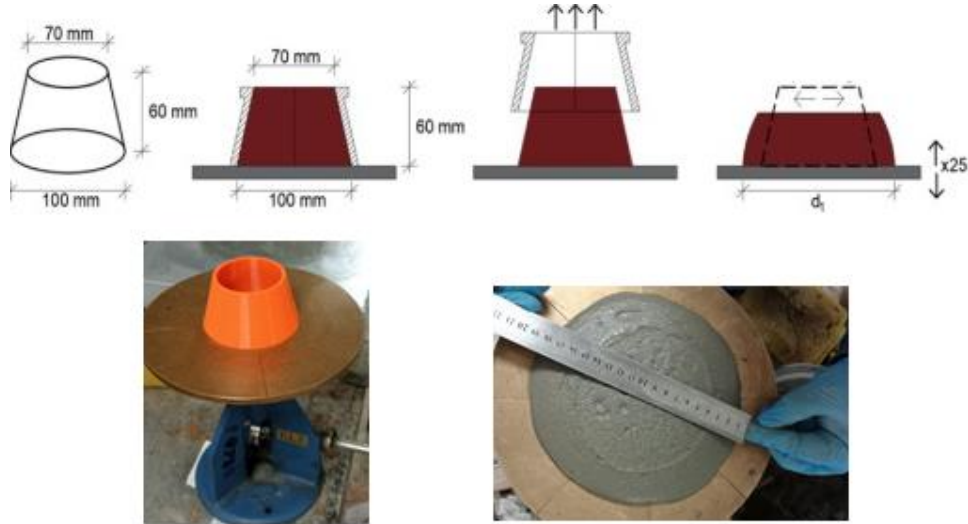
3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla akış tablası testi, inşa edilebilirlik testi, yayılma çapı tayini, viskozite ve akma gerilmesi testleri taze harca uygulanmıştır.

4.1.1 Akış tablası deney sonuçları

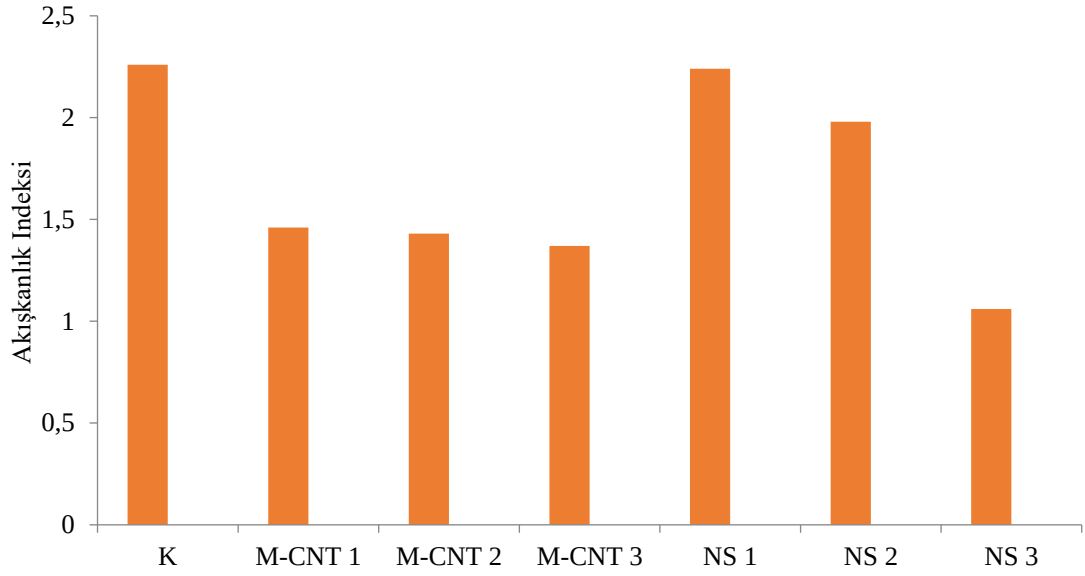
Bu tez çalışmasında akış tablası deneyi ASTM C1437-15 [144] standardına göre yapılmıştır. Bu test için ilk olarak taze geopolimer harç karışımları iki kat halinde akış tablası üzerine yerleştirilmiş olan kesik kalıba doldurulmuştur. Her kat, tokmak ile 20 kere sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıp yavaşça çıkarılarak akış tablası 15 saniyede 25 kez düşürülmüştür. Karışımların akışkanlıklarını belirlemek amacıyla birbirine dik olan çaplar ölçülmüş ve değerler kaydedilmiştir. Şekil 4.2’de akış tablası deneyine ait şematik çizim ve deney aşamalarına ait görseller verilmiştir. Deney sonrası kaydedilen bu değerler kullanılarak akışkanlık indeksi hesap edilmiştir [55]. Akışkanlık indeksi Kim ve arkadaşları [145] tarafından tanımlanan aşağıdaki denklem (4.1) kullanılarak her bir taze geopolimer harç karışımı için hesaplanmış olup, sonuçlar Şekil 4.3’te verilmiştir.

$$\text{Akışkanlık indeksi} = \frac{d_1 \times d_2 - d_0^2}{d_0^2} \quad (4.1)$$

Bu denklemde d_0 : kalıbın iç çapı, d_1 : maksimum akış çapı ve d_2 : d_1 ’e dik olan çap’tır.



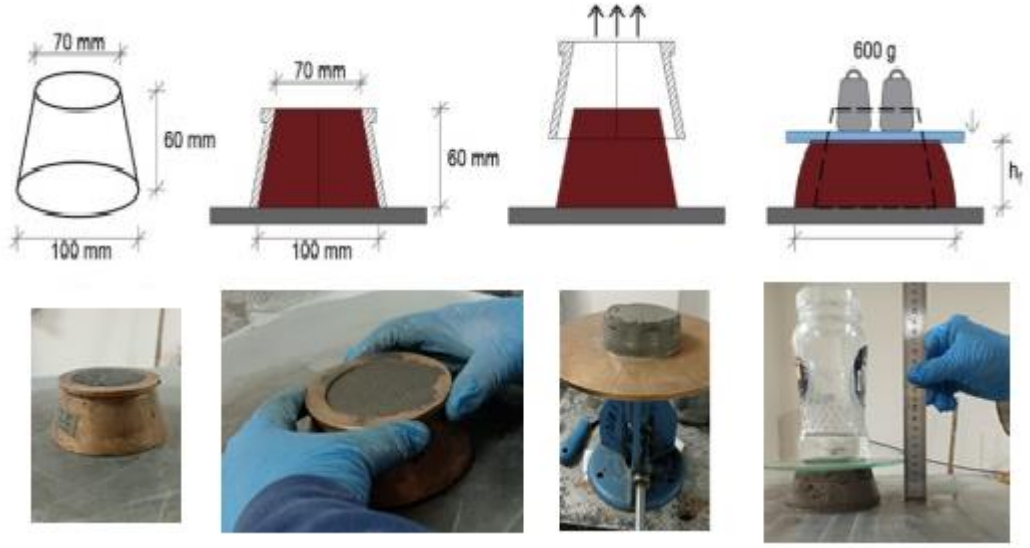
Şekil 4.2 Akış tablası şematik çizim ve deney aşamalarına ait temsili görseller [146]



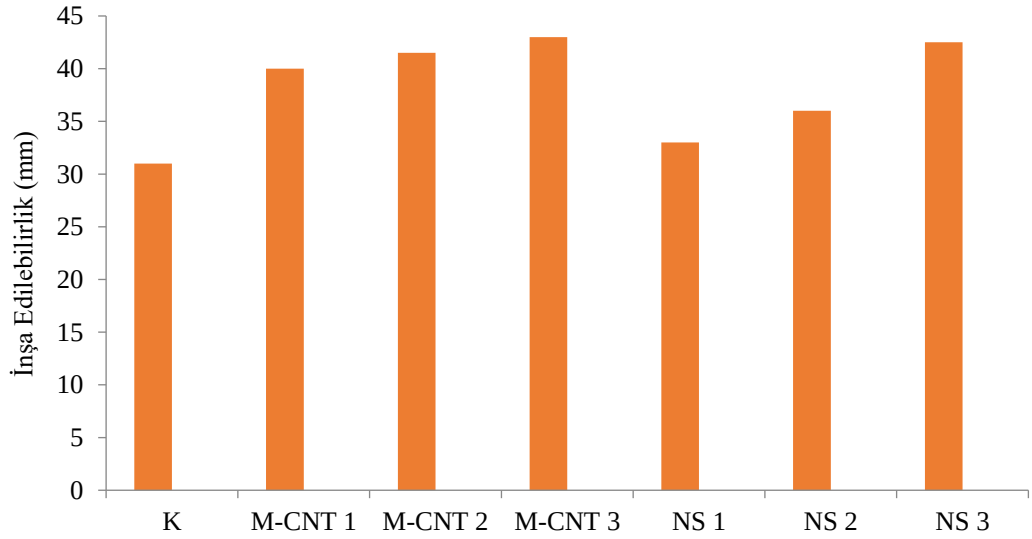
Şekil 4.3 3B geopolimer harçların akışkanlık indeksleri

4.1.2 İnşa edilebilirlik deney sonuçları

Bu tez çalışmasında inşa edilebilirlik için yapılan deney, ASTM C1437 [129] standardında belirtilen mini çökme testinin bir modifikasyonudur. Bu deney ile statik yük altında taze geopolimer harç karışımlarının şeklinin korunması tespit edilmektedir. Her taze harç karışımı ilk karıştırmadan kısa bir süre sonra mini çökme kalıbına yerleştirilmiştir. 1 dakikalık dinlenme süresi ardından kalıp yavaşça çıkarılmıştır. Daha sonra yükün homojen dağılımını sağlayabilmek için, taze harç numunesi üzerine bir cam plaka yerleştirilmiştir. Taze harç numunesine 1 dakika boyunca 600 g. yük (cam plaka ağırlığı dahil) uygulanmıştır. 1 dakika sonunda taze harç karışımlarının deformasyonu, numunelerin son yükseklikleri dikkate alınarak birbirine dik iki yönde ölçülmüştür. Ölçülen bu iki değer ortalama alınarak ortalama yükseklik değerleri kaydedilmiştir. Şekil 4.4'te deneye ait şematik çizim ve deney aşamalarına ait görseller, Şekil 4.5'te deney sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.4 İnşa edilebilirlik deneyinin detaylarını gösteren şematik çizim ve deney aşamalarına ait temsili görseller [146]

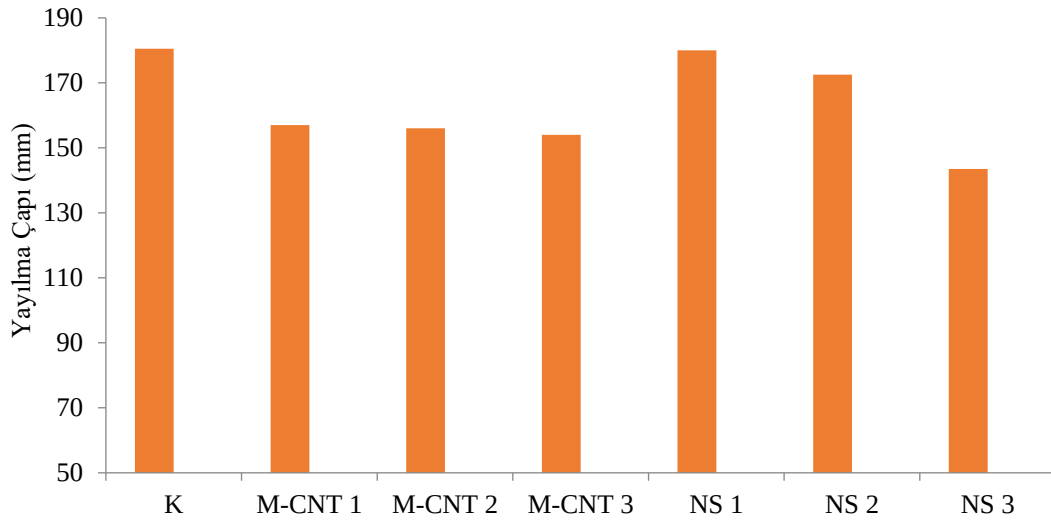


Şekil 4.5 3B geopolimer harçların inşa edilebilirlik deney sonuçları

Daha düşük çökmeye (dikey deformasyon) veya daha yüksek nihai yükseklik değerlerine sahip olan karışımların daha iyi inşa edilebilir olduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla 3B geopolimer harç numunelerinden en iyi inşa edilebilir olan seri M-CNT içeren serilerden M-CNT 3 serisi olduğu görülmüştür. Bunu NS içeren serilerden NS 3 serisi takip etmiştir.

4.1.3 Yayılma tablası deney sonuçları

Bu tez çalışmasında yayılma tablası deneyi ile taze geopolimer harç karışımlarının yayılma çapları tayin edilmiştir. ASTM C230 [147] şartnamesine göre deney uygulanmıştır. Taze geopolimer harç karışımları iki kat halinde yayılma tablasına doldurulmuştur. Her kat, tokmak ile 20 kere sıkıştırılmıştır. Sonra yavaşça çıkarılarak 15 saniyede 25 kez akış tablası düşürülmüştür. Daha sonra birbirine dik olan çaplar ölçülmüş ve ölçülen değerler kaydedilmiştir. Deney sonrası kaydedilen bu iki birbirine dik doğrultudaki değerlerin ortalamaları alınarak yayılma çapları tayin edilmiştir. Yayılma tablası deney sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir.

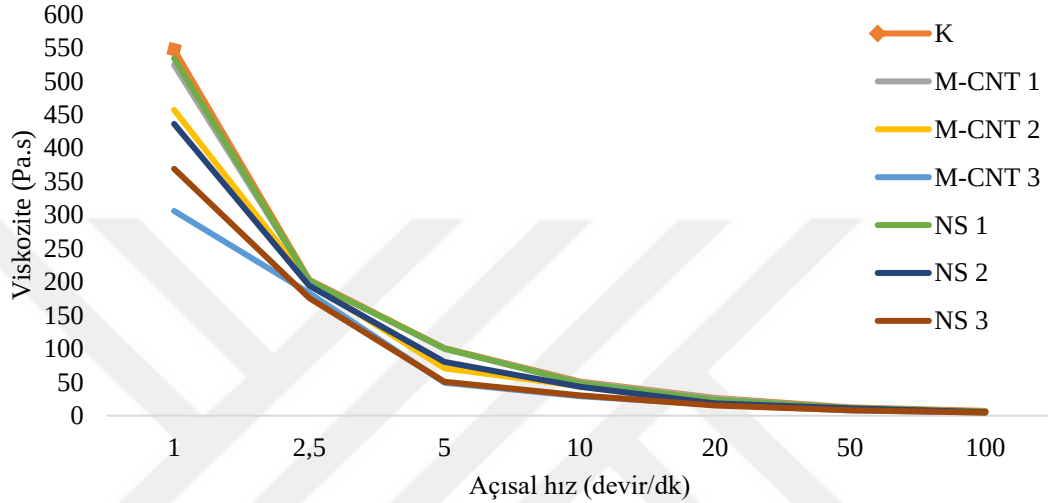


Şekil 4.6 3B geopolimer harçların yayılma tablası deney sonuçları

Geopolimer kompozitlere nanomalzemeler eklenmesi, harcın akışkanlık özelliklerini azaltır ve yayılma çapı değerlerini düşürür. Bu tez çalışmasında nanomalzeme içermeyen K serisine göre, nanomalzeme içeren diğer tüm serilerde akışkanlık indeksi ve yayılma çapı azalmıştır. Nanomalzemelerin büyük spesifik yüzey alanlarına sahip olmaları, alkalilerle hızlı reaksiyona girmeleri ve bunların sonucunda viskoz ve aderansı yüksek bir geopolimer matris oluşumu sağladıkları için işlenebilirlik azalmıştır [148]. Durak ve arkadaşları [90] NS ilavesinin, geopolimer kompozitte akışkanlık özelliklerini, kontrol numunesine göre azalttığını deney sonuçlarından elde etmişlerdir. Geopolimer kompozite NS ilavesi, nanomalzemenin spesifik yüzey alanını artırıp daha fazla su emilimine neden olarak işlenebilirliği azaltmıştır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar literatürle uyumludur.

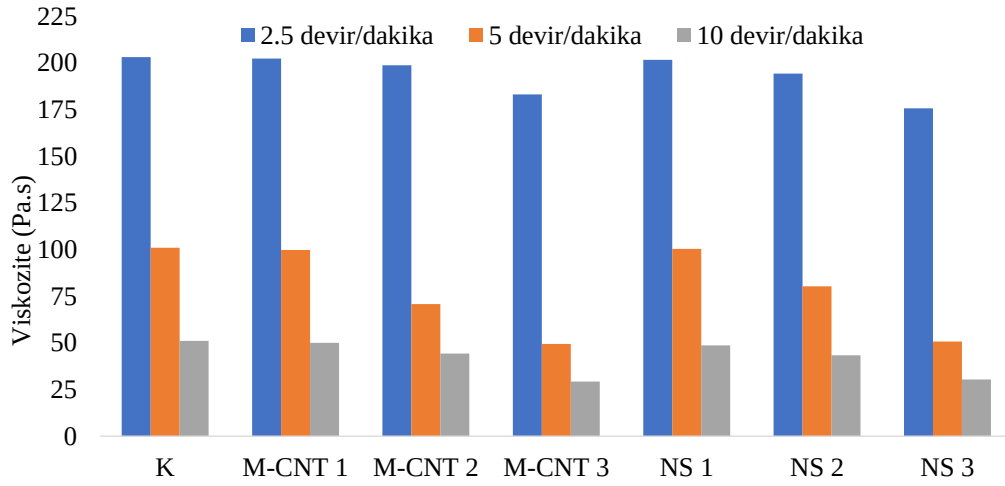
4.1.4 Viskozite deney sonuçları

Taze geopolimer harç karışımları için 1, 2.5, 5, 10, 20, 50 ve 100 devir/dakika açısal dönme hızlarında karıştırma işleminden sonra viskozite ölçümleri Brookfield DV-E model viskozimetre cihazı ile yapılmıştır. Deneyde, tüm seride 6 numaralı mil (spindle) kullanılarak harç viskozitesi ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak çizilen viskozite-açısal hız grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 3B geopolimer harçların viskozite-açısal dönme hızı değişim sonuçları

Bütün serilerde açısal hızın artmasıyla viskozite değerleri doğrusal olmayan azalma göstermiş ve eğriler X eksenine doğru asimptotik bir yaklaşım sergilemişlerdir. Nanomalzeme içermeyen K serisinin viskozitesi, diğer tüm serilere göre daha yüksek elde edilmiştir. Geopolimer harç numunelerine nanomalzeme ilavesi ile viskozitenin azalma gösterdiği literatürden bilinmektedir [149]. Nanomalzeme içeren tüm taze geopolimer harç karışım serilerinde viskozite değeri nanomalzeme içermeyen K serisine göre azalmıştır. Şekil 4.8’de tüm seriye ait harçların viskozite değişim sonuçları, üç farklı açısal dönme hızları (2,5, 5 ve 10 devir/dakika) ile birlikte verilmiştir.



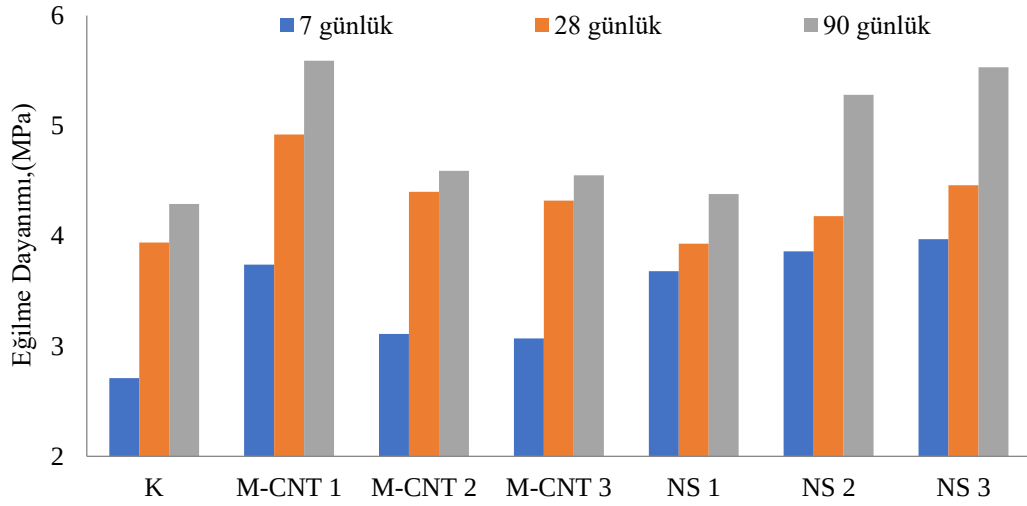
Şekil 4.8 3B geopolimer harçların viskozite sonuçları

Şekil 4.8 incelendiğinde, nanomalzeme ilavesinin viskozite üzerindeki etkisinin düşük açısız hızlarda daha belirgin olduğu, yüksek açısız hızlarda azaldığı tespit edilmiştir. Geopolimer harç numunelerine nanomalzemelerin ilavesi ile viskozite azalmıştır. Bu durum literatürle de uyumludur [149]. Açısız hızın artmasıyla harcın kaymaya (akmaya) karşı gösterdiği direnç azaldığından grafikte, viskozite eğrileri giderek daha düşük konumlanmıştır, dolayısıyla viskozite değerleri de azalmıştır [150].

4.2 3B Geopolimer Harçların Mekanik Özellikleri

4.2.1 Eğilme dayanımı sonuçları

3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç kontrol numunelerinin (K) 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 2,71 MPa, 3,94 MPa ve 4,29 MPa olarak bulunmuştur. En yüksek eğilme dayanımı sonuçları çok duvarlı karbon nanotüp (M-CNT) içeren serilerden ağırlıkça %0,25 oranda nanomalzeme içeren M-CNT 1 serisinden elde edilmiştir. Bu seride 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 3,74 MPa, 4,92 MPa ve 5,59 MPa olarak bulunmuştur. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç M-CNT 1 numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç K numunelerine göre sırasıyla %38, %24,9 ve %30,3 artış göstermiştir.



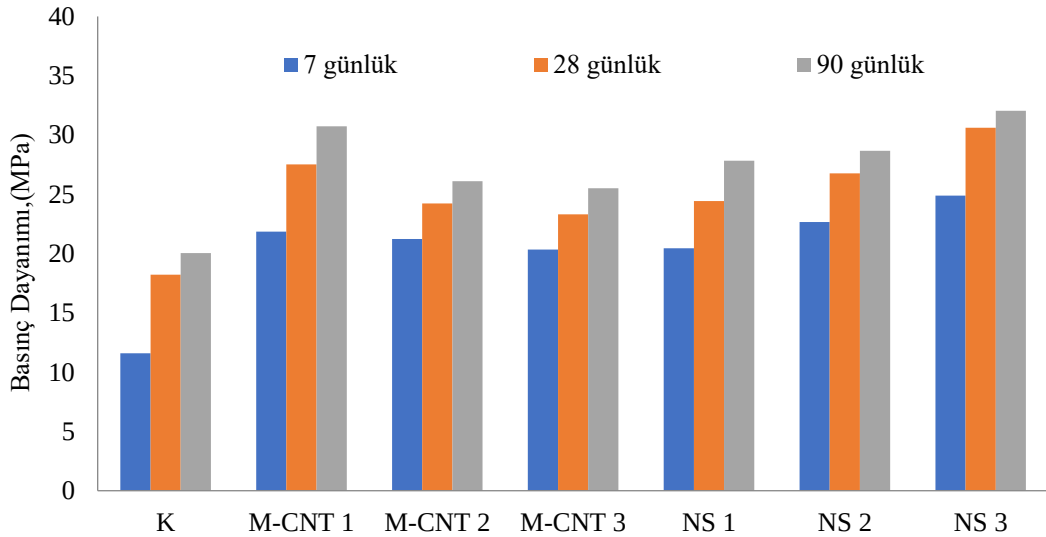
Şekil 4.9 3B geopolimer harçların eğilme dayanımı sonuçları

Saafi ve arkadaşları [151] %0,1-0,5 M-CNT içeren geopolimer numunelerinde çalışmamızda olduğu gibi eğilme dayanımı değerlerinde artış elde etmişlerdir. Kotop ve arkadaşları [152] 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarında %0,2 M-CNT içeren numunelerde kontrol numunelerine göre %15,8 dayanım artışı elde ederken; bu tez çalışmasında M-CNT 1 serisinde kontrol numunelerine göre %24,9 dayanım artışı elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı test sonuçları nano silisyum dioksit (NS) içeren serilerden ağırlıkça %0,75 oranda nanomalzeme içeren NS 3 serisinden elde edilmiştir. Bu seride 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 3,97 MPa, 4,46 MPa ve 5,53 MPa olarak bulunmuştur. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç NS 3 numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç K numunelerine göre sırasıyla %46,5, %13,2 ve %28,9 artış göstermiştir. Ağırlıkça daha yüksek oranda NS içeren çalışmalarda eğilme dayanımı artış oranları daha düşük iken, çalışmamızda %0,75 NS içeren geopolimer harçlarda eğilme dayanımı kontrol numunesine göre %13,2 artış göstermiştir [138, 139]. Saini ve arkadaşları [153] %2 NS içeren numunelerde yaklaşık %7 artış elde etmişlerdir. Tüm seriler incelendiğinde, 7 günlük en yüksek eğilme dayanımı sonuçları NS 3 serisinden elde edilmiştir. En yüksek eğilme dayanımı hem 28, hem de 90 günlük test sonuçlarında M-CNT 1 serisinden elde edilmiştir. Nanomalzeme içeren tüm serilerde 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları, 7 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre artış göstermiştir. Benzer şekilde 90 günlük eğilme dayanımı sonuçları, 28 günlük eğilme dayanımı sonuçlarına göre artış göstermiştir.

Nanomalzemelerin 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç karışımları içerisinde filler etkisi meydana getirerek mevcut boşlukları doldurması, daha geçirimsiz bir mikro yapı oluşturması ve reaksiyona girmesi ile dayanım artışına neden olmuştur. İki farklı nanomalzeme kullanılarak 3B yazıcı ile üretilen 6 seri geopolimer harç numuneleri arasında, nanomalzeme içermeyen kontrol serisi numunelerine göre en yüksek eğilme dayanımı değerleri M-CNT 1 serisinden elde edilmiştir. M-CNT 1 numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımları NS 3 serisine göre yaklaşık %10,3 daha yüksek elde edilmiştir. Seloğlu ve arkadaşları [154] %0,5 M-CNT, NS ve NZ içeren 7 ve 28 gün kür edilen geopolimer harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımı sonuçlarını rapor etmişlerdir. %0,5 M-CNT, NS ve NZ içeren geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı sonuçlarını nanomalzeme içermeyen geopolimer harç numunelere göre sırasıyla %17,94, %11,63 ve %8,64 oranında artırmışlardır.

4.2.2 Basınç dayanımı sonuçları

3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir. Basınç dayanımı sonuçları, eğilme dayanımı sonuçlarıyla paralellik göstermiştir.



Şekil 4.10 3B geopolimer harçların basınç dayanımı sonuçları

Şekil 4.10 incelendiğinde, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç kontrol numunelerinin (K) 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 11,59 MPa, 18,22 MPa ve 20,05 MPa olarak bulunmuştur. Nanomalzemeler içerisinde tüm serilerde en yüksek basınç dayanımı sonuçları, en yüksek eğilme dayanımı sonuçlarıyla paralellik

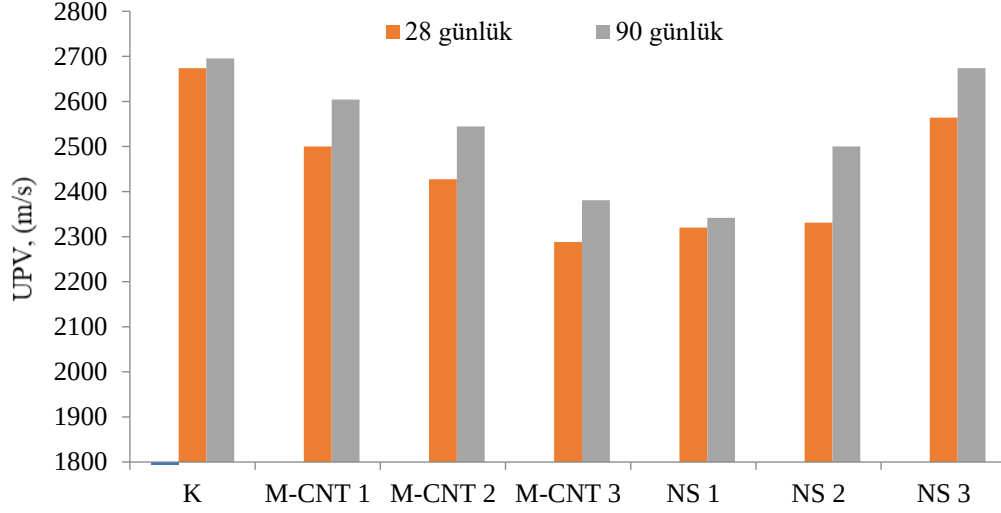
göstermiştir. Sırasıyla NS 3 ve M-CNT 1 serilerinde en yüksek basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı sonuçları çok duvarlı karbon nanotüp (M-CNT) içeren serilerden ağırlıkça %0,25 oranda nanomalzeme içeren M-CNT 1 serisinden elde edilmiştir. Bu seride 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 21,85 MPa, 27,52 MPa ve 30,73 MPa olarak bulunmuştur. 3B geopolimer harç M-CNT 1 serisi numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, 3B geopolimer harç K serisi numunelerine göre sırasıyla yaklaşık %88,5, %51 ve %53,3 artış göstermiştir. Benzer oranlarda M-CNT içeren literatürdeki araştırmalara göre, bu çalışmada 3B geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı artış oranı daha yüksek elde edilmiştir [155-157]. Collins ve arkadaşları [157] %0,5 M-CNT içeren harç numunelerinde, kontrol numunelerine göre ortalama %25 basınç dayanımında artış elde ederken, Oualit ve arkadaşları [156] %0,2 M-CNT içeren harç numunelerinde, kontrol numunelerine göre yaklaşık %29 basınç dayanımında artış elde etmişlerdir. Literatürde M-CNT içeren kompozitlerde, bu tez çalışmasına benzer basınç dayanımı artış oranları da görülmüştür [86, 158]. Alvi ve arkadaşları [86], %0,25 M-CNT içeren kaya bazlı geopolimerin 28 günlük basınç dayanımını kontrol numunelerine göre yaklaşık %45 artırdığını çalışmalarında ifade etmişlerdir. Abbasi ve arkadaşları [159], Rovnanik ve arkadaşları [158] araştırmalarında %0,5 M-CNT içeren numunelerde en yüksek basınç dayanımı sonuçlarını elde etmişlerdir. Nanomalzeme içeren geopolimer harç numunelerindeki dayanım artışı, nano boyutlu malzemenin yüksek özgül yüzey alanından ve yüksek reaktivitesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, M-CNT'lerin eklenmesi gözenek boyutu dağılımını inceler ve boşlukları doldurarak kompozitlerin gözenekliliğini veya nano gözenekliliğini azaltır. Böylelikle kompozitler çok daha sıkıştırılmış hale gelerek dayanım artışı sağlar [155]. Basınç dayanımındaki artış, M-CNT'nin geopolimer matris içerisinde doldurucu etki yapmasına ve matrisin daha yoğun bir hal almasına atfedilir. En yüksek basınç dayanımı sonuçları nano silisyum dioksit (NS) içeren serilerden ağırlıkça %0,75 nanomalzeme içeren NS 3 serisinden elde edilmiştir. Bu seride 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 24,89 MPa, 30,61 MPa ve 32,05 MPa olarak bulunmuştur. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç NS 3 numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç K numunelerine göre sırasıyla yaklaşık %114,8, %68 ve %59,9 artış göstermiştir. Literatürdeki NS

kullanılarak üretilen geopolimer numunelere göre ağırlıkça daha az NS içeren bu tez çalışmasında, daha yüksek basınç dayanımı performansı elde edildiği açıkça görülmektedir [30, 87, 160]. Nuaklong ve arkadaşları [161] %2 NS içeren numunelerde 28 günlük basınç dayanımını, kontrol numunelerine göre %29 arttırdığını ifade etmişlerdir. Behfarnia ve arkadaşları [87] %3 NS içeren numuneler ile %12, İbrahim ve arkadaşları [162] %5 NS içeren numuneler ile %25 ve Mahboubi ve arkadaşları [163] ise %3 NS içeren numuneler ile %44 basınç dayanımını artırdıklarını çalışmalarında ifade etmişlerdir. Bu tez çalışmasında %0,75 NS kullanılarak üretilen geopolimer numunelerde 28 günlük basınç dayanımı kontrol numunelerine göre %68 artış göstermiştir. NS kullanımı ile basınç dayanımı değerinde artış olması, NS'nin $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek ekstra C-S-H jelleri oluşturmaya atfedilir [23]. Tüm seri birlikte değerlendirildiğinde, en yüksek basınç dayanımı sonuçları tüm kür sürelerinde de (7, 28 ve 90 günlük test sonuçlarında) NS 3 serisinden elde edilmiştir. Kür süresi ile basınç dayanımlarında artışlar meydana gelmiştir. Nanomalzemelerin 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç karışımları içerisinde filler etkisi meydana getirerek mevcut boşlukları doldurması, daha geçirimsiz bir mikro yapı oluşturmaya ve reaksiyona girerek N-A-S-H oluşturmaya ile dayanım artışına neden olmuştur [148]. İki farklı nanomalzeme kullanılarak 3B yazıcı ile üretilen 6 seri geopolimer harç numuneleri arasında, nanomalzeme içermeyen kontrol serisi numunelerine göre en yüksek basınç dayanımı değerleri NS 3 serisinden elde edilmiştir. 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinden NS 3 serisinin 28 günlük basınç dayanımı M-CNT 1 serisine göre yaklaşık %11,23 daha yüksek elde edilmiştir.

Bu tez çalışması, 3B yazıcı ile üretimin maliyet ve su tüketimi açısından geleneksel inşaat yöntemlerine göre önemli avantajlar sunduğunu, geleneksel inşaat ve işçilikle ilgili maliyetlerde sırasıyla %78'e ve %60'a varan tasarruf potansiyeli sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca 3B yazıcı ile üretim, küresel enerji kullanımını 2025'e kadar %5 oranında azaltma potansiyeline sahiptir ve bu da onu sürdürülebilirlik hedeflerine ulaştırmada umut verici bir çözüm haline getirmektedir. Bununla birlikte, 3B yazıcı ile üretimin iklim değişikliği üzerindeki etkisi geleneksel inşaat yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha düşük olmasına rağmen, sürdürülebilirliğini geliştirmek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır [164].

4.2.3 Ultrases geçiş hızı sonuçları

3B yazıcı ile üretilen, 28 ve 90 gün ortam şartlarında (20 ± 2 °C) kür edilen geopolimer harç numunelerinin UPV deney sonuçları Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 3B geopolimer harçların UPV deney sonuçları

Bu tez çalışmasında UPV deney sonuçları, basınç dayanımı sonuçlarıyla paralellik göstermiştir. Nanomalzeme içermeyen kontrol serisinde ve nanomalzeme içeren tüm serilerde 90 günlük UPV deney sonuçları, 28 günlük UPV deney sonuçlarına göre artış göstermiştir. İki farklı nanomalzeme kullanılarak 3B yazıcı ile üretilen 6 seri 3B geopolimer harç numuneleri arasında en yüksek UPV değeri NS 3 serisinden elde edilmiştir. NS 3 serisinin 28 günlük UPV sonuçları M-CNT 1 serisine göre yaklaşık %2,6 daha yüksek elde edilmiştir. NS 3 ve M-CNT 1 serilerinin 90 günlük UPV deney sonuçları, 28 günlük UPV deney sonuçlarına göre sırasıyla yaklaşık %4,3 ve %4,2 artış göstermiştir.

4.3 3B Geopolimer Harçların Donma-özölme Deney Sonuçları

Bu tez çalışmasında donma-çözölme deneyi TS EN 15177 [143] standardına göre yapılmıştır. Donma-özölme sonrası 3B geopolimer harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları, UPV sonuçları, ağırlık değışimleri incelenmiş ve donma-çözölme öncesi deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Donma-özölme deneyine maruz bırakılan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numuneleri Şekil 4.12'de verilmiştir.



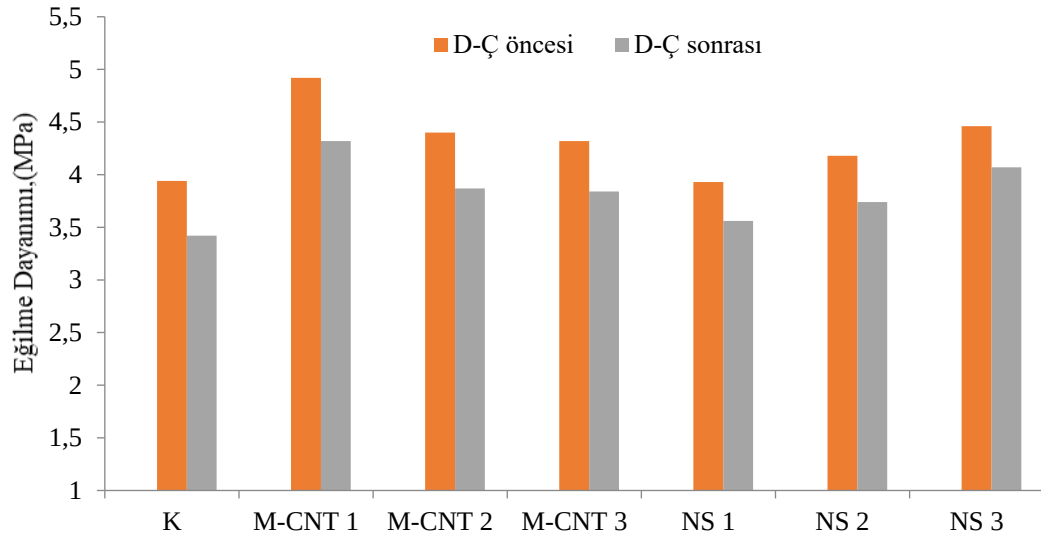
Şekil 4.12 Donma-çözülme deneyine maruz bırakılan numuneler

4.3.1 Donma-çözülme maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı sonuçları

Donma-çözülme maruz kalmış 3B geopolimer harç numuneleri Şekil 4.13'te ve bu numunelerin eğilme dayanımı deney sonuçları ise Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.13 Donma-çözülme maruz kalmış numuneler



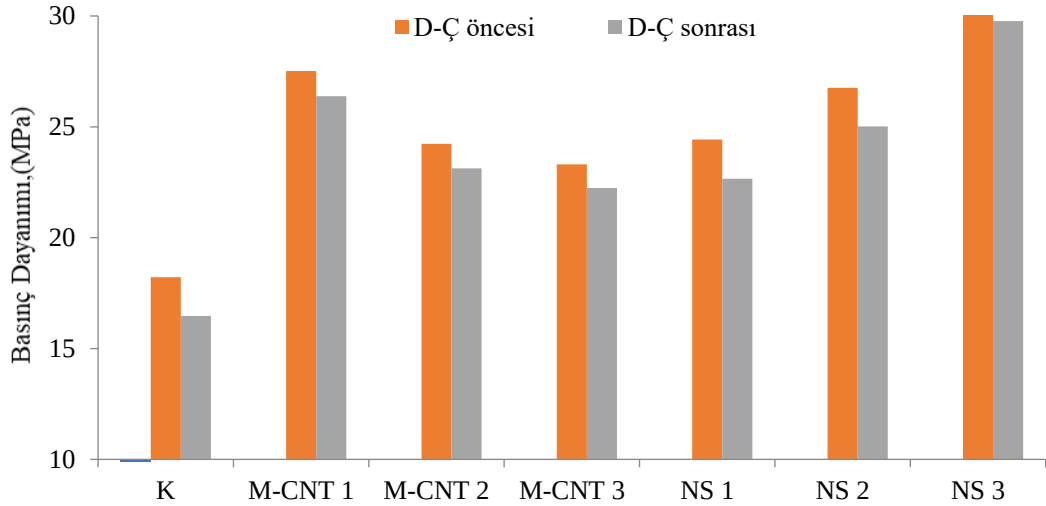
Şekil 4.14 Donma-çözülme sonrası numunelerin eğilme dayanımı sonuçları

Numunelerin tümünde donma-çözülme sonrası eğilme dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. Donma-çözülmeye maruz kalan K serisi, donma-çözülme sonrası eğilme dayanımını %86,80 korumuştur. Donma-çözülme sonrası en yüksek eğilme dayanımı sonuçları çok duvarlı karbon nanotüp (M-CNT) içeren serilerden ağırlıkça %0,25 oranda nanomalzeme içeren M-CNT 1 serisinden elde edilmiştir. Bu seride donma-çözülme sonrası 3B geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla 4,32 MPa, 3,87 MPa ve 3,84 MPa olarak elde edilmiştir. Donma-çözülme sonrası M-CNT 1 serisinin eğilme dayanımı, K serisine göre yaklaşık olarak %26,32 artış göstermiştir. Donma-çözülme sonrası eğilme dayanımlarını M-CNT içeren seriler sırasıyla yaklaşık %87,80, %87,95 ve %88,89 korumuştur. Donma-çözülme sonrası en yüksek eğilme dayanımı sonuçları nano silisyum dioksit (NS) içeren serilerden ağırlıkça %0,75 oranda nanomalzeme içeren NS 3 serisinden elde edilmiştir. Bu NS içeren seride donma-çözülme sonrası 3B geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları ise sırasıyla 3,56 MPa, 3,74 MPa ve 4,07 MPa olarak bulunmuştur. Donma-çözülme sonrası NS 3 serisinin eğilme dayanımı, K serisine göre yaklaşık olarak %19 artış göstermiştir. Donma-çözülmeye maruz kalan NS serisi, donma-çözülme sonrası eğilme dayanımlarını sırasıyla yaklaşık %90,59, %89,47 ve %91,26 korumuştur. İki farklı nanomalzeme kullanılarak 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numuneleri arasında, nanomalzeme içermeyen kontrol serisi numunelerine göre en yüksek donma-çözülme sonrası eğilme dayanımı sonuçları M-CNT 1 serisinden elde

edilmiştir. M-CNT 1 serisinin donma-çözülme sonrası eğilme dayanımı sonuçları NS 3 serisine göre yaklaşık %6,14 daha yüksek elde edilmiştir. Donma-çözülme durabilitesi sonrası nanomalzeme içeren serilerde eğilme dayanımını koruyan en iyi seriler ise sırasıyla NS 3 ve M-CNT 3 olmuştur. Bu seriler eğilme dayanımlarını sırasıyla yaklaşık %91,26 ve %88,89 korumuştur.

4.3.2 Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.15'te verilmiştir.



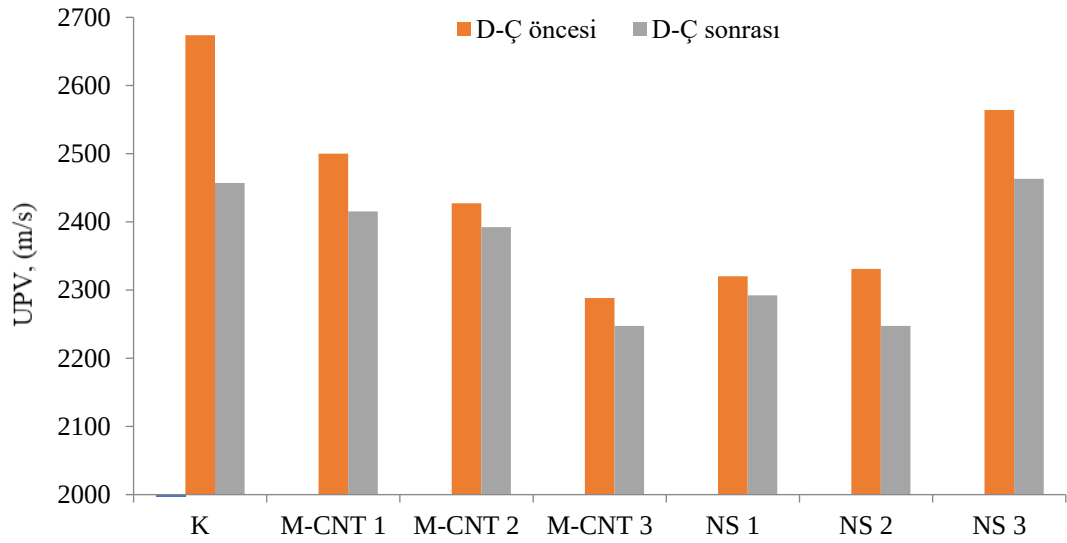
Şekil 4.15 Donma-çözölme sonrası numunelerin basınç dayanımı sonuçları

3B geopolimer harç numuneleri donma-çözölmeye maruz kaldıktan sonra basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. Donma-çözölmeye maruz kalan K serisi, donma-çözölme sonrası basınç dayanımını %90,4 oranda korumuştur. Donma-çözölme sonrası tüm serilerde, en yüksek basınç dayanımı sonuçları nano silisyum dioksit (NS) içeren serilerden ağırlıkça %0,75 oranda nanomalzeme içeren NS 3 serisinden elde edilmiştir. NS 1, NS 2 ve NS 3 serilerinde donma-çözölme sonrası 3B geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 22,66 MPa, 25,02 MPa ve 29,77 MPa olarak elde edilmiştir. Donma-çözölme sonrası NS 3 serisinin basınç dayanımı, kontrol numunesine göre yaklaşık olarak %80,75 artış göstermiştir. Donma-çözölmeye maruz kalan NS 1, NS 2 ve NS 3 serileri donma-çözölme sonrası basınç

dayanımlarını sırasıyla yaklaşık %92,75, %93,50 ve %97,26 oranlarında korumuştur. Donma-çözülme sonrası en yüksek basınç dayanımı sonuçları çok duvarlı karbon nanotüp (M-CNT) içeren serilerden ağırlıkça %0,25 oranda nanomalzeme içeren M-CNT 1 serisinden elde edilmiştir. 3B geopolimer harç numunelerinin M-CNT 1, M-CNT 2 ve M-CNT 3 serilerinde donma-çözülme sonrası basınç dayanımları sırasıyla 26,38 MPa, 23,13 MPa ve 22,24 MPa olarak elde edilmiştir. Donma-çözülme sonrası M-CNT 1 serisinin basınç dayanımı, kontrol serisine göre yaklaşık olarak %67,1 artış göstermiştir. Donma-çözülme sonrası M-CNT 1, M-CNT 2 ve M-CNT 3 serileri basınç dayanımlarını sırasıyla yaklaşık %95,86, %95,46 ve %95,41 korumuştur. Shahrajabian ve Behfarnia [165] 300 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan NS içermeyen geopolimer kontrol numuneleri, donma-çözülme sonrası basınç dayanımı %93,86 oranda korumuş olduğunu araştırmalarında ifade etmişlerdir. 300 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan %1 NS, %2 NS ve %3 NS içeren geopolimer numuneleri, donma-çözülme sonrası basınç dayanımlarını sırasıyla %94,44, %95,11 ve %95,90 oranlarında korumuştur. İki farklı nanomalzeme kullanılarak 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numuneleri arasında, nanomalzeme içermeyen kontrol serisi numunelerine göre donma-çözülme sonrası en yüksek basınç dayanımı değerleri NS 3 serisinden elde edilmiştir. NS 3 serisinin donma-çözülme sonrası basınç dayanımı sonuçları M-CNT 1 serisine göre yaklaşık %12,85 daha yüksek elde edilmiştir. Donma-çözülme sonrası nanomalzeme içeren serilerde basınç dayanımını koruyan en iyi seriler ise sırasıyla NS 3 ve M-CNT 1 serileri olmuştur. Bu seriler donma-çözülme sonrasında basınç dayanımlarını sırasıyla %97,26 ve %95,86 oranlarında korumuştur.

4.3.3 Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerin UPV sonuçları

Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerinin UPV deney sonuçları Şekil 4.16'da verilmiştir.



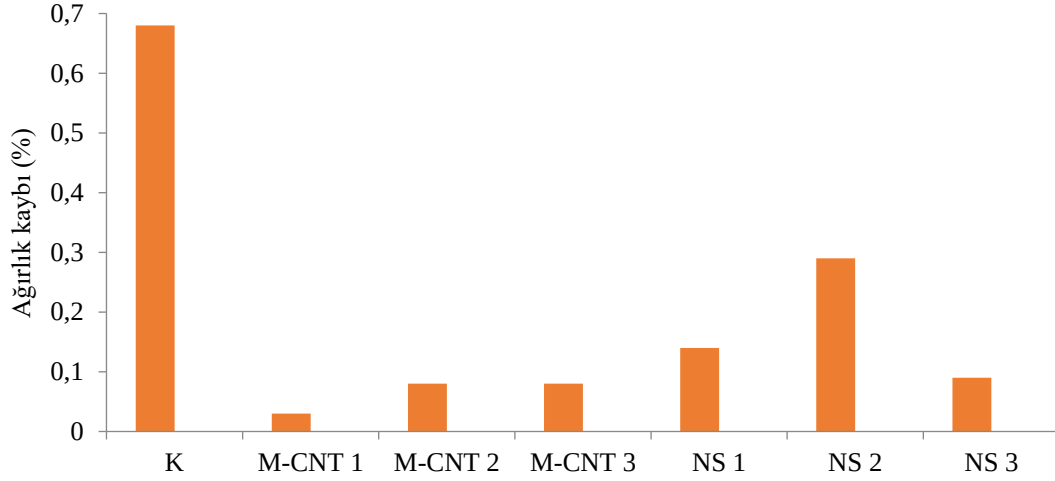
Şekil 4.16 Donma-çözülme sonrası numunelerin UPV deney sonuçları

Donma-çözülme sonrası UPV deney sonuçlarından, basınç dayanımı deney sonuçlarıyla benzer sonuçlar elde edilmiştir. 3B geopolimer harç numunelerin tümünde donma-çözölmeye maruz bırakıldıktan sonraki UPV sonuçlarında düşüşler meydana gelmiştir. Donma-çözölme sonrası en yüksek UPV deney sonuçları, en yüksek basınç dayanımı deney sonuçlarına sahip olan NS 3 serisinden 2463,1 m/s olarak elde edilmiştir. NS 3 serisinin donma-çözölme sonrası UPV sonuçları M-CNT 1 serisine göre yaklaşık %2 daha yüksek elde edilmiştir. Aygörmez ve arkadaşları [166] MK tabanlı geopolimer kompozitlerin donma-çözölme sonrası UPV sonuçlarını araştırmışlardır. Bu tez çalışmasına benzer şekilde en yüksek basınç dayanımı sonuçları elde edilen serilerden, donma-çözölme sonrası en yüksek UPV sonuçları elde etmişlerdir. Bu serinin donma-çözölme sonrası UPV sonuçları, donma-çözölmeye maruz bırakılmayan seriye göre yaklaşık %3 daha düşük elde edilmiştir.

4.3.4 Donma-çözölmeye maruz kalmış 3B geopolimer harç numunelerin ağırlık değişimleri

Bu tez çalışmasında 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin donma-çözölmeye maruz bırakılmadan önce ve maruz bırakıldıktan sonra ağırlık değişimleri incelenmiştir. Ağırlık değişimleri belirlendikten sonra her seride bulunan 3B

geopolimer harç numunelerinin yüzde (%) olarak ağırlık kayıpları hesap edilmiş ve Şekil 4.17’de verilmiştir.



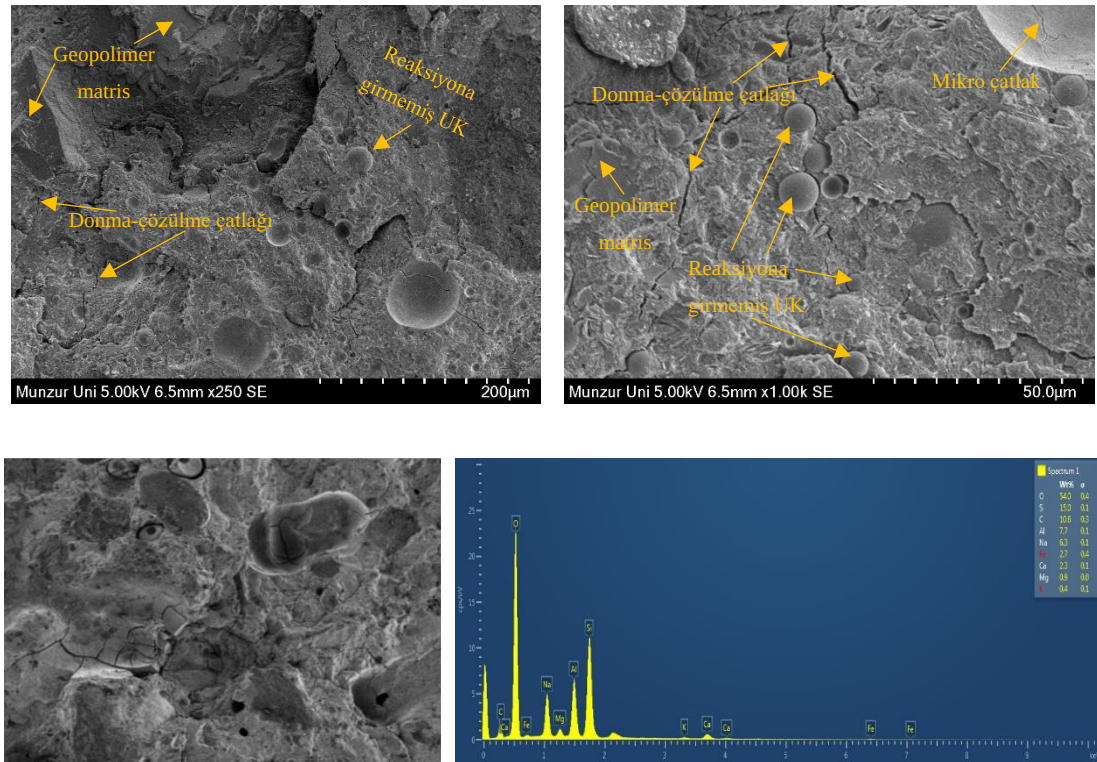
Şekil 4.17 3B geopolimer harçların ağırlık değişimleri (%)

Şekil 4.17 incelendiğinde, donma-çözölmeye maruz kalan tüm 3B geopolimer harç numunelerinin ağırlıklarında bir kayıp oluşmuştur. Ancak bu kayıp, çok düşük miktarda olmuştur. Tüm seri incelendiğinde en yüksek ağırlık kaybının bile %1’in altında olduğu görölmektedir. M-CNT 1, M-CNT 2 ve M-CNT 3 serilerinin ağırlık kayıpları sırasıyla %0,03, %0,08 ve %0,08 olarak bulunmuştur. Yang ve arkadaşları [167] %0,45 M-CNT içeren cüruf tabanlı geopolimerlerin donma-çözölme durabilitesini araştırdıkları çalışmalarında, 300 donma-çözölme döngüsüne maruz kalan numunelerde donma-çözölme sonrası %1 ağırlık kaybı elde etmişlerdir. Li ve arkadaşları [168] %0,05-0,15 M-CNT içeren UK tabanlı geopolimerin donma-çözölme sonrası ağırlık kayıplarını araştırmışlardır. 50 ve 75 donma-çözölme döngüsü sonrası M-CNT içermeyen kontrol numunelerinde ağırlık kayıpları sırasıyla %4,7 ve %5,6 olarak bulunurken, M-CNT içeren ve 175 donma-çözölme döngüsüne maruz kalan geopolimer numunelerde ağırlık kaybı %4,5 olarak bulunmuştur. Geopolimer matrisin mikro gözenekleri ve mikro çatlakları doldurması, gözeneklerdeki serbest suyun azalmasına neden olmuştur. Bu durum, yüksek süneklığe sahip geopolimerde düşük hidrostatik basınç ve buzun genleşme basıncı ile donma-çözölme durabilitesine karşı iyi direnç göstermesine atfedilir [168]. En yüksek ağırlık kayıpları nanomalzeme içermeyen kontrol numunesi K serisinde %0,68 olarak bulunmuştur. Shahrajabian ve Behfarnia [165] 300 donma-çözölme döngüsüne maruz kalan NS içeren

geopolimerlerde, kontrol numunesine göre ağırlık kaybını %3 olarak elde etmişlerdir. Bu tez çalışmasında NS içeren NS 1, NS 2 ve NS 3 serilerinde sırasıyla ağırlık kayıpları %0,14, %0,29 ve %0,09 olarak bulunmuştur.

4.4 3B Geopolimer Harçların Mikro Yapı Analizi Sonuçları

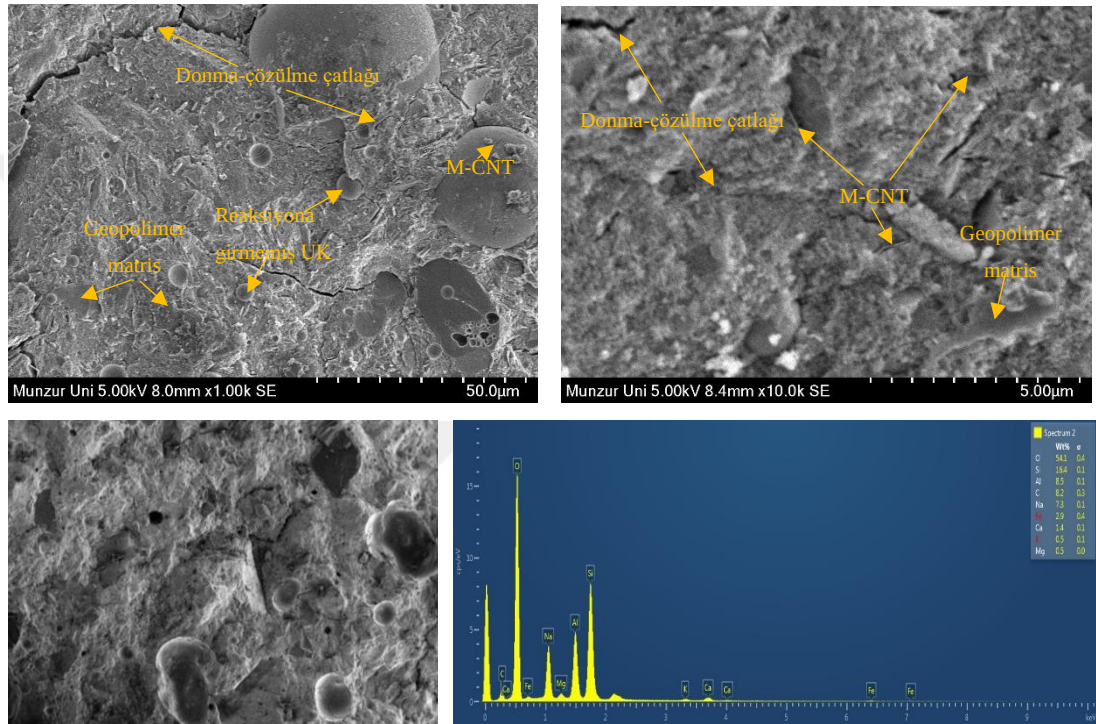
Bu tez çalışmasında, donma-çözölmeye maruz kalan 3B geopolimer harç numunelerin mikro yapısal analizleri yapılmıştır. Her nanomalzemeye ait seriden en yüksek ve en düşük dayanıma sahip olan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin ve nanomalzeme içermeyen 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç kontrol numunesinin mikro yapı analizleri yapılması için seçilmiştir. Şekil 4.18’de K serisine ait numunelerinin SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.



Şekil 4.18 K serisinin SEM/EDX sonuçları

Şekil 4.18’de donma-çözölmeye maruz kalan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin mikroyapısal SEM görüntüleri incelendiğinde geopolimer matris oluşumu, donma-çözölme çatlakları ve mikro çatlaklar, reaksiyona girmemiş UK ve boşluk yapısı görölmektedir. Donma-çözölme sonrası betonlarda veya harçlarda boyutları 0,1-10 µm arasında değişebilen yeni mikro çatlaklar oluşur. Bu mikro

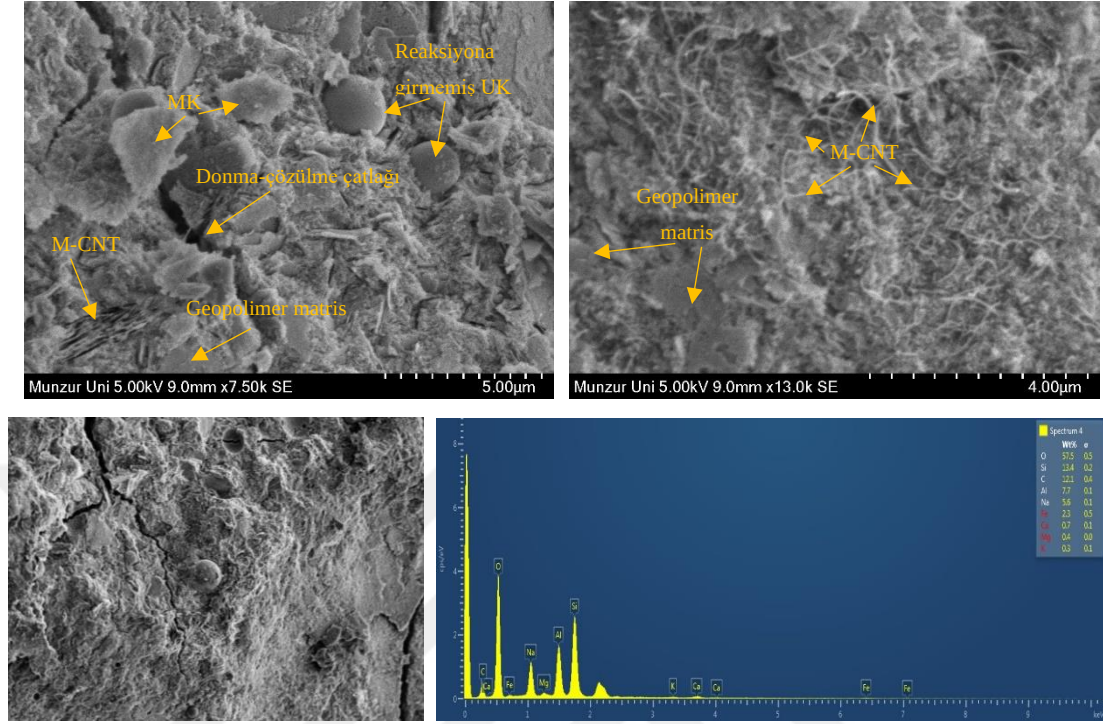
çatlakların oluşumu mikroyapıda gelişen ısısal gerilmelerin zıt yönde ve tekrarlı olmasından kaynaklanmaktadır [169]. Şekil 4.18’de donma-çözölmeye maruz kalan 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinin EDX analizi sonuçları incelendiğinde O, Si, C, Al, Na, Fe, Ca, Mg ve K elementlerinin ağırlıkça dağılımı %54, %15, %10,6, %7,7, %6,3, %2,7, %2,3, %0,9 ve %0,4 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.19’da M-CNT 1 serisine ait numunelerinin SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.



Şekil 4.19 M-CNT 1 serisinin SEM/EDX sonuçları

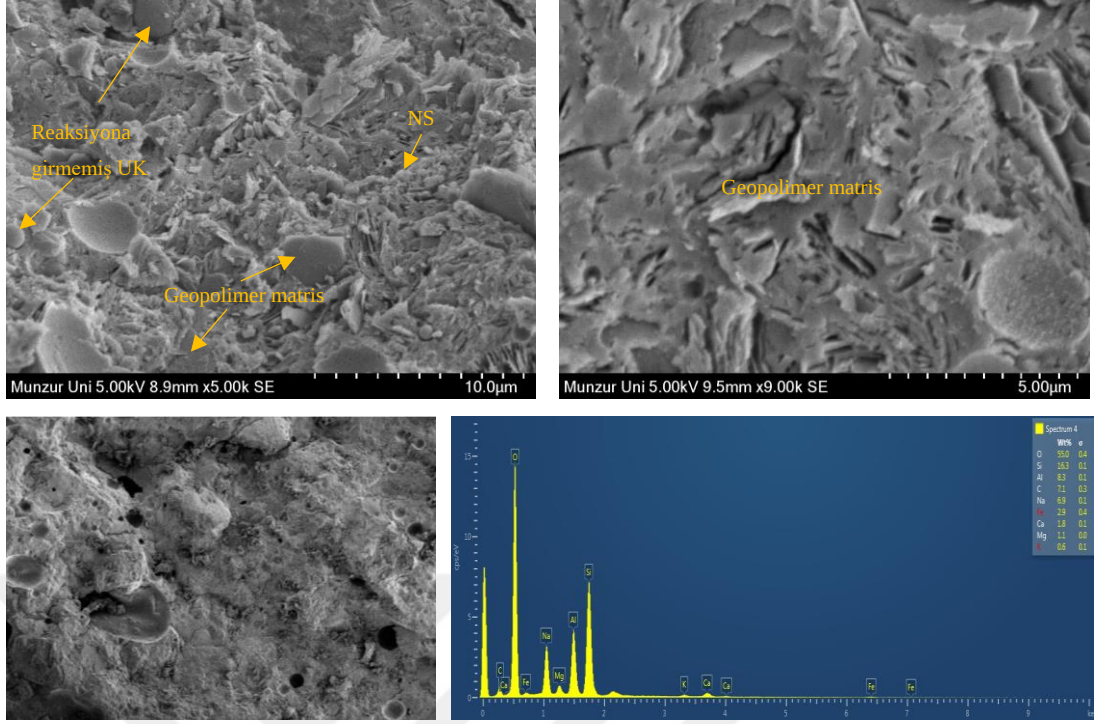
Şekil 4.19’da 3B geopolimer harç numunelerinin mikroyapısal SEM görüntüleri incelendiğinde geopolimer matris oluşumu, donma-çözölme çatlakları ve reaksiyona girmemiş UK yapısı görölmektedir. Saafi ve arkadaşları [151] %0,1-0,5 M-CNT içeren UK tabanlı geopolimer kompozit ürettikleri çalışmalarında 10000X SEM görüntüsünde daha yoğun M-CNT varlığı ve geopolimer matris oluşumu elde etmişlerdir. Bu tez çalışmasında benzer geopolimer matris oluşumu, 7500X ve 13000X SEM görüntülerinde sırasıyla yoğun ve çok daha yoğun M-CNT varlığı elde edilmiştir. Şekil 4.19’da 3B geopolimer harç numunelerinin EDX analizi sonuçları incelendiğinde O, Si, Al, C, Na, Fe, Ca, K ve Mg elementlerinin ağırlıkça dağılımı sırasıyla %54,1, %16,4, %8,5, %8,2, %7,3, %2,9, %1,4, %0,5 ve %0,5 olarak elde edilmiştir. M-CNT 1 serisinde C elementi K serisine göre %6,5 artış göstermiştir.

Şekil 4.20’de M-CNT 3 serisine ait numunelerinin SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.



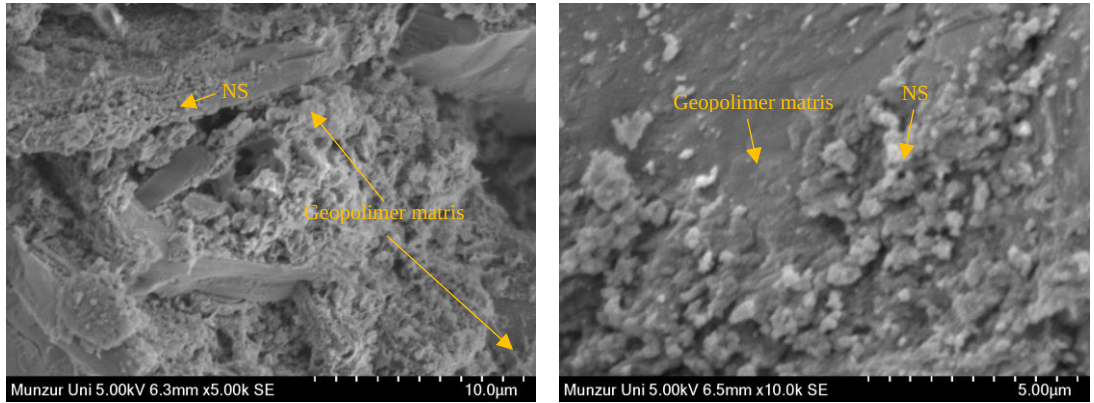
Şekil 4.20 M-CNT 3 serisinin SEM/EDX sonuçları

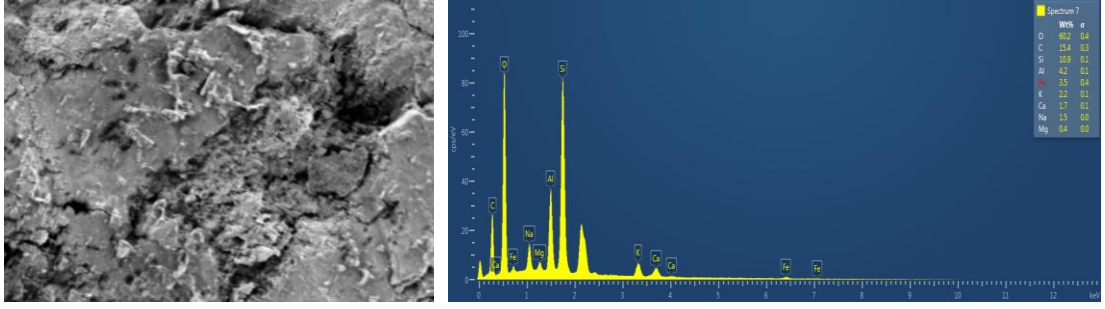
Şekil 4.20’de 3B geopolimer harç numunelerinin mikroyapısal SEM görüntüleri incelendiğinde geopolimer matris oluşumu, donma-çözülme çatlakları ve mikro çatlaklar ve reaksiyona girmemiş UK görülmektedir. Yuan ve arkadaşları [170] çalışmalarında, bu tez çalışmasına benzer SEM görüntüsünde M-CNT varlığını tespit etmişlerdir [170, 171]. Şekil 4.20’de 3B geopolimer harç numunelerinin EDX analizi sonuçları incelendiğinde O, Si, C, Al, Na, Fe, Ca, Mg ve K elementlerinin ağırlıkça dağılımı sırasıyla %57,5, %13,4, %12,1, %7,7, %5,6, %2,3, %0,7, %0,4 ve %0,3 olarak elde edilmiştir. M-CNT 3 serisinde C elementi M-CNT 1 serisine göre %47,6 artış göstermiştir. Dolayısıyla, M-CNT 3 serisinde M-CNT 1’e göre daha yoğun bir M-CNT elde edilmiştir. Şekil 4.21’de NS 3 serisine ait numunelerinin SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.



Şekil 4.21 NS 3 serisinin SEM/EDX sonuçları

NS içeren numuneye ait SEM görüntüsü incelendiğinde, nanomalzeme varlığından ötürü daha yoğun geopolimer matris bir yapı oluştuğu görülmüş, amorf özelliği ve yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle de daha fazla polimerizasyon gerçekleştirmiştir [20]. Şekil 4.21’de numunelerinin EDX analizi sonuçları incelendiğinde O, Si, Al, C, Na, Fe, Ca, Mg ve K elementlerinin ağırlıkça dağılımı sırasıyla %55, %16,3, %8,3, %7,1, %6,9, %2,9, %1,8, %1,1 ve %0,6 olarak elde edilmiştir. NS 3 serisinde Si elementleri K serisine göre %8,7 artış göstermiştir. Bu durum NS 3 serisinde NS varlığının kanıtı olmuştur. Şekil 4.22’de NS 1 serisine ait numunelerinin SEM görüntüleri ve EDX analizleri verilmiştir.

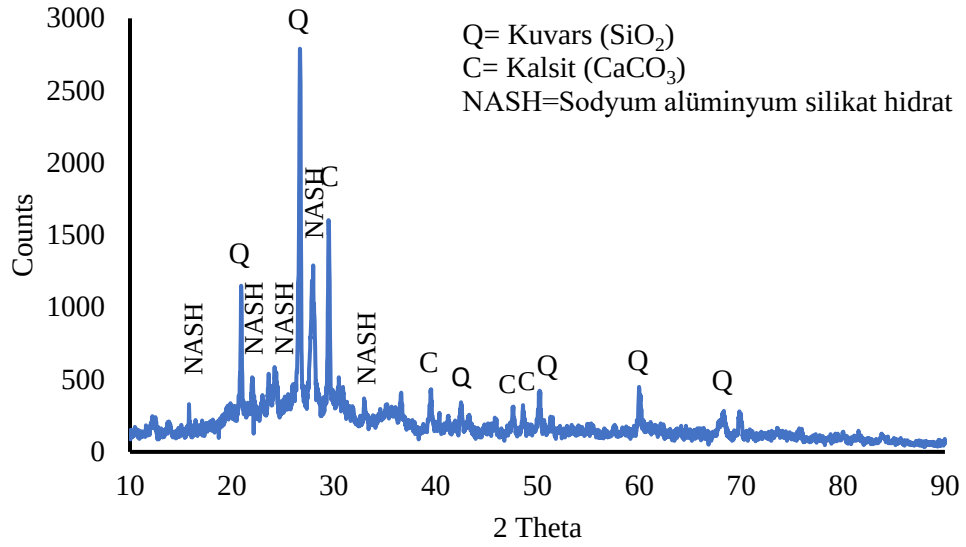




Şekil 4.22 NS 1 serisinin SEM/EDX sonuçları

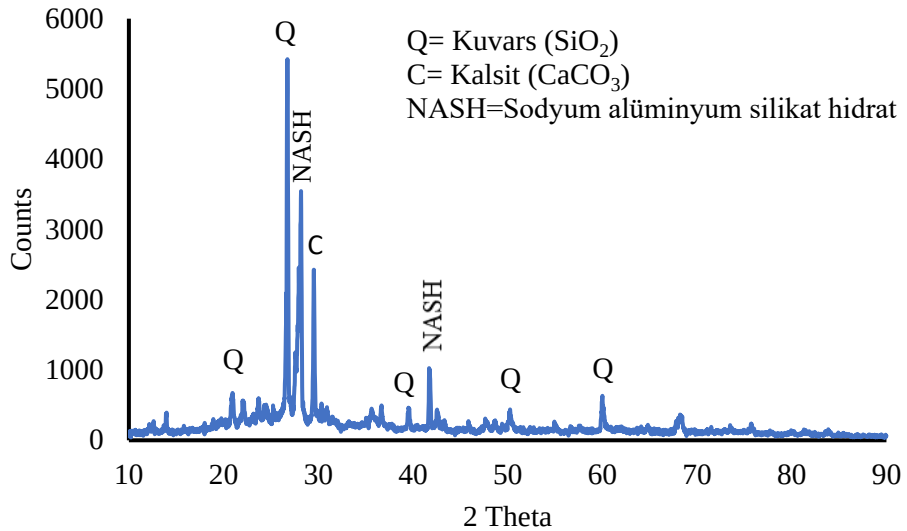
Şekil 4.22'deki NS içeren numuneye ait SEM görüntüsü incelendiğinde geopolimer matris oluşumu ve NS varlığı görülmektedir. Zhang ve arkadaşları [172] NS içeren çalışmalarında MK-UK tabanlı geopolimer harçların mikroyapısal analiz sonuçlarında, bu tez çalışmasına benzer SEM görüntüleri elde etmişlerdir. Şekil 4.22'de 3B geopolimer harç numunelerinin EDX analizi sonuçları incelendiğinde O, C, Si, Al, Fe, K, Ca, Na ve Mg elementlerinin ağırlıkça dağılımı sırasıyla %60,2, %15,4, %10,9, %4,2, %3,5, %2,2, %1,7, %1,5 ve %0,4 olarak bulunmuştur. NS 3 serisinde Si elementleri NS 1 serisine göre %49,5 artış göstermiştir. Bu durum NS 3 serisinde NS 1 serisine göre daha çok ve yoğun miktarda NS varlığının kanıtıdır.

Nanomalzeme içeren 3B geopolimer harçların SEM görüntüleri ve EDX analizleri genel olarak değerlendirildiğinde, nanomalzemelerin geopolimer harçta mikro düzeyde doluluk sağlaması ve daha yoğun bir geopolimer matris oluşmasına yardımcı olduğu görülmüştür. Şekil 4.18-4.22'teki EDX spektroskopilerinde metakaolinin kimyasal bileşimindeki yoğun Si ve Al elementleri görülmüştür. Bunun dışında geopolimer harç oluşumundaki alkali aktivatörler sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikattan dolayı Na elementi görülmüştür. M-CNT içeren numunelerin EDX spektroskopisinde C, NS içeren numunelerin EDX spektroskopisinde Si elementleri daha belirgin oranlarda görülmüştür. Şekil 4.18-4.22'deki EDX analiz sonuçları incelendiğinde O, Si, Al ve C elementlerinin pik yaptığı görülmüştür. Bu durum geopolimer matris oluşumunu doğrulamakta ve dayanımın yüksek olmasına atfedilmektedir. Şekil 4.23'te K serisine ait numunelerin XRD analizi sonuçları verilmiştir.

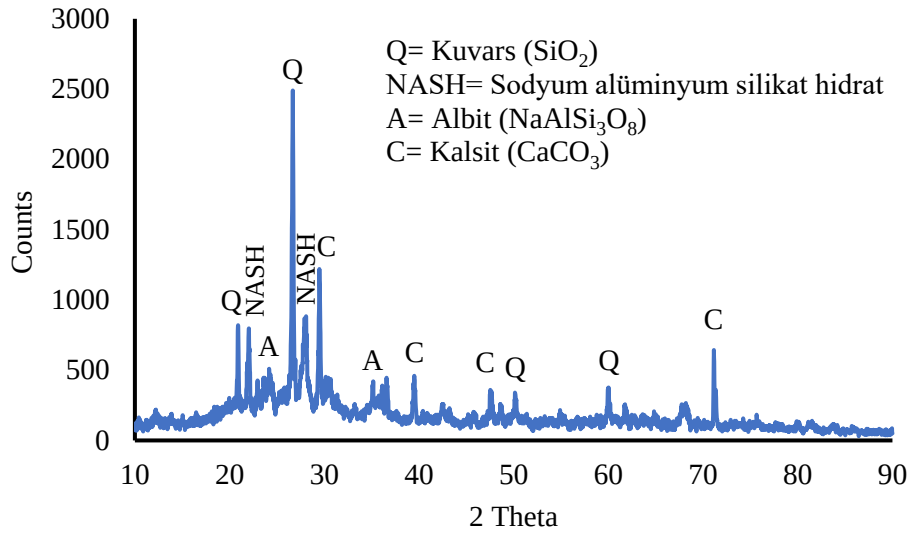


Şekil 4.23 K serisinin XRD sonuçları

XRD analizi sonuçlarında kuvars (Q), kalsit (C) ve NASH varlığına rastlanmıştır. XRD analizlerinde kuvars kristallerinin daha yüksek tepe noktası olduğu görülmüştür. Şekil 4.23'te tepe noktasının 26° - 30° arasında olması geopolimerizasyonun gerçekleştirildiğini göstermektedir [89]. Şekil 4.24'te M-CNT 1 ve Şekil 4.25'te M-CNT 3 serilerine ait numunelerin XRD analizi sonuçları verilmiştir.



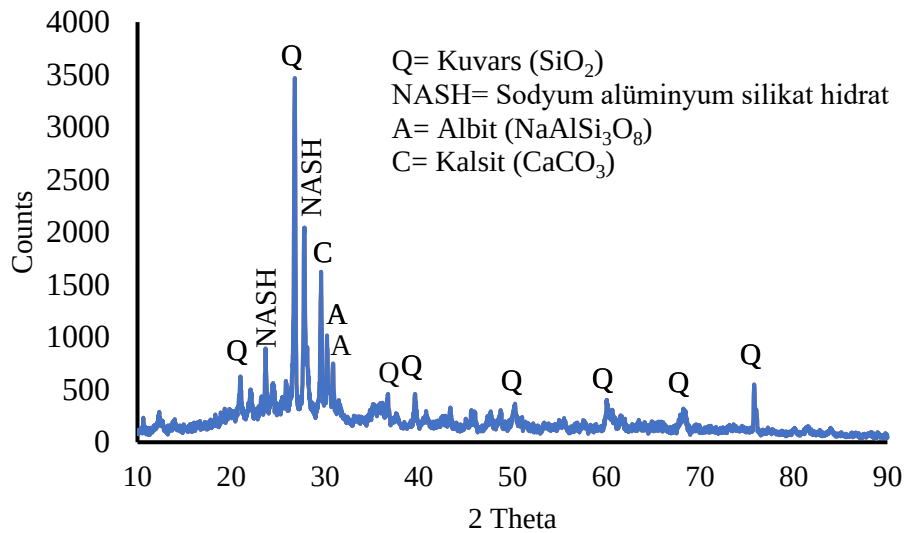
Şekil 4.24 M-CNT 1 serisinin XRD sonuçları



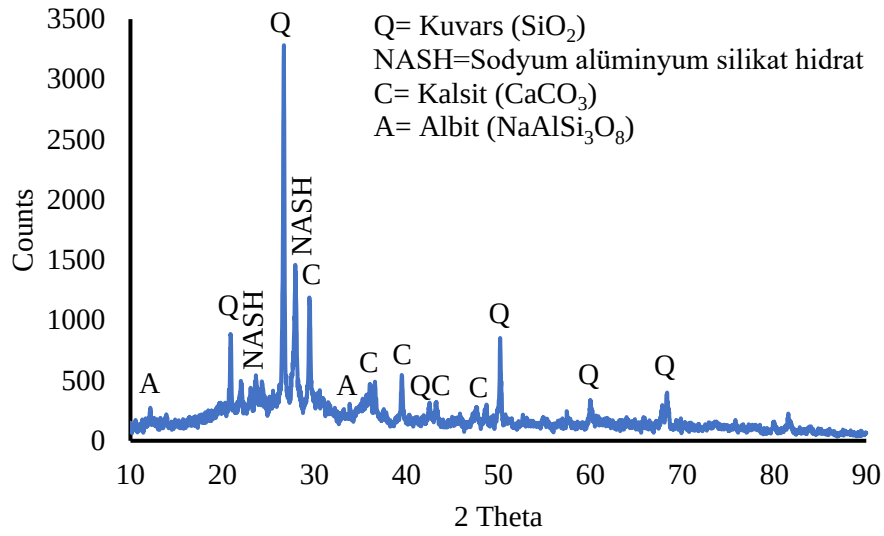
Şekil 4.25 M-CNT 3 serisinin XRD sonuçları

Şekil 4.24'teki XRD analizi incelendiğinde kuvars (Q), kalsit (C) ve sodyum alüminyum silikat hidrat (NASH) varlığına rastlanmıştır. XRD analizlerinde kuvars kristallerinin en yüksek tepe noktası olduğu görülmüştür. Nanomalzemelerin geopolimer kompozitlere ilave edilmesiyle mikro ve nano boşlukları doldurup, yoğunlaştırılmış bir matrisi oluşturan CASH ve NASH jelleri oluşarak mekanik dayanım ve mikroyapısal özellikleri iyileştirdiği literatürden bilinmektedir [173]. Şekil 4.25'te M-CNT 3 serisine ait numunelerin XRD analizi sonuçları incelendiğinde kuvars (Q), sodyum alüminyum silikat hidrat (NASH), albit (A) ve kalsit (C) varlığına rastlanmıştır. A piklerine geopolimer harçta rastlanılmış olması muhtemelen NASH, N-CASH ve CASH tipi yapıların oluştuğuna atfedilir [174]. Şekil 4.24 ve 4.25'te XRD analizlerinde Q kristalleri en yüksek tepe noktasıdır. Geopolimerlerin dayanım ve dayanıklılık özellikleri nanomalzeme kullanımı ile iyileştirilmektedir. Nanomalzeme içeren geopolimerlerin mikroyapısının daha kompakt ve üniform olduğu bilinmektedir [175]. M-CNT'lerin geopolimer matrisini iyileştirdiğini ifade etmek mümkündür. Ca^{+2} iyonları, M-CNT'lerin arayüzlerindeki karboksil gruplarına bağlanıp C-S-H jellerinin oluşmasına neden olarak geopolimerizasyonu sağlar [155, 176]. Bu durum gözenekli ve saydam Ca^{+2} iyonlarının, geopolimerin hidratasyonu sonucunda kristallerin daha yüksek tepe noktası yapmasını ve dayanım artışını sağlar [148]. C-(N)-A-S-H tipi jellerin oluşması her iki alkali aktivatör kullanımında CASH'a kimyasal olarak bağlı Ca^{+2} iyonlarının bir miktarının Na^{+1} iyonları ile yer değiştirmeleriyle oluşabilir. Ca içeriğine sahip numunelerde hem C-S-H, hem de NASH jelleri ana reaksiyon ürünleri

olarak bir arada bulunabilir [177]. Şekil 4.24'te 28,2°'de yüksek bir NASH tepe noktasının oluştuğu görülebilir. Bu M-CNT 1 serisinin basınç dayanımının hem K, hem de M-CNT 3 serilerine göre daha yüksek dayanıma sahip olmasına atfedilir [178]. K serisine ile aynı yoğunlukta tepe noktasının çıkmasına rağmen daha fazla Q ve C oluştuğu için, M-CNT 1 serisinde daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. M-CNT 3 serisinin XRD analizi sonucunda daha az NASH varlığına rastlanılmış olması ve yarı amorf faza sahip A piklerinin oluşması bunu doğrulamaktadır [86]. Xu ve arkadaşları [178] %0,1, %0,2 ve %0,5 M-CNT içeren metakaolin tabanlı geopolimerin XRD sonuçlarından, 28°, 2 teta'da yoğun NASH varlığından dolayı en yüksek tepe noktası %0,2 M-CNT içeren numunelerden elde etmişlerdir. Bu tez çalışmasında %0,25 M-CNT içeren M-CNT 1 serisinde elde edilen sonuçlar literatürle uyumlu olarak bulunmuştur [178]. Khater ve arkadaşları [179] %0,7 M-CNT içeren geopolimer kompozitin XRD analizi sonuçlarında, nanomalzeme içeriğinin artması ile kompozitte topaklanma meydana gelmesinden ve homojen dağılım sağlanamamasından ötürü kompozitin dayanımının azalmış olması sonucuna vardıkları çalışması, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçları doğrulamaktadır [179]. Şekil 4.26'da NS 1 ve Şekil 4.27'de NS 3 serilerine ait numunelerin XRD analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.26 NS 1 serisinin XRD sonuçları



Şekil 4.27 NS 3 serisinin XRD sonuçları

Şekil 4.26'daki XRD analizi sonuçlarında kuvars (Q), sodyum alüminyum silikat hidrat (NASH), albit (A) ve kalsit (C) varlığına rastlanmıştır. NS ilavesinden kaynaklanan SiO_2 varlığı, geopolimer matriste daha yoğun miktarda Q kristallerinin bulunmasına ve NS 3 serisinin basınç dayanımının NS 1 ve K serilerinden daha yüksek olmasına atfedilir [89, 160]. NS ilavesi ile geopolimerdeki amorf bileşenin kristalize edilmesi ve Q kristallerinin daha yüksek tepe noktası olması hem mekanik özellikleri hem de mikroyapıyı iyileştirmektedir [180]. Phoo-ngernkham ve arkadaşları [19] %1-2 NS içeren UK tabanlı geopolimerin XRD sonuçlarında $25-35^\circ$, 2 teta arasında camsı bir matristen ve kuvarsın kristal fazından nanomalzemedeki SiO_2 varlığından kaynaklı kuvars yoğunluğunda bir artış elde etmişlerdir. Bu tez çalışmasında ise ağırlıkça %0,75 NS nanomalzeme kullanımı ile NS varlığından kaynaklı Q kristallerinin $26,5^\circ$ 'de en yüksek tepe noktası olduğu görülmüştür. Bu durum geopolimerin mikroyapısında iyileşme sağlamıştır. Şekil 4.27'deki XRD analizi sonuçlarında kuvars (Q), sodyum alüminyum silikat hidrat (NASH), kalsit (C) ve albit (A) varlığına rastlanmıştır. NS 3 serisinde $26,5^\circ$, 2 teta'da kuvars kristallerinin daha yüksek tepe noktası olduğu görülmüştür. Bu durum geopolimer matriste NS varlığını doğrulamaktadır [181]. NS 3 serisinde daha geniş ve daha yoğun tepe noktaları kuvarsın NS içermeyen K serisinde baskın yapısal faz olduğunu açıkça gösterirken, NS 3 serisinde daha geniş ve yoğunlaştırılmış tepe noktaları tarafından gösterilen amorf fazı daha da iyileştirmiştir. K serisine göre daha yoğun Q tepe noktalarının

NS 3 serisinde oluşması ile NS 3 serisinde daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu doktora tez çalışmasında çok duvarlı karbon nanotüp (M-CNT) ve nano silisyum dioksit (NS) içeren uçucu kül-metakaolin tabanlı 3B yazıcı kullanılarak üretilen geopolimer harçların reolojik, mekanik dayanım ve donma-çözülme durabilite özellikleri incelenmiştir. Nanomalzeme içermeyen geopolimer harç numuneleri kontrol numuneleri olarak belirlenmiş ve ağırlıkça %0,25, %0,5 ve %0,75 oranlarda M-CNT ve NS içeren geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Bu iki farklı nanomalzeme içeren 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harçların reolojik, mekanik dayanım ve donma-çözülme durabilite özelliklerinin incelendiği bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1- Nanomalzeme ilavesi ile geopolimer harç numunelerinin viskozite değerlerinde azalma, inşa edilebilirlik deney sonuçlarında artış elde edilmiştir. Nanomalzeme içermeyen K serisinde en yüksek viskozite ve en düşük inşa edilebilirlik deney sonuçları elde edilmiştir. Yayılma tablası deney sonuçları ve akışkanlık indeksi değerleri K serisinde en yüksek elde edilmiştir. Nanomalzeme içeren tüm serilerde nanomalzeme oranı arttıkça, yayılma tablası ve akışkanlık indeksi değerlerinde azalma göstermiştir. En düşük akışkanlık indeksi ve yayılma tablası deney sonuçları NS 3 serisinden elde edilmiştir.

2- Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde; 7, 28 ve 90 günlük dayanım sonuçlarında nanomalzeme içeren tüm numunelerde ve kontrol numunelerinde eğilme dayanımları artış göstermiştir. 28 günlük kürlenmiş numunelerden en yüksek eğilme dayanımı M-CNT 1 serisinde 4,92 MPa olarak elde edilmiş olup, kontrol numunelerine göre dayanımda yaklaşık %24,87 artış elde edilmiştir. NS içeren serilerde ise en yüksek eğilme dayanımı NS 3 serisinde 4,46 MPa olarak elde edilmiştir.

3- Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, nanomalzeme içeren tüm 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç numunelerinde nanomalzeme içermeyen 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç kontrol numunelerine göre 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları artış göstermiştir. 28 gün kür edilen numunelerden en yüksek basınç dayanımı NS 3 serisinde 30,61 MPa olarak elde edilmiş olup, 3B yazıcı ile üretilen geopolimer harç kontrol numunelerine göre dayanımda yaklaşık %68 artış elde

edilmiştir. M-CNT içeren serilerde ise en yüksek basınç dayanımı M-CNT 1 serisinde 27,52 MPa olarak elde edilmiştir. 3B yazıcı ile üretilen ve nanomalzeme içermeyen geopolimer harç kontrol numunelerine göre M-CNT 1 serisinde ise yaklaşık %51 oranında basınç dayanımlarında artış elde edilmiştir.

4- UPV deney sonuçları, basınç dayanımı sonuçlarıyla tutarlılık göstermiştir. Farklı nanomalzemeler kullanılan her seride de en yüksek UPV sonuçları sırasıyla NS 3 ve M-CNT 1 serilerinden elde edilmiştir.

5- Donma-çözölmeye maruz kalan numunelerde donma-çözölmeye sonrası mekanik dayanım sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı test sonuçları NS serisinde 29,77 MPa olarak elde edilmiştir. Donma-çözölmeye maruz kalan NS 3 serisi, donma-çözölmeye durabilitesi sonrası basınç dayanımını yaklaşık olarak %97,26 korumuştur. M-CNT içeren serilerde ise donma-çözölmeye sonrası en yüksek basınç dayanımı test sonuçları M-CNT 1 serisinde 26,38 MPa olarak elde edilmiştir. Donma-çözölmeye maruz kalan M-CNT 1 serisi, donma-çözölmeye durabilitesi sonrası basınç dayanımını yaklaşık olarak %95,86 korumuştur.

3B yazıcı ile üretilen geopolimer uygulamaları için teknik, çevresel ve ekonomik ekstrüzyon harcı tasarımıında umut verici alternatifler olduğu görölmüştür. Geopolimer harç üretiminde farklı nanomalzemelerin daha düşük hacimsel oranlarda kullanılması ile geopolimer harçların donma-çözölmeye durabilitesinde ve mekanik dayanımlarında iyi bir performans sergilediğı bu tez çalışmasında elde edilmiştir.

3B yazıcı ile üretim yönteminin, geleneksel döküm yönteminden farklı olarak inşaatta kalıp kullanımına gerek kalmadan hızlı imalat ve işçilik açısından avantajlar sağlama potansiyeli fark edildiğinden inşaat ve özellikle yapı sektöründe kullanımı hızla artış göstermektedir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda 3B geopolimer harçların diğere durabilite özelliklerinin (sülfat etkisi, yüksek sıcaklık, asit etkisi vb.) incelenmesi ve diğere nanomalzemelerin kullanılması önerilmektedir. Bu özelliklerin incelenip ortaya konulmasıyla 3B geopolimer harçların inşaat sektöründe daha fazla kullanılabilmesinin önünün açılabilieceğı düşünölmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Y. H. M. Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, and M. El-Zeadani, "Clean production and properties of geopolymer concrete; A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 251, p. 119679, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119679.
- [2] A. B. Moradikhou, A. Esparham, and M. Jamshidi Avanaki, "Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 251, p. 118965, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118965.
- [3] K. A. Komnitsas, "Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities," *Procedia Eng.*, vol. 21, pp. 1023–1032, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2108.
- [4] M. A. Villaquirán-Caicedo and R. M. de Gutiérrez, "Synthesis of ceramic materials from ecofriendly geopolymer precursors," *Mater. Lett.*, vol. 230, pp. 300–304, 2018, doi: 10.1016/j.matlet.2018.07.128.
- [5] Y. Wang, F. Aslani, and A. Valizadeh, "An investigation into the mechanical behaviour of fibre-reinforced geopolymer concrete incorporating NiTi shape memory alloy, steel and polypropylene fibres," *Constr. Build. Mater.*, vol. 259, p. 119765, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119765.
- [6] A. C. Ganesh and M. Muthukannan, "Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength," *J. Clean. Prod.*, vol. 282, p. 124543, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124543.
- [7] E. Mohseni, "Assessment of Na₂SiO₃ to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 904–911, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.032.
- [8] J. Davidovits, D. C. Comrie, J. H. Paterson and D. J. Ritcey, "Geopolymeric concretes for environmental protection," *Concrete International*, vol. 12, no. 7, pp. 30-40, 2019.
- [9] S. M. A. El-Gamal and F. A. Selim, "Utilization of some industrial wastes for eco-friendly cement production," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 12, pp. 9–17, 2017, doi: 10.1016/j.susmat.2017.03.001.
- [10] K. M. Liew, A. O. Sojobi, and L. W. Zhang, "Green concrete : Prospects and challenges," *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, pp. 1063–1095, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008.
- [11] B. Suhendro, "Toward green concrete for better sustainable environment," *Procedia Eng.*, vol. 95, no. Scescm, pp. 305–320, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.190.
- [12] B. Khoshnevis, "Automated construction by contour crafting - Related robotics

- and information technologies,” *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, 2004, doi: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.
- [13] S. Geetha, M. Selvakumar, and S. M. Lakshmi, “3D concrete printing matrix reinforced with Geogrid,” *Mater. Today Proc.*, vol. 49, pp. 1443–1447, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.07.212.
- [14] R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger, “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 112, no. May, pp. 37–49, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
- [15] T. Uygunoğlu, S. Özgüven, and İ. B. Topçu, “3D Teknolojisi ile Yapı Malzemesi Üretimindeki Gelişmeler,” *Int. J. 3D Print. Technol. Digit. Ind.*, vol. 3, no. 3, pp. 279–288, 2019, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ij3dptdi/issue/51591/559782>
- [16] F. Sanchez and K. Sobolev, “Nanotechnology in concrete - A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 11, pp. 2060–2071, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014.
- [17] A. W. Qarluq, R. Polat, and F. Fatma Karagöl, “Halloysit Nano-Kil, Nano-SiO₂ ve Nano-CaO’ın Tekli ve İkili Kullanımının Çimento Esaslı Harçların Özelliklerine Etkileri,” *Eur. J. Sci. Technol.*, no. 20, pp. 815–826, 2020, doi: 10.31590/ejosat.792365.
- [18] M. S. M. Norhasri, M. S. Hamidah, and A. M. Fadzil, “Applications of using nano material in concrete: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pp. 91–97, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005.
- [19] T. Phoongernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Hanjitsuwan, and S. Hatanaka, “The effect of adding nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature,” *Mater. Des.*, vol. 55, pp. 58–65, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.09.049.
- [20] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, “Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 675–683, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.044.
- [21] K. Gao, K.-L. Lin, D. Wang, H.-S. Shiu, C.-L. Hwang, and T.-W. Cheng, “Effects of Nano-SiO₂ on Setting Time and Compressive Strength of Alkaliactivated Metakaolin-based Geopolymer,” *Open Civ. Eng. J.*, vol. 7, no. 1, pp. 84–92, 2013, doi: 10.2174/1874149501307010084.
- [22] M. Tuyan, “Doğal ve atık malzemelerle geopolimer harç ve beton geliştirilmesi,” 2017.
- [23] M. Sumesh, U. J. Alengaram, M. Z. Jumaat, K. H. Mo, and M. F. Alnahhal, “Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar – A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 148, pp. 62–84, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.206.

- [24] K. Sun, X. Peng, S. Wang, L. Zeng, P. Ran, and G. Ji, "Effect of nano-SiO₂ on the efflorescence of an alkali-activated metakaolin mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 253, p. 118952, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118952.
- [25] N. Yaltay, "NanoSilika'nın Beton Basınç Dayanımı Etkisinin İncelenmesi," *NWSA Acad. Journals*, vol. 12, no. 4, pp. 216–223, 2017, doi: 10.12739/nwsa.2017.12.4.1a0388.
- [26] N. B. Singh, S. K. Saxena, and M. Kumar, "Effect of nanomaterials on the properties of geopolymer mortars and concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 3, pp. 9035–9040, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.10.018.
- [27] H. U. Ahmed, A. A. Mohammed, and A. S. Mohammed, "The role of nanomaterials in geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review," *J. Build. Eng.*, vol. 49, no. November 2021, p. 104062, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.104062.
- [28] S. Ridha, M. Akmaludin and S. S. Salehudin, "Microstructure investigations on nano-geopolymer cement cured under HPHT conditions," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no.1, pp. 144-149, 2016.
- [29] K. Gao *et al.*, "Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 503–510, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.003.
- [30] Z. Wu, K. H. Khayat, C. Shi, B. F. Tutikian, and Q. Chen, "Mechanisms underlying the strength enhancement of UHPC modified with nano-SiO₂ and nano-CaCO₃," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 119, no. February, p. 103992, 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103992.
- [31] F. U. A. Shaikh, S. W. M. Supit, and P. K. Sarker, "A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes," *Mater. Des.*, vol. 60, pp. 433–442, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.04.025.
- [32] J. Davidovits and D. Comrie, "Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals," *1st Eur. Conf. Soft Miner. Compiegne, Fr.*, vol. 1, no. November 2018, pp. 125–134, 1988, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Long+term+durability+of+hazardous+toxic+and+nuclear+waste+disposals#0>
- [33] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, 2000, doi: 10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- [34] A. C. Arı, "3 Boyutlu Yazıcı Teknolojisiyle Üretilen Yapı Malzemeleri ve İnşaat Sektöründe Kullanımlarının İncelenmesi," *Soc. Sci. Stud. J.*, vol. 114, no. 114, pp. 7829–7840, 2023, doi: 10.29228/sssj.71003.
- [35] J. D. 2008, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 5th edition, no. January 2008. 2008. [Online]. Available:

<https://www.researchgate.net/publication/265076752>

- [36] Z. Li, Y. Zhang, and X. Zhou, "Short Fiber Reinforced Geopolymer Composites Manufactured by Extrusion," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 624–631, 2005, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2005)17:6(624).
- [37] B. C. Lippiatt and S. Ahmad, *Measuring the Life-Cycle Environmental and Economic Performance of Concrete: the Bees Approach*. 2004.
- [38] J. Davidovits, "Properties of Geopolymer Cements," *First Int. Conf. Alkaline Cem. Concr.*, pp. 131–149, 1994.
- [39] Y. M. Liew, C. Y. Heah, A. B. Mohd Mustafa, and H. Kamarudin, "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 83, pp. 595–629, 2016, doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002.
- [40] G. Fahim Huseien, J. Mirza, M. Ismail, S. K. Ghoshal, and A. Abdulameer Hussein, "Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. February 2016, pp. 54–74, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.076.
- [41] Y. M. Liew, C. Y. Heah, A. B. Mohd Mustafa, and H. Kamarudin, "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 83, pp. 595–629, 2016, doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.08.002.
- [42] H. Elsayed, F. Gobbin, M. Picicco, A. Italiano, and P. Colombo, "Additive manufacturing of inorganic components using a geopolymer and binder jetting," *Addit. Manuf.*, vol. 56, no. December 2021, p. 102909, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102909.
- [43] H. G. Şahin and A. Mardani-Aghabaglou, "Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 316, no. October 2021, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125865.
- [44] H. Alghamdi, S. A. O. Nair, and N. Neithalath, "Insights into material design, extrusion rheology, and properties of 3D-printable alkali-activated fly ash-based binders," *Mater. Des.*, vol. 167, p. 107634, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107634.
- [45] S. H. Lee, H. J. Kim, E. Sakai, and M. Daimon, "Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 763–768, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)01054-2.
- [46] A. I. Laskar and S. Talukdar, "Rheological behavior of high performance concrete with mineral admixtures and their blending," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 12, pp. 2345–2354, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.004.
- [47] G. Lazorenko and A. Kasprzhitskii, "Geopolymer additive manufacturing: A review," *Addit. Manuf.*, vol. 55, no. October 2021, p. 102782, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102782.

10.1016/j.addma.2022.102782.

- [48] C. Mankoc *et al.*, “The flow rate of granular materials through an orifice (Granular Matter (2007) 9 (407-414) DOI:10.1007/s10035-007-0062-2),” *Granul. Matter*, vol. 10, no. 6, p. 469, 2008, doi: 10.1007/s10035-008-0114-2.
- [49] T. Uygunoğlu and S. Barlas Özgüven, “İNŞAMühendisliği 3Teknolojisinde Kullanılan Harçların Reoloji Özelliklerinin Araştırılması,” *Int. J. 3D Print. Technol. Digit. Ind.*, vol. 3, no. 2, pp. 189–197, 2019, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ij3dptdi/issue/48431/577946>
- [50] S. K. Kaliyavaradhan, P. S. Ambily, P. R. Prem, and S. B. Ghodke, “Test methods for 3D printable concrete,” *Autom. Constr.*, vol. 142, no. August, p. 104529, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104529.
- [51] B. Nematollahi, M. Xia, S. H. Bong, and J. Sanjayan, *Hardened properties of 3D printable ‘One-Part’ Geopolymer for construction applications*, vol. 19. Springer International Publishing, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-99519-9_17.
- [52] M. Chen, L. Li, Y. Zheng, P. Zhao, L. Lu, and X. Cheng, “Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 189, pp. 601–611, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.037.
- [53] D. Dey, D. Srinivas, B. Panda, P. Suraneni, and T. G. Sitharam, “Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 340, no. January, p. 130749, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130749.
- [54] A. V. Rahul, M. Santhanam, H. Meena, and Z. Ghani, “3D printable concrete: Mixture design and test methods,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 97, no. March 2018, pp. 13–23, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014.
- [55] H. Ilcan, O. Sahin, A. Kul, G. Yildirim, and M. Sahmaran, “Rheological properties and compressive strength of construction and demolition waste-based geopolymer mortars for 3D-Printing,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 328, no. March, p. 127114, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127114.
- [56] B. Panda, S. Chandra Paul, and M. Jen Tan, “Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material,” *Mater. Lett.*, vol. 209, pp. 146–149, 2017, doi: 10.1016/j.matlet.2017.07.123.
- [57] S. Muthukrishnan, S. Ramakrishnan, and J. Sanjayan, “In-line activation of geopolymer slurry for concrete 3D printing,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 162, no. January, p. 107008, 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.107008.
- [58] M. Xia, B. Nematollahi, and J. Sanjayan, “Printability, accuracy and strength of geopolymer made using powder-based 3D printing for construction applications,” *Autom. Constr.*, vol. 101, no. January, pp. 179–189, 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.013.

- [59] 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.
- [60] S. H. Bong, B. Nematollahi, M. Xia, S. H. Ghaffar, J. Pan, and J. G. Dai, "Properties of additively manufactured geopolymer incorporating mineral wollastonite microfibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 331, no. April, p. 127282, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127282.
- [61] K. Korniejenko *et al.*, "Mechanical properties of short fiber-reinforced geopolymers made by casted and 3D printing methods: A comparative study," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 3, 2020, doi: 10.3390/ma13030579.
- [62] M. Xia and J. G. Sanjayan, "Methods of enhancing strength of geopolymer produced from powder-based 3D printing process," *Mater. Lett.*, vol. 227, pp. 281–283, 2018, doi: 10.1016/j.matlet.2018.05.100.
- [63] N. Fatin Nasuha Noorhadi and S. Radziah Abdullah, "A Study of Geopolymer Fresh Properties & Mechanical Properties in 3D Concrete Printing: A Review," *Recent Trends Civ. Eng. Built Environ.*, vol. 3, no. 1, pp. 241–249, 2022, [Online]. Available: <http://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/rtcebe>
- [64] A. Thesis, "Implementation Of Microwave Curing System To Adapt Metakaolin Based Geopolymer Binders For 3d-Printing Implementation Of Microwave Curing System To Adapt Metakaolin Based Geopolymer Binders For 3d-Printing," no. August, 2022.
- [65] A. Fernandez-Jimenez, I. García-Lodeiro, and A. Palomo, "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 3055–3065, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0584-8.
- [66] R. H. Haddad and O. Alshbuol, "Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study," *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 699–707, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.011.
- [67] T. Bakharev, "Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1224–1232, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.031.
- [68] M. Lacroix *et al.*, "Silicon carbide foam composite containing cobalt as a highly selective and re-usable Fischer-Tropsch synthesis catalyst," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 397, no. 1–2, pp. 62–72, 2011, doi: 10.1016/j.apcata.2011.02.012.
- [69] S. Piggin, *The properties of concrete*, vol. 65, no. 4. 2006. doi: 10.11129/detail.9783034614740.19.
- [70] H. S. Shang, Y. P. Song, and L. K. Qin, "Experimental study on strength and deformation of plain concrete under triaxial compression after freeze-thaw cycles", *Building and Environment*, no. 43, pp. 1197-1204, 2008. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.08.027

- [71] M. Pigeon, J. Marchand, and R. Pleau, "Frost resistant concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 10, no. 5 SPEC. ISS., pp. 339–348, 1996, doi: 10.1016/0950-0618(95)00067-4.
- [72] A. M. Mustafa Al Bakria, H. Kamarudin, M. Bin Hussain, I. Khairul Nizar, Y. Zarina, and A. R. Rafiza, "The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers," *Phys. Procedia*, vol. 22, pp. 286–291, 2011, doi: 10.1016/j.phpro.2011.11.045.
- [73] D. Tan, "Katkılı Betonların Donma-Çözölmeye Karşı Performanslarının İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, 2010.
- [74] F. Sahin, M. Uysal, O. Canpolat, T. Cosgun, and H. Dehghanpour, "The effect of polyvinyl fibers on metakaolin-based geopolymer mortars with different aggregate filling," *Constr. Build. Mater.*, vol. 300, no. March, p. 124257, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124257.
- [75] G. Bumanis, D. Bajare, A. Korjamins, and D. Vaičiukynienė, "Sulfate and Freeze-Thaw Resistance of Porous Geopolymer Based on Waste Clay and Aluminum Salt Slag," *Minerals*, vol. 12, no. 9. 2022. doi: 10.3390/min12091140.
- [76] M. Shamsa, B. Al-Shathr, and T. al-Attar, "Performance of Geopolymer Concrete Exposed to Freezing and Thawing Cycles," *Eng. Technol. J.*, vol. 37, no. 3A, pp. 78–84, 2019, doi: 10.30684/etj.37.3a.1.
- [77] A. F. H. Sherwani, K. H. Younis, and R. W. Arndt, "Fresh, Mechanical, and Durability Behavior of Fly Ash-Based Self Compacted Geopolymer Concrete: Effect of Slag Content and Various Curing Conditions," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 15, 2022, doi: 10.3390/polym14153209.
- [78] G. Liang, H. Zhu, H. Li, T. Liu, and H. Guo, "Comparative study on the effects of rice husk ash and silica fume on the freezing resistance of metakaolin-based geopolymer," *Constr. Build. Mater.*, vol. 293, p. 123486, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123486.
- [79] B. Feng and J. Liu, "Durability of Repair Metakaolin Geopolymeric Cement under Different Factors," *Processes*, vol. 10, no. 9, 2022, doi: 10.3390/pr10091818.
- [80] F. Uddin, "Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 39, no. 12, pp. 2804–2814, 2008, doi: 10.1007/s11661-008-9603-5.
- [81] T. Sun *et al.*, "Pharmaceutical Nanotechnology," pp. 179–283, 2023, doi: 10.1007/978-981-16-8984-0_10.
- [82] A. M. Mustafa Al Bakri, H. Kamarudin, M. Bnhussain, K. Nizar, A. R. Rafiza, and Y. Zarina, "The processing, characterization, and properties of fly ash based geopolymer concrete," *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 90–97, 2012.

- [83] L. Senff, J. A. Labrincha, V. M. Ferreira, D. Hotza, and W. L. Repette, "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 2487–2491, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005.
- [84] M. Oltulu and R. Şahin, "Effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study," *Energy Build.*, vol. 58, pp. 292–301, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.014.
- [85] D. Lin and B. Xing, "Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 15, pp. 5580–5585, 2008, doi: 10.1021/es800422x.
- [86] M. A. A. Alvi, M. Khalifeh, and M. B. Agonafir, "Effect of nanoparticles on properties of geopolymers designed for well cementing applications," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 191, p. 107128, 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107128.
- [87] K. Behfarnia and M. Rostami, "Effects of micro and nanoparticles of SiO₂ on the permeability of alkali activated slag concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 205–213, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.070.
- [88] B. B. Jindal, "Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116644, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.025.
- [89] D. Adak, M. Sarkar, and S. Mandal, "Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 453–459, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.093.
- [90] U. Durak, O. Karahan, B. Uzal, S. İlkentapar, and C. D. Atiş, "Influence of nano SiO₂ and nano CaCO₃ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based geopolymer," *Struct. Concr.*, vol. 22, no. S1, pp. E352–E367, 2021, doi: 10.1002/suco.201900479.
- [91] Z. Zidi, M. Ltifi, and I. Zafar, "Synthesis and attributes of nano-SiO₂ local metakaolin based-geopolymer," *J. Build. Eng.*, vol. 33, no. March 2020, p. 101586, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101586.
- [92] S. N. Zailan, A. Bouaissi, N. Mahmed, and M. M. A. B. Abdullah, "Influence of ZnO Nanoparticles on Mechanical Properties and Photocatalytic Activity of Self-cleaning ZnO-Based Geopolymer Paste," *J. Inorg. Organomet. Polym. Mater.*, vol. 30, no. 6, pp. 2007–2016, 2020, doi: 10.1007/s10904-019-01399-3.
- [93] H. Assaedi, F. U. A. Shaikh, and I. M. Low, "Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolymer," *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 4, no. 1, pp. 19–28, 2016, doi: 10.1016/j.jascers.2015.10.004.
- [94] M. Maiti, M. Sarkar, S. Maiti, M. A. Malik, and S. Xu, "Modification of geopolymer with size controlled TiO₂ nanoparticle for enhanced durability and

- catalytic dye degradation under UV light,” *J. Clean. Prod.*, vol. 255, p. 120183, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120183.
- [95] A. M. Rashad, “Effect of nanoparticles on the properties of geopolymer materials,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 71, no. 24, pp. 1283–1301, 2019, doi: 10.1680/jmacr.18.00289.
- [96] R. M. de Gutiérrez, M. Villaquirán-Caicedo, S. Ramírez-Benavides, M. Astudillo, and D. Mejía, “Evaluation of the antibacterial activity of a geopolymer mortar based on metakaolin supplemented with TiO₂ and CuO particles using glass waste as fine aggregate,” *Coatings*, vol. 10, no. 2, pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/coatings10020157.
- [97] E. A. Llano-Guerrero, L. Y. Gómez-Zamorano, and E. Jiménez-Relinque, “Effect of the addition of TiO₂ nanoparticles in alkali-activated materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 245, p. 118370, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118370.
- [98] A. N. Qadry, N. A. Kharisma, and Subaer, “The properties of geopolymer-cuo nanoparticles as a functional composite,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 967 MSF, pp. 281–285, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.967.281.
- [99] T. Alomayri, “Experimental study of the microstructural and mechanical properties of geopolymer paste with nano material (Al₂O₃),” *J. Build. Eng.*, vol. 25, no. August 2018, p. 100788, 2019, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100788.
- [100] Z. Zidi, M. Ltifi, and I. Zafar, “Comparative study: nanosilica, nanoalumina, and nanozinc oxide addition on the properties of localized geopolymer,” *J. Aust. Ceram. Soc.*, vol. 57, no. 3, pp. 783–792, 2021, doi: 10.1007/s41779-021-00576-3.
- [101] H. Assaedi *et al.*, “Characterization and properties of geopolymer nanocomposites with different contents of nano-CaCO₃,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, p. 119137, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119137.
- [102] N. H. A. S. Lim, H. Mohammadhosseini, M. M. Tahir, M. Samadi, and A. R. M. Sam, “Microstructure and Strength Properties of Mortar Containing Waste Ceramic Nanoparticles,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 10, pp. 5305–5313, 2018, doi: 10.1007/s13369-018-3154-x.
- [103] M. Kaur, J. Singh, and M. Kaur, “Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 190, pp. 672–679, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.157.
- [104] B. Khoshnevis, “Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies,” *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, Jan. 2004, doi: 10.1016/J.AUTCON.2003.08.012.
- [105] R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger, “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 112, no. June, pp. 37–49, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.

- [106] M. Taylor, S. Wamuziri, and I. Smith, “Automated construction in Japan,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Civ. Eng.*, vol. 156, no. 1, pp. 34–41, 2003, doi: 10.1680/CIEN.2003.156.1.34.
- [107] D. A. Gök, “Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma A research on the comparison of additive manufacturing technologies,” vol. 13, pp. 517–537, 2023.
- [108] P. Shakor, S. Nejadi, G. Paul, and S. Malek, “Review of emerging additive manufacturing technologies in 3d printing of cementitious materials in the construction industry,” *Front. Built Environ.*, vol. 4, no. January, 2019, doi: 10.3389/fbuil.2018.00085.
- [109] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, and T. Salet, “Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 11, no. 3, pp. 209–225, 2016, doi: 10.1080/17452759.2016.1209867.
- [110] T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe, “Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 45, no. 8, pp. 1221–1232, 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9828-z.
- [111] J. H. Lim, B. Panda, and Q. C. Pham, “Improving flexural characteristics of 3D printed geopolymers composites with in-process steel cable reinforcement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 178, pp. 32–41, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.010.
- [112] V. Voney, P. Odaglia, C. Brumaud, B. Dillenburger, and G. Habert, “From casting to 3D printing geopolymers: A proof of concept,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 143, p. 106374, 2021, doi: 10.1016/j.cemconres.2021.106374.
- [113] V. N. Nerella and V. Mechtcherine, *Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D)*. Elsevier Inc., 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6.
- [114] D. De Koker, “Manufacturing processes for engineered cement-based composite material products,” *M.Sc. thesis, Stellenbosch Univ. South Africa*, no. December, 2004.
- [115] R. Wolfs, “3D Printing of concrete structures,” *Diss. Eindhoven Univ. Technol.*, vol. 2015, no. 2, pp. 1–70, 2015.
- [116] D. Marchon, S. Kawashima, H. Bessaies-Bey, S. Mantellato, and S. Ng, “Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 112, no. December 2017, pp. 96–110, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.014.
- [117] S. Qaidi, A. Yahia, B. A. Tayeh, H. Unis, R. Faraj, and A. Mohammed, “3D printed geopolymers composites: A review,” *Mater. Today Sustain.*, vol. 20, p. 100240, 2022, doi: 10.1016/j.mtsust.2022.100240.

- [118] V. Mechtcherine *et al.*, “Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 132, no. March, p. 106037, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106037.
- [119] R. A. Buswell *et al.*, “A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 134, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106068.
- [120] V. Saruhan, M. Keskinateş, and B. Felekoğlu, “A comprehensive review on fresh state rheological properties of extrusion mortars designed for 3D printing applications,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 337, no. February, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127629.
- [121] W. Wang, A. Shen, Z. Lyu, Z. He, and K. T. Q. Nguyen, “Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete——A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 296, p. 123734, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123734.
- [122] W. Lao, M. Li, and T. Tjahjowidodo, “Variable-geometry nozzle for surface quality enhancement in 3D concrete printing,” *Addit. Manuf.*, vol. 37, no. July 2020, p. 101638, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101638.
- [123] C. Mankoc *et al.*, “The flow rate of granular materials through an orifice,” *Granul. Matter*, vol. 9, no. 6, pp. 407–414, 2007, doi: 10.1007/s10035-007-0062-2.
- [124] B. Panda and M. J. Tan, “Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing,” *Ceram. Int.*, vol. 44, no. 9, pp. 10258–10265, 2018, doi: 10.1016/j.ceramint.2018.03.031.
- [125] 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,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 311–319, 2018, doi: 10.1016/j.acme.2017.02.008.
- [126] V. Saruhan, M. Keskinateş, and B. Felekoğlu, “A comprehensive review on fresh state rheological properties of extrusion mortars designed for 3D printing applications,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 337, no. April, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127629.
- [127] Y. Chen, C. Liu, R. Cao, C. Chen, V. Mechtcherine, and Y. Zhang, “Systematical investigation of rheological performance regarding 3D printing process for alkali-activated materials: Effect of precursor nature,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 128, no. October 2021, p. 104450, 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104450.
- [128] M. S. Aziz and S. R. Abdullah, “A Review of Fresh Properties of 3D Printing Construction Material,” vol. 3, no. 1, pp. 573–581, 2022.
- [129] ASTM C 1437-99, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, vol. 04.01, 1999.

- [130] M. Karatas, K. Turk, M. Acikgenc, and Z. C. Ulucan, “Effect of Elazig Region Waste Brick Powder on Strength and Viscosity Properties of Self Compacting Mortar,” *Program*, no. September, pp. 27–30, 2010.
- [131] D. W. Zhang, D. min Wang, X. Q. Lin, and T. Zhang, “The study of the structure rebuilding and yield stress of 3D printing geopolymer pastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 575–580, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.233.
- [132] M. A. Khan, “Mix suitable for concrete 3D printing: A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 32, pp. 831–837, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.825.
- [133] Z. Malaeb, F. AlSakka, and F. Hamzeh, *3D Concrete Printing: Machine Design, Mix Proportioning, and Mix Comparison Between Different Machine Setups*. Elsevier Inc., 2019. doi: 10.1016/B978-0-12-815481-6.00006-3.
- [134] H. Zhong and M. Zhang, “3D printing geopolymers: A review,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 128, no. November 2021, p. 104455, 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104455.
- [135] ASTM C618. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. American society for testing and materials. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International; 2003.
- [136] K. Karakuzu, “Su Azaltıcı Katkı Anyonik Monomer Değişiminin Farklı C3A İçeriğindeki Çİmentolu Sistemlerin Davranışına Etkisi”, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa Uludağ Üniversitesi, 2023.
- [137] ASTM C348. Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. ASTM C348-02, Annu book ASTM Stand 04.01.
- [138] X. F. Gao, Y. T. Lo, and C. M. Tam, “Investigation of micro-cracks and microstructure of high performance lightweight aggregate concrete,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 5, pp. 485–489, 2002, doi: 10.1016/S0360-1323(01)00051-8.
- [139] ASTM C349. Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). ASTM C349-08, Annu book ASTM Stand 04.01.
- [140] Z. Su, W. Hou, and Z. Sun, “Recent advances in carbon nanotube-geopolymer composite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, p. 118940, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118940.
- [141] P. Zhang, K. Wang, J. Wang, J. Guo, and Y. Ling, “Macroscopic and microscopic analyses on mechanical performance of metakaolin/fly ash based geopolymer mortar,” *J. Clean. Prod.*, vol. 294, p. 126193, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126193.
- [142] G. Gülşen, “Nano Malzeme İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Dayanıklılığının Araştırılması.” Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2020.

- [143] TSE CEN/ TR 15177. Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage, TSE, Ankara (2002)
- [144] American Society for Testing and Materials. Committee C-1 on Cement, 2015. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. ASTM C1437-15. ASTM International.
- [145] W. Shotcreting, Y. Kim, H. Kong, and V. C. Li, "Kim; Kong E Li 2018," no. 100, 2004.
- [146] A. Payla, "3B Baskı için in ş aat ve yıkım atı ğ ı bazlı jeopolimer harçların reolojik özellikleri ve basınç dayanımı," 2022.
- [147] ASTM C230. Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement, West Conshohocken (PA): ASTM International; 2002.
- [148] R. Samuvel Raj, G. Prince Arulraj, N. Anand, B. Kanagaraj, E. Lubloy, and M. Z. Naser, "Nanomaterials in geopolymer composites: A review," *Dev. Built Environ.*, vol. 13, no. October 2022, p. 100114, 2023, doi: 10.1016/j.dibe.2022.100114.
- [149] F. Kantarcı and M. M. Maraş, "Formulation of a novel nano TiO₂-modified geopolymer grout for application in damaged beam-column joints," *Constr. Build. Mater.*, vol. 317, no. December 2021, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125929.
- [150] M. Acikgenc, M. Karatas, and Z. C. Ulucan, "Effects of Elazig region waste brick and limestone powder on engineering properties of self-compacting mortar," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 19, no. 6, pp. 249–255, 2013, doi: 10.5505/pajes.2013.24633.
- [151] M. Saafi *et al.*, "Multifunctional properties of carbon nanotube/fly ash geopolymeric nanocomposites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 46–55, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.007.
- [152] M. A. Kotop, M. S. El-Feky, Y. R. Alharbi, A. A. Abadel, and A. S. Binyahya, "Engineering properties of geopolymer concrete incorporating hybrid nano-materials," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 3641–3647, 2021, doi: 10.1016/j.asej.2021.04.022.
- [153] G. Saini and U. Vattipalli, "Assessing properties of alkali activated GGBS based self-compacting geopolymer concrete using nano-silica," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 12, p. e00352, 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00352.
- [154] M. Seloğlu, H. Tanyıldızı and M. E. Öncü, "An Investigation of the Strength Properties of Fly Ash and Metakaolin-Based Geopolymer Mortars Containing Multi-Wall Carbon Nanotube, Nano Silica, and Nano Zinc", *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 12, no. 3, pp. 842-852, Sep. 2023, doi:10.17798/bitlisfen.132385
- [155] H. M. Khater and H. A. Abd El Gawaad, "Characterization of alkali activated

- geopolymer mortar doped with MWCNT,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 102, pp. 329–337, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.121.
- [156] M. Oualit and A. Irekti, “Mechanical performance of metakaolin-based geopolymer mortar blended with multi-walled carbon nanotubes,” *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 11, pp. 16188–16195, 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.02.166.
- [157] F. Collins, J. Lambert, and W. H. Duan, “The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube-OPC paste mixtures,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 2, pp. 201–207, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.013.
- [158] P. Rovnaník, H. Šimonová, L. Topolář, P. Schmid, and Z. Keršner, “Effect of Carbon Nanotubes on the Mechanical Fracture Properties of Fly Ash Geopolymer,” *Procedia Eng.*, vol. 151, pp. 321–328, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.360.
- [159] S. M. Abbasi, H. Ahmadi, G. Khalaj, and B. Ghasemi, “Microstructure and mechanical properties of a metakaolinite-based geopolymer nanocomposite reinforced with carbon nanotubes,” *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 14, pp. 15171–15176, 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.06.080.
- [160] D. Adak, M. Sarkar, and S. Mandal, “Structural performance of nano-silica modified fly-ash based geopolymer concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 430–439, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.111.
- [161] P. Nuaklong, V. Sata, A. Wongsu, K. Srinavin, and P. Chindaprasirt, “Recycled aggregate high calcium fly ash geopolymer concrete with inclusion of OPC and nano-SiO₂,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 174, pp. 244–252, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.123.
- [162] M. Ibrahim, M. A. M. Johari, M. Maslehuudin, and M. K. Rahman, “Influence of nano-SiO₂ on the strength and microstructure of natural pozzolan based alkali activated concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 173, pp. 573–585, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.051.
- [163] M. Application, B. Mahboubi, Z. Guo, and H. Wu, “Evaluation of durability behavior of geopolymer concrete containing Nano-silica and Nano-clay additives in acidic media,” *J. Civ. Eng. Mater. ...*, vol. 2019, no. April, pp. 157–165, 2019, [Online]. Available: https://www.jcema.com/article_95839_8ccc2387022ea58e3ee36139902d93eb.pdf
- [164] Alami AH, Olabi AG, Ayoub M, Aljaghoub H, Alasad S, Abdelkareem MA, “3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals,” *Buildings*. 2023; 13(4):924. <https://doi.org/10.3390/buildings13040924>.
- [165] F. Shahrajabian and K. Behfarnia, “The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol.

- 176, pp. 172–178, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.033.
- [166] Y. Aygörmez, O. Canpolat, M. M. Al-mashhadani, and M. Uysal, “Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 235, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117502.
- [167] Z. Yang, Z. Liu, F. Li, Y. Lu, and S. Li, “Effect of multi-walled carbon nanotubes on durability of high-strength slag-based geopolymer,” *Ceram. Int.*, vol. 49, no. 8, pp. 11936–11949, 2023, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.12.042.
- [168] F. Li, D. Chen, Y. Lu, H. Zhang, and S. Li, “Influence of mixed fibers on fly ash based geopolymer resistance against freeze-thaw cycles,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 584, no. January, p. 121517, 2022, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121517.
- [169] X. F. Gao, Y. T. Lo, and C. M. Tam, “Investigation of micro-cracks and microstructure of high performance lightweight aggregate concrete,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 5, pp. 485–489, 2002, doi: 10.1016/S0360-1323(01)00051-8.
- [170] J. Yuan *et al.*, “In situ processing of MWCNTs/leucite composites through geopolymer precursor,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 5, pp. 2219–2226, 2017, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.01.008.
- [171] Z. Su, W. Hou, and Z. Sun, “Recent advances in carbon nanotube-geopolymer composite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 252, p. 118940, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118940.
- [172] P. Zhang, K. Wang, J. Wang, J. Guo, and Y. Ling, “Macroscopic and microscopic analyses on mechanical performance of metakaolin/fly ash based geopolymer mortar,” *J. Clean. Prod.*, vol. 294, p. 126193, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126193.
- [173] A. Raza, M. Ahmed, Q. uz Z. Khan, M. Azab, and M. Arshad, “Effectiveness of using nanoparticles in green composites: A scientometric analysis of fresh, mechanical, durability, and microstructural features,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 402, no. July, p. 133077, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133077.
- [174] F. Kantarci, “Effect of fibre characteristics on physical, mechanical and microstructural properties of geopolymer concrete: A comparative experimental investigation,” *Strain*, vol. 59, no. 5, pp. 1–18, 2023, doi: 10.1111/str.12453.
- [175] F. A. Shilar, S. V. Ganachari, V. B. Patil, T. M. Y. Khan, N. M. Almakayeel, and S. Alghamdi, “Review on the Relationship between Nano Modifications of Geopolymer Concrete and Their Structural Characteristics,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 7, 2022, doi: 10.3390/polym14071421.
- [176] R. Samuvel Raj, G. Prince Arulraj, N. Anand, B. Kanagaraj, E. Lubloy, and M. Z. Naser, “Nanomaterials in geopolymer composites: A review,” *Dev. Built Environ.*, vol. 13, no. December 2022, p. 100114, 2023, doi:

10.1016/j.dibe.2022.100114.

- [177] S. Inayath Basha, A. Ur Rehman, H. R. Khalid, M. A. Aziz, and J. H. Kim, “3D Printable Geopolymer Composites Reinforced with Carbon-Based Nanomaterials – A Review,” *Chem. Rec.*, vol. 202300054, 2023, doi: 10.1002/tcr.202300054.
- [178] Y. Xu, H. Lee, N. Buettner, and A. T. Akono, “Multiwalled carbon nanotubes as hard templates to yield advanced geopolymer-based self-assembled nanostructured ceramics,” *Mech. Res. Commun.*, vol. 134, no. October, p. 104216, 2023, doi: 10.1016/j.mechrescom.2023.104216.
- [179] H. M. Khater and A. M. El-Nagar, “Preparation of sustainable of eco-friendly MWCNT-geopolymer composites with superior sulfate resistance,” *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, vol. 3, no. 3, pp. 375–389, 2020, doi: 10.1007/s42114-020-00170-4.
- [180] H. Khater, “Effect of Nano-Clay on Alkali Activated Water-Cooled Slag Geopolymer,” *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 764–776, 2013, doi: 10.9734/bjast/2014/2690.
- [181] H. Tanyildizi, A. Coskun, and M. Seloglu, “The effect of nano SiO₂ on mechanical properties of underwater geopolymer mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 409, no. October, p. 133882, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133882.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyad, Ad

SELOĞLU, Maksut

Web sayfası
(Research Gate, Academia, vs.)

<https://abs.firat.edu.tr/tr/mseloglu>

Eğitim Bilgileri

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği	2015
Lisans	Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği	2011
Lise	Elazığ Balakgazi (YDA) Lisesi	2006

İş Deneyimi

Dönem (Yıl)	Şirket, Kurum	Görev
2011-2013	Park 44 Yapı Denetim Ltd. Şti	Kontrol Mühendisi
2013-2016	Sarvan Yapı Denetim Ltd. Şti	Mühendis
2016-2017	Artvin Çoruh Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2017-	Fırat Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce, Lehçe ve Zazaca.

Yayınlar

1. M. Seloğlu, H. Tanyıldızı and M. E. Öncü, "An Investigation of the Strength Properties of Fly Ash and Metakaolin-Based Geopolymer Mortars Containing Multi-Wall Carbon Nanotube, Nano Silica, and Nano Zinc", Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 12, no. 3, pp. 842-852, Sep. 2023, doi:10.17798/bitlisfen.132385
2. H. Tanyildizi, A. Coskun, and M. Seloğlu, "The effect of nano SiO₂ on mechanical properties of underwater geopolymer mortar," Constr. Build. Mater., vol. 409, no. October, p. 133882, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133882.

Özel İlgi

Her türlü seyahat etmek, doğa yürüyüşlerine katılmak ve yeni yerler keşfetmek.

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ BENZERLİK BİLDİRİMİ FORMU

Öğrencinin Adı, Soyadı	Maksut SELOĞLU
Öğrenci No	19806505
Ana Bilim Dalı	İnşaat Mühendisliği
Program Türü	Proje ☐ Yüksek Lisans ☐ Doktora ☒
Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ
(Varsa) II. Tez Danışmanı (Ünvanı, Adı, Soyadı)	Prof. Dr. Harun TANYILDIZI
Tez Başlığı	Nanomalzeme İçeren Metakaolin ve Uçucu Kül Tabanlı 3B Yazıcı ile Üretilen Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi
RAPOR BİLGİLERİ	
Raporlama Aşaması	Tez Savunma Sınavı Sonrası
Sayfa Sayısı	112
Raporlama Tarihi	09/01/2024
Benzerlik Oranı (%)	15

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmamın toplam 112 sayfalık kısmına ilişkin, 09/01/2024 tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* isimli intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan intihal raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %15 olarak tespit edilmiştir.

Uygulanan filtrelemeler:

- ☒ Başlangıç Bölümleri (Kabul ve Onay sayfası, Teşekkür sayfası, Özet/Abstract) hariç
☒ Kaynaklar hariç
☐ Alıntılar hariç/dâhil
☐ Diğer (Her şey dahil)

Tezimin benzerlik oranı, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İntihal Raporu Uygulama Esaslarında belirtilen üst sınır benzerlik oranını aşmamaktadır. Benzerlik oranım üst sınır benzerlik oranının altında olsa dahi aksinin tespit edilmesi durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi ve hukuki sonuçlarına razı olduğumu bildirir, gereğini arz ederim.

Öğrencinin Adı, Soyadı: Maksut SELOĞLU

Tarih: 09/01/2024

İmza:

Danışman Adı, Soyadı: Doç. Dr. Mehmet Emin ÖNCÜ

İmza:

Tarih: 09/01/2024

Ana Bilim Dalı Başkanı Adı, Soyadı: Prof. Dr. Z. Fuat TOPRAK

İmza:

Tarih: 09/01/2024