

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ATIK BETON AGREGASI VE MERMER TOZU İÇEREN GEOPOLİMER
HARÇLARIN FİZİKSEL, MEKANİK VE DAYANIKLILIK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

İrem GÜLMEZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TUNCELİ-2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ATIK BETON AGREGASI VE MERMER TOZU İÇEREN GEOPOLİMER
HARÇLARIN FİZİKSEL, MEKANİK VE DAYANIKLILIK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İrem GÜLMEZ
(220150038)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TUNCELİ-2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ATIK BETON AGREGASI VE MERMER TOZU İÇEREN GEOPOLİMER
HARÇLARIN FİZİKSEL, MEKANİK VE DAYANIKLILIK PERFORMANSININ
İNCELENMESİ**

**İrem GÜLMEZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 23/ 05/ 2025 tarihinde online savunma ile aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ
(Munzur Üniversitesi)
DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Selim CEMALGİL
(Munzur Üniversitesi)
ÜYE

Prof. Dr. Onur ONAT
(İnönü Üniversitesi)
ÜYE

Bu tez, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Enstitü Müdürü
Nagihan KARAASLAN AYHAN

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı "Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu"ndaki hükümlere tabidir.

23.05.2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İrem GÜLMEZ

Danışman
Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans eğitimimin başından sonuna her detayıyla ilgilenen, samimiyeti ve tecrübesiyle desteğini hiç esirgemeyen, bilgileriyle akademik sürecime ışık tutan, tezimin oluşmasına büyük katkı sunan kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Nihan GÜLMEZ'e, laboratuvar çalışmalarım boyunca beni bilgi ve tecrübesiyle aydınlatan, destek sunan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Selim CEMALGİL'e, bu çalışmayı gerçekleştirebilmem adına sağladıkları kaynaklar için Munzur Üniversitesi'ne, tez çalışmam için bana sunduğu destek ile yolumu güzelleştiren değerli ablam, komşum Dr. Öğr. Üyesi Özge KUTLU DEMİR'e, malzeme temini için yardımcı olan Kayaoğulları Mermer Atölyesi sahibi Tekin KAYA abime, tez çalışmam boyunca maddi manevi desteklerini hissettiğim çok sevdiğim arkadaşlarıma, dünyaya ilk geldiğim andan itibaren gücüme güç katan, her anlamda yanımda olup koşulsuz destek sunan annem Sevda GÜLMEZ, babam Mahfuz GÜLMEZ'e, canımdan öte kardeşlerim Şimal GÜLMEZ ve Nisa GÜLMEZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İrem GÜLMEZ

TUNCELİ-2025

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	V
SEMBOLLER LİSTESİ.....	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ	IX
ÖZET.....	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	5
1.2. Tezin Yapısı.....	6
2. GENEL BİLGİLER.....	6
2.1. Portland Çimentosu.....	7
2.2. Geopolimer	7
2.2.1. Geopolimerlerin dezavantajları.....	9
2.2.2. Geopolimerlerin Portland çimentosu ile karşılaştırılması	10
2.2.3. Geopolimerlerin kullanım alanları	11
2.2.4. Geopolimer molekül yapısını ve kimyasal bileşenlerini değerlendirmekte kullanılan ışın deneyleri	12
2.2.5. Geopolimer üretiminde kullanılan alkali aktivatörler	13
2.2.5.1. Sodyum silikat.....	14
2.2.5.2. Sodyum silikatların sınıflandırılması	15
2.2.5.3. Sodyum hidroksit	15
2.3. Puzolan Malzemelerin Tanımı.....	16
2.3.1. Silis dumanı	16
2.3.2. Uçucu kül.....	17
2.3.2.1. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	19
2.3.2.2. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri	19
2.3.2.2. Uçucu külün mevcut kullanım alanları.....	20
2.4. İnşaat Yıkıntı Atığı.....	21
2.5. Mermer	22
2.5.1. Atık mermer tozu	23
2.6. Literatür Taraması.....	24
3. MATERYAL VE METOT	36
3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Bağlayıcılar	36
3.1.1. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül.....	36
3.1.2. Deneysel çalışmada kullanılan silis dumanı	38
3.2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Agregalar.....	40
3.2.1. Deneysel çalışmada kullanılan mermer tozu	40
3.2.2. Deneysel çalışmada kullanılan yıkıntı atığı	43
3.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Alkaliler	45
3.4. Deney Metodu.....	46
3.5. Agregalar Üzerinde Gerçekleştirilen Testler	47
3.5.1. Elek analizi	47
3.5.2. Özgül ağırlık deneyi	48
3.5.3. Su emme tayini.....	49
3.6. Geopolimer Harç Karışımlarının Hazırlanması ve Karışım Oranları	51

3.6.1. Alkali çözeltinin hazırlanması	51
3.7. Sertleşmiş Geopolimer Harçlar Üzerinde Yapılan Deneyler	57
3.7.1. Fiziksel deneyler	57
3.7.1.1. Kuru yoğunluk, doymuş kuru yüzey yoğunluk, görünür porozite ve su emme deneyleri	57
3.7.2. Mekanik deneyler	59
3.7.2.1. Üç nokta eğilme deneyi	59
3.7.2.2. Basınç dayanımı deneyi	60
3.7.3. Durabilite deneyleri	61
3.7.3.1. Kılcal geçirimsizlik deneyi	61
3.7.3.2. Donma-çözülme deneyi	62
3.8. Mikroyapısal Analizler	63
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	64
4.1. Geopolimer Numunelerin Fiziksel Özelliklerine Ait Deney Sonuçları	64
4.1.1. Yığın yoğunluk, görünür porozite, su emme tayini deney sonuçları	64
4.2. Geopolimer Numunelerin Mekanik Özelliklerine Ait Deney Sonuçları	67
4.2.1. Eğilmede çekme deneyi sonuçları	67
4.2.2. Basınç dayanımı deney sonuçları	69
4.3. Geopolimer Numunelerin Durabilite Özelliklerine Ait Deney Sonuçları	71
4.3.1. Kılcal geçirimsizlik deney sonuçları	71
4.3.2. Donma-çözülme deney sonuçları	73
4.4. Geopolimer Numunelerinin SEM/EDS Analizi Sonuçları	75
5. SONUÇ	79
6. ÖNERİLER	80
7. KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	89

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül	37
Şekil 3.2. Uçucu kül XRD analizi	38
Şekil 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan silis dumanı	39
Şekil 3.4. Silis dumanı XRD analizi	40
Şekil 3.5. Deneysel çalışmada kullanılan mermer tozu	41
Şekil 3.6. Mermer tozunun granülometri eğrisi	42
Şekil 3.7. Mermer tozu XRD analizi	42
Şekil 3.8. Yıkıntı atığının toplandığı alan	43
Şekil 3.9. Yıkıntı atığının öğütülmüş hali	44
Şekil 3.10. Yıkıntı atığı granülometri eğrisi	45
Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan sodyum silikat	46
Şekil 3.12. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit	46
Şekil 3.13. Yıkıntı atığı	47
Şekil 3.14. Los Angeles cihazı	48
Şekil 3.15. Elek analizi cihazı	48
Şekil 3.16. Özgül ağırlık deney ekipmanları	49
Şekil 3.17. İnce agregada özgül ağırlık ve su emme oranı tayininde kullanılan kesik koni	50
Şekil 3.18. Doygunluk işlemi için su içerisinde bekletilen atık mermer tozu numunesi	50
Şekil 3.19. Doygunluk işlemi için su içerisinde bekletilen yıkıntı atığı numunesi	51
Şekil 3.20. Soğumaya bırakılan sodyum hidroksit çözeltisi	52
Şekil 3.21. Mikser	54
Şekil 3.22. Karışımın hazırlanma aşaması	54
Şekil 3.23. Deneylerde kullanılan çelik kalıplar	55
Şekil 3.24. Sarsma tablası	55
Şekil 3.25. Deneyler için hazırlanan numuneler	56
Şekil 3.26. Etüv cihazı	56
Şekil 3.27. Numunelerin etüve yerleştirilmiş hali	58
Şekil 3.28. Soğumaya bırakılan numuneler	58
Şekil 3.29. Numunelerin su kürüne yerleştirilmesi	58
Şekil 3.30. Arşimet terazisi	59
Şekil 3.31. Eğilme dayanımı deney düzeneği	60
Şekil 3.32. Basınç deneyi düzeneği	61
Şekil 3.33. Kılcal geçirimlilik tayini için kullanılan su havuzu	62
Şekil 3.34. Numunelerin donma-çözülme cihazı içerisindeki görüntüsü	62
Şekil 4.1. Geopolimer harçların görünür porozite ve su emme yüzdesi değerleri	67
Şekil 4.2. Eğilmede çekme dayanımı deneyi sonrasında kırılan geopolimer harç numunesi	68
Şekil 4.3. Eğilmede çekme deneyi sonuçları	69
Şekil 4.4. Basınç dayanımı deneyi sonrasında kırılan geopolimer harç numunesi	70
Şekil 4.5. Basınç dayanımı sonuçları	71
Şekil 4.6. Kılcal geçirimlilik deney sonuçları	73
Şekil 4.7. Kılcal geçirimlilik deney sonrası numuneler	73
Şekil 4.8. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi görüntüsü	74

Şekil 4.9. Numunelerin donma-çözülme deneyi sonrası görüntüsü.....	75
Şekil 4.10. 100U50M50Y numunesine ait (a) 100x büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) 1000x büyütmedeki SEM görüntüsü ve (c) EDS analiz sonuçları	77
Şekil. 4.11. 80U50M50Y numunesine ait (a) 50x büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) 100x büyütmedeki SEM görüntüsü ve (c) EDS analiz sonuçları.....	78
Şekil. 4.12. 80100Y numunesine ait (a) 100x büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) 50x büyütmedeki SEM görüntüsü ve (c) EDS analiz sonuçları.....	78



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Portland çimentosuyla karşılaştırıldığında geopolimerlerin üstün özellikleri (Sun ve ark, 2021).....	10
Tablo 2.2. Türkiye’de linyit kömürü ile çalışan termik santraller (Aruntaş, 2006).....	18
Tablo 2.3. Dünya’da 1990 ve 2020 yılında mermerin en çok tüketildiği alanlar (Ceylan, 2000)	23
Tablo 3.1. Uçucu kül kimyasal analizi	37
Tablo 3.2. Silis dumanı kimyasal analizi.....	38
Tablo 3.3. Mermer tozunun fiziksel özellikleri	41
Tablo 3.4. Yıkıntı atığının fiziksel özellikleri.....	44
Tablo 3.5. Deneylerde kullanılan tüm karışım oranlarına ait bileşen miktarları	53
Tablo 4.1. Geopolimer harçların kuru ve doymuş kuru yüzey yoğunluk değerleri.....	66
Tablo 4.2. Numunelerin donma-çözülme deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri	75

SEMBOLLER LİSTESİ

µm	: Mikrometre
Å	: Ångström
M	: Molar
MPa	: Megapascal
MW	: Megawatt
Nm	: Nanometre



KISALTMALAR LİSTESİ

AAC	: Alkali aktive edilmiş cüruf
ABD	: Amerika birleşik devleti
Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
ASTM	: American society for testing and materials
Ca	: Kalsiyum
CaCO₃	: Kalsiyum karbonat
CaO	: Kalsiyum oksit
CaOH₂	: Kalsiyum hidroksit
CASH	: Kalsiyum alümino silikat hidrat
CO₂	: Karbondioksit
CSH	: Kalsiyum silikat hidrat
EDS	: Enerji Dağıtıcı X-Işını Spektroskopisi
Fe₂O₃	: Demir oksit
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi
GDA	: Geri dönüştürülmüş agrega
H₂SO₄	: Sülfirik asit
İYA	: İnşaat yıkıntı atıkları
K	: Potasyum
K₂SiO₃	: Potasyum silikat
KOH	: Potasyum hidroksit
MgO	: Magnezyum oksit
MK	: Metakaolin
MT	: Mermer Tozu
Na	: Sodyum
Na₂O	: Sodyum oksit
Na₂Si₂O₅	: Sodyum disilikat
Na₂SiO₃	: Sodyum silikat
Na₄SiO₄	: Sodyum ortosilikat
NaOH	: Sodyum hidroksit
NMR	: Nükleer manyetik rezonans
PÇ	: Portland çimentosu
PGP	: Pomza esaslı geopolimer
SD	: Silis dumanı
DYK	: Doygun yüzey kuru
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SH	: Sodyum Hidroksit
Si	: Silisyum
SiO₂	: Silisyum oksit
SS	: Sodyum Silikat
TEM	: Geçirimli elektron mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TiO₂	: Titanyum dioksit
UK	: Uçucu kül
XRD	: X-ışını difraksiyonu
YA	: Yıkıntı Atığı

YFC

: Yüksek fırın cürufu



ÖZET

Bu çalışma inşaat yıkıntı atıkları (YA) ve mermer tozu (MT) agregası ile birlikte, silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) bağlayıcı malzemelerinin geopolimer harçların özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktadır. Çalışmada alkali aktivatör konsantrasyonu 12 M (NaOH) ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2 olarak seçilmiştir. Aynı zamanda, hazırlanan karışımlarda MT agregası, YA'nın ağırlıkça %25'i ile yer değiştirilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan SD, UK'nın ağırlıkça %0, %10, %20 ve %30 olacak şekilde yer değiştirilerek kullanılmıştır. Geopolimer numuneler üzerinde fiziksel, mekanik ve durabilite deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda mikroyapı analizleri de incelenmiştir. Yanısıra, mikroyapı analizleri taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile yapılmıştır. Karışımlardaki UK oranı azaldıkça su emme ve görünür porozite değerleri de azalmıştır. SD ve MT oranı arttıkça eğilmede çekme dayanımı artmıştır fakat belli bir seviyeden sonra düşüş gözlenmiştir. MT miktarının artmasıyla birlikte basınç dayanımı artış göstermiştir. Donma-çözünme deneyinde gözlemlenen hasarlar, SD oranı %0 olan numunelere aittir. Sonuç olarak mermer tozunun arttırılması ve silis dumanının azaltılması, deney sonuçlarının referans numunelere göre geopolimer harçlarda iyileşme sağladığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Mermer tozu atığı, inşaat yıkıntı atığı, endüstriyel atık malzemeler, alkali aktive edilmiş harçlar

ABSTRACT

Investigation of Physical, Mechanical and Durability Properties of Geopolymer Mortars Produced with Waste Concrete and Marble Powder

This study investigates the effects of silica fume (SF) and fly ash (FA) binders together with construction waste (WW) and marble dust (MD) aggregates on the properties of geopolymer mortars. The alkali activator concentration was selected as 12 M (NaOH), with a $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 2. In the prepared mixtures, %25 by weight of YA was replaced with MD aggregate. Additionally, SF used as a binder was partially replaced with FA at 0%, 10%, 20% and 30% by weight. Physical, mechanical and durability tests were carried out on geopolymer samples. Microstructure analyses were also conducted using a scanning electron microscope (SEM). As the WW content in the mixtures decreased, both water absorption and apparent porosity values decreased. Flexural tensile strength increased with higher SF and MD ratios, although a decrease was observed beyond a certain point. Compressive strength improved with increasing MD content. Damage observed in the freeze-thaw test was most severe in samples containing 0% SF. In conclusion, increasing the amount of marble dust and reducing the silica fume content led to improved performance in geopolymer mortars compared to the reference samples.

Key Words: Marble dust waste, construction debris waste, industrial waste materials, alkali activated mortars

1. GİRİŞ

Birleşmiş Milletler' in şehirleşmenin geleceğine dair yapmış oldukları araştırmalar doğrultusunda, 2050 yılına kadar mevcut dünya nüfusunun %65'inden fazlasının kentlerde yaşayacağına dair öngörülerde bulunmaktadır (United Nations, 2018). Bu öngörü, kentleşmenin inşaat sektörü üzerindeki etkilerini ortaya koyması açısından oldukça önemlidir. Artan kent nüfusu, yeni yapı ve binalara olan talebi beraberinde getirecek olup bu durum da yapı malzemesi ihtiyacını önemli ölçüde artıracaktır. Dünya genelinde, sudan sonra en fazla tüketilen malzeme olan geleneksel beton, bu ihtiyacın karşılanmasında temel yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Ancak betonun yoğun kullanımı, doğal kaynakların hızla tükenmesine yol açmakta ve çevresel sürdürülebilirlik açısından çeşitli sorunlar doğurmaktadır. Betonun düşük maliyetli, kolay uygulanabilir ve yaygın olarak bilinen bir malzeme olması, bu eğilimin gelecekte daha da artacağına işaret etmektedir (İpek ve Ekmen, 2022). Çağımızın bilim ve teknoloji dünyasında ilerleme katedilerek oluşan gelişmeler, yaşamın her alanında var olan mevcudiyeti gibi inşaat sektöründe de göz ardı edilemeyecek, önemli yenilikleri beraberinde getiriyor. Küresel ölçekte çimento endüstrisi, betonun inşaat sektöründe yoğun talep görmesi nedeniyle en yüksek üretim hacmine sahip endüstrilerden biri haline gelmiştir. Ancak bu yüksek üretim kapasitesi, çimento endüstrisini çevre kirliliğine en fazla sebebiyet veren sanayi kollarından biri konumuna getirmektedir (Topçu ve Sofuoğlu, 2020). Doğal kaynaklara ve yaşanan çevreye bilinçli ya da bilinçsiz şekilde verilen zararlar sonucunda ortaya çıkan istenmeyen durumlar çevre kirliliği olarak tanımlanmaktadır (Eser ve ark., 2024). Küresel ölçekte çevreyi tehdit eden unsunlar arasında en ön sıralarda yer alan sorunlardan biri, büyük ölçüde insan faaliyetleriyle birlikte artan sera gazı emisyonlarına bağlı olarak hızla gelişen küresel ısınma ve bunun bir sonucu olarak kabul edilen iklim değişikliğidir. Küresel ısınmanın başlıca nedeni, sera gazı emisyonlarıdır ve bu emisyonların büyük bir kısmını karbondioksit oluşturmaktadır (Tokdemir ve ark., 2024).

Beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan malzemedir. Beton esas olarak çimento, çakıl, kum, su ve katkı maddelerinden oluşur. Beton üretiminde en çok kullanılan çimento türü Portland çimentosu olup, %90'dan fazlası klinker adı verilen bir malzemeden oluşmaktadır. Klinker, bir çimento fabrikasında yüksek sıcaklıklarda kireç taşının yanması sonucu oluşan üründür. Bu işlem sırasında kalsiyum karbonat , "kalsinasyon" adı verilen bir işlemle CaO ve CO₂'ye ayrışır. Kalsinasyon sırasında malzemelerde bulunan karbon, CO₂

olarak salınır. Salınan CO₂'nin bir kısmı, karbonasyon sırasında beton tarafından atmosferden yeniden emilir. Bu durumda, beton gözeneklerinde bulunan kireç, atmosferde bulunan CO₂ ile reaksiyona girer ve kalsiyum karbonat üretir. Ancak betonun ömrü boyunca yalnızca çok az miktarda CO₂ yeniden emilir. Çoğu durumda, bu yeniden emilimin betonun CO₂ emisyonunun yaşam döngüsü hesaplamalarına katkısı bu nedenle dikkate alınmaz (Teixeira, 2016).

Beton; çimento, agrega ve suyun belirli miktarlarda karıştırılması sonucu elde edilen ve kullanım yelpazesi oldukça geniş bir yapı malzemesidir. Ancak çimentonun üretimi esnasında tüketmiş olduğu yüksek enerjiler ve atmosfere saldıgı yoğun CO₂, çevresel sürdürülebilirlik açısından ciddi bir tehlike oluşturmaktadır (Eryılmaz ve ark., 2023). Çağımızda küresel ısınmanın sebebiyet verdiği mevcut çevresel sorunlar, yüksek paydada enerji tüketimi ile ilişkilendirilmektedir. Enerji tüketimi açısından önemli bir konumda bulunan çimentonun üretimi ise, dünya geneli baz alınarak yılda yaklaşık 4,6 milyar tonluk üretim kapasitesine sahip olmasından ötürü çevresel sorunların başlıca faktörlerinden biri haline gelmiştir (Yurt ve Emiroğlu, 2020). İnşaatta, diğer tüm yapı malzemelerinin toplamının iki katı kadar beton kullanılmaktadır (Gagg, 2014). Çimento üretimi, dünya çapındaki endüstriyel enerji tüketiminin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır. PC endüstrisi, alüminyum ve çelikten sonra enerji tüketimi açısından sektörde üçüncü sırada yer almaktadır (Rashad, 2014). Dünya genelindeki toplam CO₂ salınımının yaklaşık %7'sinin çimento endüstrisinden kaynaklandığı bilinmektedir. Mevcut üretim şekilleri ve talep artışı göz önüne alındığında, bu oranın önümüzdeki birkaç yıl içerisinde %17'ye ulaşabileceği öngörülmektedir (Kantarıcı, 2021). Bu durum, çimento üretiminin çevresel etkilerini azaltmaya yönelik alternatif bağlayıcı sistemlerin ve sürdürülebilir malzeme çözümlerinin geliştirilmesini daha da önemli hale getirmektedir. Sahada uygulama kolaylığı, ekonomik avantajları ve sahip olduğu yapısal özellikleri bakımından çimento, inşaat sektörünün neredeyse tamamında en çok tercih edilen temel yapı malzemelerinden biri olması diğer yapı malzemelerine kıyasla büyük fark oluşturmaktadır. Geleneksel Portland çimentonun üretimi, genel ölçekte kalker ve kil hammaddeleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu hammaddelerin kullanım vasıtasıyla oluşan klinkerleşme süreci esnasında ise fırın sıcaklığı 1450–1500°C'ye kadar ulaşmaktadır. Bu yüksek sıcaklıkların sağlanabilmesi için önemli miktarda fosil yakıt tüketilmektedir. Hammaddelerin temin edilmesi, pişirilmesi ve öğütülmesi aşamaları çimento üretim sürecine dahil olmakta ve aynı zamanda bu süreç esnasında yoğun enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Çimentonun üretimi için gerçekleşen bu süreç esnasında büyük

ölçekte karbondioksit olmak üzere atmosfere çeşitli sera gazları salınmaktadır. Yapılan araştırmalar neticesinde, bir ton çimento üretiminin miktar olarak yaklaşık 810 ila 1000 kg arasında CO₂ salımına neden olduğu ve bu üretimle birlikte ortalama olarak 10 kg civarında atık toz oluştuğu bilgisine varılmaktadır. Dolayısıyla çimento üretiminin doğurduğu zararlı çevresel faktörler sebebiyle, sürdürülebilir ve çevre dostu olan yapı malzemelerine rağbet gün geçtikçe artmıştır (Karagöl, 2022).

Atık malzemeler içerisinde önemli bir yere sahip olan katı atıklar, insanların farklı farklı faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan, bertaraf edilmesi gereken madde ve kütlelerden oluşmaktadır. Bu malzemeler genel tanımla endüstriyel atıklar, tıbbi atıklar ve evsel atıklar olarak sınıflandırılmaktadır. Katı atıklar içerisinde önemli bir yere sahip olan inşaat atıkları ise var olan yapı ve tesislerde gerçekleştirilen inşaat, yıkım, restorasyon ve onarım gibi işlemler sonucunda ortaya çıkan kum, fayans, çakıl, taş, seramik, mermer, ahşap, alüminyum, cam, boya, kâğıt, asbest, sıhhi tesisat boruları, elektrikli parçalar, plastik ve benzeri malzemelerden oluşmaktadır (Annakoa, 2019).

Son yıllarda, çimento üretiminin sebep olduğu olumsuz çevresel faktörleri en az seviyelere indirmek amacıyla inşaat sektöründe yaygın biçimde kullanılan geleneksel portland çimentosuna alternatif olacak, düşük karbon salımı ve yüksek dayanım gibi avantajlara sahip, alkali ile aktive edilmiş harçlar üzerine yapılan araştırmalarda artış gözlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçları, endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi ve düşük maliyetle üretilebilmesi, çevre kirliliğini azaltması, enerji tasarrufu sağlaması, yüksek erken dayanım ve üstün yanmazlık özelliklerine ek olarak uzun ömürlü ve dayanıklı olmaları, geleneksel portland çimentosuna nazaran daha sürdürülebilir ve avantajları olan bir alternatif haline getirmektedir (Atabey ve Öztürk, 2021). Bununla birlikte, inşaat ve yıkıntı atıklarının dönüştürülerek yeniden kullanılması, tükenme riski taşıyan doğal hammaddelerin tüketimini azaltmanın yanı sıra, bu hammaddelerin işlenmesi için gereken enerji miktarını, makine gücünü ve çevreye salınan karbondioksit miktarını göz ardı edilemeyecek seviyede azaltmada etkili olacaktır (Topçu ve Sofuoğlu, 2020). Geopolimerler, alkalilerle aktive edilen malzemeler olarak bilinmekle birlikte genellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi diğer endüstriyel atık malzemelerden üretilmektedir. Bu tür atık malzemelerin değerlendirilmesi, geopolimerlerin özellikle inşaat sektöründe kullanımını daha sürdürülebilir hale getirmektedir. Yapılan araştırmalara göre, bu malzemelerin kullanımıyla çimento katkılı üretimlere kıyasla maliyetlerde %30'a, sera gazı emisyonlarında ise %80'e varan azalmalar sağlanabilmektedir. Bu bağlamda,

geopolimer bağlayıcıların kullanımı hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli avantajlar sunmaktadır (Van Deventer ve ark, 2012). İlk temelleri 1978 yılında Davidovits tarafından atılan geopolimer betonun üretimi, portland çimento katkılı betonlara kıyasla daha az enerji tüketmesi ve atmosfere daha az miktarda karbon salımı yapması ile çevre dostu bir yapı malzemesi olarak öne çıkmayı başarmıştır (Davidovits, 2008). Ancak, bu beton türünün üretiminde kullanılan agrega türü hala büyük ölçüde doğal kaynaklardan sağlanmaktadır. Doğal kaynakların yoğun miktarda kullanılması çevresel sürdürülebilirlik açısından gözardı edilemeyecek sorunlara yol açmaktadır. Bu sorunlar sebebiyle, agreganın teminini alternatif kaynaklardan sağlamak hem doğal kaynakların tükenmesinin önlenmesi adına hem de çevresel etkilerin minimum seviyelere inmesi adına, malzeme verimliliğinin artırılması üzerine önemli bir yere sahiptir (Tam ve ark, 2009).

Geopolimer beton üretimindeki araştırmalarda genellikle çimento katkı miktarının azaltılması üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu azaltma, puzolanik özelliklere sahip uçucu kül, silis dumanı, taban külü gibi endüstriyel atık malzemelerin geopolimer beton üretiminde kullanımıyla gerçekleştirilmektedir. Böylesi bir yaklaşımın küresel ölçekte yaygınlaşması durumunda, çimento üretiminde kayda değer bir azalma sağlanabileceği öngörülmektedir. Böylece hem doğal kaynakların tüketimi azaltılabilir hem de sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde düşürülebilir.

Puzolanik malzemelerin kullanımı, uzun vadeli ve dayanıklılığı yüksek olması sebebiyle yüksek mühendislik özelliklerine sahip betonların elde edilmesinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, belirli bir oranda çimentonun yerine kullanıldıkları için çimento tüketimini azaltmakta beraber aynı zamanda betonun taze ve sertleşmiş durumdaki özelliklerini de iyileştirmektedir. Betonun kimyasal bileşimi, parçacık boyutu dağılımı, inceliği ve puzolanik aktifliği, mekanik özellikleri üzerinde oldukça belirleyici etkiye sahip başlıca faktörlerdir (Hamalı, 2007).

Portland çimentosuna (PÇ) alternatif bağlayıcılar konusu ile ilgili yapılan çalışmalarda öne çıkan yöntemlerden biri, yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül (UK) ve benzeri endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu ile bağlayıcı özellik kazandırılmasıdır. Alümina ve silika içeren her malzeme teorik olarak alkali aktivasyon ile bağlayıcı malzeme haline getirilebilmektedir. Uçucu kül ve YFC gibi amorf karakterli atık malzemeler, alkali aktivasyonlarla birlikte bağlayıcı özellikler kazanarak, Portland çimentosuna sürdürülebilir ve çevre dostu alternatifler oluşturur (Özdal, 2019).

Türkiye İstatistik Kurumu'nun açıklamış olduğu verilerine göre, termik santrallerde 9,1 bin tonu tehlikeli atık olmak üzere toplamda 24,2 milyon ton atık oluşmaktadır. Sonuç itibariyle, oluşan atığın %98,5'ini kül, cüruf, uçucu kül, alçıtaşı gibi mineral kökenli atıklar oluşturmaktadır. Toplam atık miktarının %48,3'ü kül dağına veya kül barajına gönderilerek, %21,7'si düzenli depolama sahalarına gönderilerek, %15'i satılarak ya da lisanslı atık bertaraf ve geri kazanım fabrikalarına gönderilerek, kalan %15'lik kısım ise maden ve taş ocaklarına gönderme, belediye çöp toplama alanlarına atma gibi diğer yöntemlerle bertaraf edilmiştir. Yaklaşık olarak 1000 MW kurulu güce sahip bir termik santralde, bir yıl içinde ortalama olarak 650 bin ton uçucu kül ve taban külü oluşmaktadır. Meydana gelen atıkların depolama alanlarında muhafaza edilmesi, hem çevresel kirliliğe hem de ekonomik kayıplara yol açmaktadır (Gümüş, 2016).

Geopolimer bağlayıcılar, 1978 yılında Davidovits isimli bir araştırmacı tarafından tanımlaması yapıldığından beri, sadece kimya alanında değil, mühendislik alanında da ilgi görmüştür. Son zamanlarda geopolimerlerin, çevreci bir malzeme olma özelliklerine ek olarak erken dayanım, asit ve sülfata karşı göstermiş olduğu direnç gibi avantajları nedeniyle standart Portland çimentosuna alternatif bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Geopolimerler, uçucu kül, silis dumanı ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi yüksek silika ve alümin içerikli malzemelerden üretilse de, çağımızda en fazla ilgi gören geopolimer türü uçucu kül esaslı olanlardır. Geopolimer bağlayıcılar, asit etkilerine karşı direnç gösterebilen beton üretiminde güçlü bir seçenek oluşturabilirler. Bunun sebebi geopolimerlerin yapısındaki bütünlüğü sağlamak adına kalsiyum silikat hidrat bağlayıcılarından ziyade alüminosilikat esaslı olmalarıdır (Kalkan, 2017).

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı artan dünya nüfusuyla birlikte atmosfere salınan karbondioksit (CO_2) miktarını mümkün mertebe düşük seviyelere indirmeyi sağlayacak, çevre dostu ve portland çimentosuna alternatif yapı malzemesi üretimini kapsamaktadır. Çimento üretimi sırasında önemli miktarlarda açığa çıkan CO_2 miktarını azaltmaya çalışmak adına çimentosuz beton üretimi yapmaya çalışmaktır. Geleneksel betonlara alternatif olabilecek çimento ikamesiz ve endüstriyel yan ürünlerle üretilebilen geopolimer betonlar geliştirmeye çalışmaktır. Aynı zamanda yıkılmış veya yıkımı gerçekleştirilmiş yapıların atıklarını çevreyi kirletmemesi adına sürdürülebilir yöntemlerle bertaraf edebilmektir.

1.2. Tezin Yapısı

Bu çalışmada, çimento kullanılmadan; atık mermer tozu, yapı yıkımlarından elde edilen yıkıntı atıkları, silis dumanı ve termik santral kaynaklı uçucu kül, alkali aktivatörler ile kimyasal olarak aktive edilerek geopolimer harç üretimi amaçlanmaktadır. Bu sayede hem atık malzemelerin çevresel etkileri azaltması hem de çimento ikame edilmeden üretilen betonların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine bir araştırma yapılacaktır.

Bu çalışmada atık malzemeler ve alkali aktivatörler kullanılarak üretilen geopolimer harçlar üzerinde yığın yoğunluk, görünür porozite, su emme, kılcal geçirimsizlik, eğilmede çekme ve basınç dayanımları, donma-çözünme deneyleri gibi fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini tayin edecek deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımlarında NaOH molaritesi 12 M olarak hazırlanmıştır. Geopolimer beton karışımları, 40×40×160 mm boyutlarındaki çelik kalıplara yerleştirilmiş ve ilk kür aşaması olarak 24 saat süreyle hava ortamında bekletilmiştir. Daha sonra, kalıplar içerisindeki numuneler 75 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat boyunca kürlenmiştir. Numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra fiziksel, mekanik, durabilite ve donma-çözünme deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde silis dumanı, uçucu kül, yıkıntı atığı, atık mermer tozu ve geopolimer beton hakkında genel bilgiler verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde geopolimer beton üretiminde kullanılan bağlayıcılar, agregalar ve alkaliler hakkında bilgiler sunulmuş olup, numunelerin üretimi ve yapılan deneyler hakkında bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde geopolimer beton numunesi üretiminden elde edilen bulgular üzerinde tartışmalar yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Son bölümde ise elde edilen veriler kapsamında sonuçlar kısaca özetlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Yürütülen çalışmada geopolimer beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak; silis dumanı, uçucu kül, agrega olarak; atık mermer tozu, yıkıntı atığı beton ve alkali aktivatör olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır.

2.1. Portland Çimentosu

Portland çimentosu, kalker ve kil gibi hammaddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi sonucu oluşan ve "klinker" olarak adlandırılan malzemenin, az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen, su ile karıştırıldığında bağlayıcı özellik kazanan hidrolik bir bağlayıcıdır (Görür, 2015). Tarihsel olarak, 1824 yılında İngiltere'nin Leeds kentine yakın Portland adasından esinlenerek, Joseph Aspdin isimli bir duvar ustası tarafından geliştirilmiştir. Aspdin, kalker ve kil karışımını pişirerek elde ettiği ürünü "Portland çimentosu" olarak adlandırmış ve bu isim, günümüzde dünya genelinde çimento türünün standart adı haline gelmiştir. Portland çimentosu (PC), katkı maddesi içermeyen, yalnızca çimento klinkeri ve priz süresini düzenlemek amacıyla belirli oranda ilave edilen alçıtaşıdan oluşan bir bağlayıcıdır.

Klinker üretimi sürecinde yüksek düzeyde enerji tüketimi gerçekleşmekte ve kalsinasyon ile yanma reaksiyonları sonucunda atmosfere önemli miktarda CO_2 salınımı yapılmaktadır (Koçak, 2011). Bu durum, çimento endüstrisinin çevresel etkilerini artırmakta ve sürdürülebilir üretim yaklaşımlarını zorunlu hale getirmektedir. Bu bağlamda, çimento üretiminde klinker kullanımının azaltılması amacıyla, katkı ya da ikame malzemesi olarak doğal (zeolit, tras vb.) ve yapay (uçucu kül, taban külü, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) puzolanik malzemelerden yararlanılmaktadır. Bu üretim sürecinde, 1 ton portland çimentosu üretimi sırasında yaklaşık 1 ton karbondioksit (CO_2) atmosfere salınmaktadır. Bu durum, çimento endüstrisini küresel sera gazı emisyonlarının en büyük kaynaklarından biri haline getirmektedir.

2.2. Geopolimer

İlk kez 1978 yılında, alüminosilikat esaslı polimerleri tanımlamak adına Fransız asıllı araştırmacı Joseph Davidovits tarafından geopolimer kavramı telaffuz edilmiştir. Geopolimerler doğal puzolan çeşitlerinden uçucu kül, yüksek fırın cürufu, tuf, metakaolin, pomza, perlit gibi ya da endüstriyel puzolan çeşitleri ile reaksiyona girmesi sonucu oluşan

yeni nesil bağlayıcı sistemler olarak tanımlaması yapılmaktadır. Geopolimer bağlayıcı sistemler Portland çimentosuna kıyasla daha düşük karbon ayak izi, kimyasal direnci ve yüksek yangın dayanımı gibi çevresel ve mekanik özelliklerine ek olarak, hem ham madde temin edilebilirliği hem de düşük üretim maliyetleri bakımından büyük avantajlara sahiptir. Bu geopolimer bağlayıcılar, başta uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin olmak üzere çeşitli alüminosilikat esaslı malzemelerin yüksek aktivatör çözeltilerle reaksiyona girmesi sonucu elde edilebilme özellikleri mevcuttur (Kantarci, 2021). Ancak metakaolin, yüksek saflıkta ve özel işlem gerektiren bir malzeme olması nedeniyle büyük ölçekli uygulamalarda maliyet açısından dezavantajlıdır. Bu nedenle, metakaolin kullanımının yaygınlığı sınırlı olup, genellikle daha ekonomik ve bol bulunan alternatif alüminosilikat kaynakları tercih edilmektedir (Karaaslan ve ark, 2022).

Geopolimer bağlayıcılar, yapısal bütünlüğe ulaşmak amacıyla Portland çimentosundan (PÇ) farklı kimyasal reaksiyon mekanizmalarına sahip olduklarından, geleneksel çimento esaslı yapı malzemelerine kıyasla belirgin şekilde farklı performans özellikleri sergilemektedirler (Ekinci ve Türkmen, 2021). Geopolimer bağlayıcı sistemlerin hızlı priz alma, kısa sürede yüksek basınç dayanımı, yangın dayanımı, asidik ve alkali ortamlara karşı direnç, düşük rötre gibi avantajlı mühendislik özellikleri sayesinde, alternatif inşaat malzemesi olarak gördüğü ilgi giderek artmaktadır (Tokdemir ve ark, 2024). Bu üstün özellikler, geopolimerleri düşük ekolojik etkisi ve hammaddelerden nispeten yüksek verim elde edilebilmesi sayesinde, geleceğin yapı malzemesi olarak ciddi şekilde değerlendirilmesi gereken bir alternatif haline getirmektedir. Hem çevresel sürdürülebilirlik hem de teknik performans açısından sunduğu avantajlar, geopolimerlerin yalnızca akademik düzeyde değil, endüstriyel ölçekte de benimsenmesini teşvik etmektedir. Özellikle çimento üretiminin neden olduğu karbon salınımının azaltılmasına yönelik küresel hedefler göz önünde bulundurulduğunda, geopolimerlerin bu dönüşümde kilit bir rol üstlenmesi beklenmektedir.

Geopolimerik sistemlerde çözünme ve jel oluşum reaksiyonlarını yönlendiren kimyasal mekanizmalar henüz tam olarak aydınlatılamamıştır. Bununla birlikte, uçucu kül ve kil gibi alüminosilikat esaslı malzemelerin kullanıldığı pek çok çalışmada, başlangıç hammaddelerinin çözünmesinin nihai sertleşmiş yapı oluşmadan önce tamamlanmadığı görülmektedir. Çoğu durumda, tüm karışımın katılaşmasını sağlamak için sadece partikül yüzeylerinde bulunan sınırlı miktardaki silika ve alümina türlerinin reaksiyona katılması yeterli olmaktadır. Bu bağlamda, genellikle çözünmemiş atık partiküllerin nihai

geopolimerik matrise yüzey reaksiyonları aracılığıyla bağlandığı düşünülmektedir (Jaarsveld ve ark, 2002).

2.2.1. Geopolimerlerin dezavantajları

Geopolimerler geleneksel çimentoya göre bazı yönlerden avantajlara sahip olsa da, uzun bakım süresi ve yavaş mukavemet gelişimi geopolimerlerin pratik uygulamaları için ana sınırlayıcı faktörler haline gelmiştir. Geopolimerizasyon sürecinin teşviki için en yaygın strateji, geleneksel termal kürlemeyi (örneğin su, hava ve fırın kürleme) kullanmaktır. Çalışmalar, etüvde kürlenen geopolimerin erken basınç mukavemetinin hava ve suyla kürlenen geopolimerlerden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ve sıcaklığın artırılmasının geopolimerlerin mukavemetini artıracaklarını göstermiştir (Sun ve ark, 2021). Davidovits, geopolimer karışımı sırasında gerçekleşen reaksiyonların ekzotermik nitelikte olup ve bu reaksiyonların ısı kürüne tabi tutulduğunda çok daha hızlı gerçekleştiğini belirtmiştir. Özellikle 120 °C sıcaklıkta uygulanan kür işlemi ile geopolimer bağlayıcının yaklaşık 2 dakika içerisinde sertleştiğini ifade etmiştir. Kür işlemi; sıcaklık, süre ve ortam koşullarına bağlı olarak farklı şekillerde uygulanabilmekte olup, bu parametreler geopolimerin nihai özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Nitekim, kür sıcaklıkları genellikle 60–90 °C aralığında uygulanabilmekle birlikte, laboratuvar ortam koşullarında, yani oda sıcaklığında da sertleşerek dayanım kazanabilen geopolimer betonların üretimi mümkündür. Bu durum, geopolimer sistemlerin farklı çevresel ve uygulama koşullarına uyum sağlayabilme potansiyelini ortaya koymakta ve pratik uygulamadaki esnekliğini artırmaktadır. Ancak sıcaklık, ekzotermik reaksiyonları hızlandırarak geopolimerizasyon sürecinin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktadır. Bu sayede istenen mekanik ve fiziksel özellikler, daha kısa kür sürelerinde elde edilebilmektedir. Yüksek sıcaklığın hız kazandıran olumlu etkisi sayesinde, bağlayıcı malzemelerde ki mevcut silika (SiO_2) ve alümina (Al_2O_3) esaslı oksitler, alkali aktivatör çözeltileri ile kimyasal reaksiyona girerek üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturan –Si–O–Al– bağlarının meydana gelmesine olanak sağlar. Bu bağlar, geopolimer matrisinin dayanım ve stabilitesinin temelini oluşturmaktadır (Karagöl, 2022). Kürleme sıcaklığı geopolimerin ekzotermik reaksiyonunda önemli bir rol oynar (Helmy, 2016). Aynı zamanda beton endüstrisinde geopolimerin yerinde kullanımındaki en büyük engeli de temsil eder. Yüksek sıcaklık, reaksiyon hızlandırıcı görevi görür ve geopolimerin mukavemet kazanma oranını ve nihai basınç dayanımını etkiler. Çok sayıda

araştırma çalışması tarafından farklı kürleme yöntemleri araştırılmıştır. Yüksek kürleme sıcaklığının ve daha uzun kürleme süresinin, daha yüksek basınç dayanımı ve yüksek mukavemet oranı kazandırdığı sonucuna varılmıştır.

2.2.2. Geopolimerlerin Portland çimentosu ile karşılaştırılması

Tablo 2.1. Portland çimentosuyla karşılaştırıldığında geopolimerlerin üstün özellikleri (Sun ve ark, 2021)

Özellikler	Geopolimer	Portland çimentosu
Mekanik dayanıklılık	$[Si-O-Al-O]_n$ çerçevesi üç boyutlu bir ağı dayalı	Düşük güçlü kimyasal bağlara dayalı (örneğin, Van der Waals bağı ve hidrojen bağı)
Ortam direnci	Silisyum alüminyum tetrahedronlardan oluşan kapalı kafes boşluğuna benzer bir halka-zincir yapısına dayanan, çeşitli ekstrem ortamlara karşı daha güçlü dirence sahip.	Zeolit benzeri mineraller içermez, çeşitli ekstrem ortamlara karşı direnci nispeten düşüktür.
Asit veya ısıya dayanıklılık	Si-O ve Al-O bağları hidroflorik asit haricinde diğer asitlerle nadiren reaksiyona girer.	Çimento, pH değeri 12'den büyük olan, asitlerle kolayca aşınabilen bir tür alkali maddedir.
Arayüz yapışması	Geopolimer, agregalarla yakın temas sağlayarak, ara yüzeylerde sıkı bağlar oluşturabilir.	Geleneksel çimento ile agrega ara yüzeyi arasında her zaman kristal geçiş bölgesi bulunur ve bu da ara yüzey bağlama kuvvetinin dengesizliğine yol açar.
Hammadde kaynakları	Geopolimer hammadde araştırmaları kaolin minerallerinden başlayarak, daha sonra endüstriyel atıklardan elde edilen, kolay bulunabilen, ucuz ve çevresel faydaları da ortada olan malzemelere yönelmiştir.	Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler çoğunlukla klinker, alçıtaşı ve karışık malzemelerden (kükürttten arındırılmış alçıtaşı, endüstriyel atık artıkları vb.) oluşmaktadır.

Tablo 2.1. Devamı

Kaynak tüketimi ve karbondioksit emisyonları	Geopolimerlerin üretimi %80 oranında enerji tasarrufu sağlayabilir ve karbondioksit emisyonlarını yaklaşık %50-%80 oranında azaltabilir.	Çimento üretimi, küresel insan kaynaklı CO ₂ emisyonlarının %10' una kadarını oluşturmaktadır.
--	--	---

Olivia ve Nikraz (2012), uçucu kül ile hazırlanan geopolimer harçların, deniz suyu ortamında mekanik özelliklerini incelemek üzere agrega içeriği, alkali çözelti/uçucu kül oranı, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve kürlleme yönteminin etkilerini de göz önünde bulundurularak bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, 28 günlük kür süresi sonunda geopolimer betonun 55 MPa basınç dayanımına ulaşabileceğini ortaya koymuştur. Portland çimentosuna göre daha yüksek çekme ve eğilme dayanımı gözlemlenirken, elastisite modülünde daha düşük sonuçlar elde etmişlerdir. Tüm karışımların basınç dayanımı ıslak ve kuru ortamda farklı sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak ürettikleri geopolimer betonların, portland çimentosuna kıyasla deniz suyuna maruz kalan ortamlarda mekanik özellikleri açısından daha iyi sonuçlar elde ettiklerini tespit etmişlerdir.

2.2.3. Geopolimerlerin kullanım alanları

Geopolimerler, sahip oldukları üstün fiziksel ve kimyasal özellikler sayesinde birçok farklı alanda kullanım potansiyeline sahiptir (Davidovits, 2008). Bu kullanım alanları arasında prefabrik yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı elemanları, heykelcilik ve dekoratif sanatlar, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme çalışmaları, zehirli ve nükleer atıkların güvenli depolanması, refrakter seramik üretimi, ağır iklim koşullarına ve yangına dayanıklı duvar kaplamaları üretimi, yapı güçlendirme uygulamaları, tarihi yapıların restorasyonu, ayrıca uçak ve yarış arabası endüstrileri ile nükleer santraller yer almaktadır. Kullanılan teknolojinin gelişmişlik düzeyi, kimyasal bileşenlerin oranları ve toprak esaslı hammaddelere uygulanan fiziksel iyileştirmeler sayesinde, geopolimerlere istenilen fiziksel özellikler kazandırılabilir.

Alkali aktivasyonlu ve alkali bağlayıcı malzemeler, geniş bir uygulama sahasına sahip olup inşaat ve mühendislik sektörlerinde farklı alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu malzemeler inşaat ve mühendislik sektörlerinde yapısal beton üretimi, duvar blokları, kaldırım elemanları, beton boruları, elektrik direkleri, gaz betonları, yüksek sıcaklığa dayanıklı betonlar, petrol kuyusu dolgu işlemleri, tehlikeli ve radyoaktif atıkların

depolanma alanındaki betonlar, sulama sistemleri, kıyı ve liman yapılarında dalgakıran elemanları, prefabrik yapı elemanları ile bina inşaatları, döşeme ve temel uygulamaları gibi alanlarda kullanılmaktadır (Güzelküçük ve Demir, 2019).

2.2.4. Geopolimer molekül yapısını ve kimyasal bileşenlerini değerlendirmekte kullanılan ışın deneyleri

Maden moleküllerinin uzay kafes yapıları, gelişmiş teknolojiye nükleer ve optik ışın cihazları aracılığıyla incelenebilmektedir (Zeybek, 2009). Malzeme molekülleri veya atomları arasındaki mesafe, atomların ya da iyonların enerji düzeylerine bağlı olarak değişmekte olup genellikle 10^{-10} ile 10^{-9} metre aralığındadır. Bu uzaklıklar sırasıyla Ångström (Å) ve nanometre (nm) gibi SI birimleriyle ifade edilmektedir. Moleküller arası mesafelerin ve dizilimlerin analizinde genellikle geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi yüksek çözünürlüklü görüntüleme cihazları kullanılmaktadır.

SEM cihazı, örnek üzerine gönderdiği elektron demetlerinin malzeme içinden geçmesini ve bu demetlerin mercekle kırılarak floresan bir perdeye odaklanmasını sağlar (Zeybek, 2009). Bu sayede malzemenin yüzeyi yaklaşık $\times 10.000$ ile $\times 100.000$ arasında büyütülerek görüntülenebilir. Bu görüntüler aracılığıyla, atom ya da moleküllerin dizilimi, kristal kusurları ve gözenek yapıları ayrıntılı bir şekilde değerlendirilebilmektedir. Özellikle doğal kayalar ve madenler üzerinde yapılan çalışmalarda, SEM sayesinde detaylı petrografik verilere ulaşılabilmektedir. Ayrıca, geopolimerler gibi amorf ya da yarı-kristal özellik gösteren malzemelerin düzensiz dizilimleri de SEM ile incelenerek yapısal özellikleri ortaya konulabilmektedir.

X-ışını difraksiyonu (XRD) yöntemi, bir malzemenin kristal yapısını belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir analiz tekniğidir (Provis ve ark., 2007). Bu yöntem, gönderilen X-ışınlarının malzeme içerisindeki atomik düzlemlerden yansıma ve kırınım davranışlarını analiz ederek, yapının kristalin veya amorf olup olmadığına dair bilgi sağlar. Özellikle geopolimer malzemelerde, XRD uygulaması sayesinde başlangıçtaki hammaddelerin kristal yapısından amorf yapıya dönüşüm süreci izlenebilmektedir. XRD testi sırasında, X-ışınları numune üzerine belirli bir açıyla gönderilir ve yapının içsel atomik düzlemleri tarafından difraksiyona uğrayan ışınların yansımaları kaydedilir. Bu yansımalar kullanılarak difraktogram adı verilen grafiksel bir sonuç elde edilir. Bu grafik, belirli açılarda oluşan tepe noktaları sayesinde malzemenin içerdiği kristal fazları tanımlamaya, tepe

yoğunluğunun azalması veya genişlemesi ise amorf yapının varlığını yorumlamaya olanak tanır. Doğal ve yapay taşlar da dâhil olmak üzere, XRD yöntemi sayesinde birçok farklı malzemenin mineralojik yapısı ve faz içeriği hakkında detaylı bilgiler elde edilebilmektedir.

Geopolimer, zeolit ve çeşitli kil türlerinin yapısal analizinde Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) yöntemi sıkça kullanılmaktadır (Zeybek, 2009). Bu yöntem, malzeme yapısına gönderilen kızılötesi ışınların farklı bağlar tarafından emilimini değerlendirerek, moleküler düzeyde bağ yapılarına dair bilgi verir. Özellikle Si-O, Al-O ve Si-O-Al bağlarının varlığı ve bu bağlara ait titreşim frekansları sayesinde, bu yapıların kristal ya da amorf çerçeve yapıları hakkında yorum yapılabilir. FTIR analizi, geopolimer matris içerisindeki yapısal değişiklikleri izlemek ve oluşan bağların türünü belirlemek açısından oldukça etkili bir tekniktir. Spektrum üzerinde belirli dalga boylarında gözlenen karakteristik pikler, özellikle alüminosilikat yapının oluşum düzeyi, polimerleşme derecesi ve çevresel koşulların bağ yapılarına etkisi gibi konularda önemli veriler sunmaktadır.

2.2.5. Geopolimer üretiminde kullanılan alkali aktivatörler

Aktivatör, kimyasal reaksiyonun mekanizmasını değiştirmeden, aynı zamanda reaksiyon hızını artıran madde olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, aktivatör; bir bileşiği, reaksiyonun sonucunu etkilemeden, istenilen reaksiyon hızına ulaştıran kimyasal bir bileşendir. Günümüze kadar yapılan birçok çalışma, yüksek bağlayıcılık özellikleri nedeniyle cürufaların alkali aktivasyonu üzerine odaklanmıştır. Bu bağlamda, Portland çimento klinkeri kullanılmadan yalnızca cüruf ve alkali bileşenlerle çimento üretimi, hem maliyet açısından daha avantajlı hem de çevresel etkiler açısından daha sürdürülebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Sağlık, 2009).

Geopolimerizasyon sürecinde kullanılabilen birkaç tip alkali aktivatör vardır. Örneğin bunlar alkali sodyum silikat (Na_2SiO_3), potasyum silikat (K_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) olarak çeşitlendirilir (Soares ve ark, 2021). NaOH ve Na_2SiO_3 ' ün birlikte kullanılması, yalnızca alkali silikat veya hidroksit kullanımından daha iyi basınç dayanımına sahip geopolimer üretmek için, maliyet uygunluğu açısından en yaygın kullanılan uygulamadır (Leong ve ark, 2016).

Na_2SiO_3 oldukça viskoz bir alkali olduğundan ötürü, oran arttırıldığında karışımın viskozitesini artırarak işlenebilirliği azaltır. Tam tersi olarak, NaOH veya KOH'un sıvı benzeri bir yapısı olduğu için işlenebilirliği artırır (Leong ve ark, 2016).

Bakharev ve ark., (1999), Avustralya' da yapılan bir çalışmada, cüruf esaslı çimentoların alkali aktivasyonunu incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, basınç dayanımı açısından sıvı sodyum silikatın, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat gibi diğer aktivatörlere kıyasla daha etkili bir aktivasyon sağladığı belirlenmiştir. Özellikle, 0,75 oranında $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranına ve %4 sodyum konsantrasyonuna sahip sodyum silikatın, alkali ile aktive edilmiş cüruf esaslı betonların üretiminde kullanımını önermişlerdir.

Atiş ve ark., (2009) yapmış oldukları çalışmada Portland çimentosu (PC) içermeyen bir harç üretmek için alkali aktive edilmiş öğütülmüş cürufu kullanmanın uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada üç farklı aktivatör tipi kullanmışlardır. Bunlar; sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum karbonattır. Alkali aktive edilmiş cüruf harcının basınç ve eğilme çekme dayanımı 7 günlük, 28 günlük ve 3 aylık olacak şekilde ve harcın kuruma rötresi 6 ay olacak şekilde ölçülmüştür. Alkali aktive edilmiş cüruf harcının ve PC harcının priz süreleri de ölçülmüştür. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile alkali aktive edilmiş cüruf harçlarının priz başlangıç ve bitiş süreleri PC' ye göre daha erken, sodyum karbonat ile aktive edilmiş harçların ise PC ile aynı olduğu sonucuna varmışlardır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksitle aktive edilmiş cüruf harçlarının, sodyum karbonat ve PC harçlarından daha gevrek olduğunu tespit etmişlerdir.

2.2.5.1. Sodyum silikat

Sodyum silikat, genel formülü $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$ olan kimyasal bileşiklerin ortak adıdır (Mahmut, 2015). Bu bileşikler arasında en yaygın olanı Na_2SiO_3 formülüne sahip sodyum metasilikattır. "Su camı" veya "sıvı cam" olarak da bilinen sodyum silikatlar, hem sulu çözelti halinde hem de katı formda çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Saf halleri genellikle renksiz ya da beyaz renkte olan bu bileşikler; çimento üretimi, pasif yangın koruma sistemleri, tekstil sanayi, kereste işleme, refrakter malzeme üretimi, otomotiv sektörü ve daha birçok endüstriyel alanda yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Yapılan arkeolojik ve bilimsel araştırmalar, alkali silikatların Eski Mısır'da M.Ö. 3600 yıllarında bağlayıcı malzeme olarak kullanıldığını ortaya koymuştur (Davidovits, 2008). Bu dönemde, özellikle mezar heykelleri ile seramik yapımında alkali silikat esaslı bileşiklerin tercih

edildiği, bu malzemelerin erken dönem inorganik bağlayıcılar arasında yer aldığı anlaşılmaktadır. Bu bulgular, geopolimer teknolojisinin temellerinin antik çağlara kadar uzandığını göstermektedir.

2.2.5.2. Sodyum silikatların sınıflandırılması

Sodyum silikat bileşikleri, içerdikleri $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranına göre sınıflandırılmaktadır (Zeybek, 2009). Bu molar oran, bileşiğin yapısını ve kullanım alanlarını belirleyici bir parametredir. Örneğin, molar oranı 0,5 olan sodyum ortosilikat, Na_4SiO_4 formülüne sahiptir. Ticari olarak en yaygın üretilen bileşiklerden biri ise, molar oranı 2 olan sodyum disilikattır ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$). Geopolimer sentezlerinde sıklıkla kullanılan sodyum metasilikat (Na_2SiO_3) ise molar oranı yaklaşık 1 olan bir bileşiktir. Bu oran, silikatın çözeltideki davranışını, çözünürlüğünü ve bağlayıcı özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

Geopolimer sentezinde kullanılan alkali silikatların çözünürlüğü, kullanılan bazın türüne yani sodyum ve potasyum (Na veya K) ve $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Zeybek, 2009). Suda çözünürlük, geopolimerizasyon reaksiyonlarının verimliliği açısından kritik bir parametredir. Yapılan nükleer manyetik rezonans (NMR) analizlerine göre, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ molar oranı 3 olan sodyum bazlı camın, 60 °C sıcaklıkta 48 saat sonunda yaklaşık %50 oranında çözündüğü belirlenmiştir. Buna karşılık, K bazlı ve molar oranı 2,5 olan camın aynı koşullarda %100 oranında suda çözündüğü gözlemlenmiştir. Bu durum, potasyum bazlı sistemlerde kuvarsın tamamen alkali silikata dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, potasyum bazlı alkali silikatların kullanımı, geopolimer pastasının reaktivitesini artırmakta ve nihai ürünün mikroyapısal özelliklerini iyileştirmektedir.

2.2.5.3. Sodyum hidroksit

Sodyum hidroksit (NaOH), beyaz renkli, higroskopik (nem çekici) özelliklere sahip bir kimyasal bileşiktir (Mahmut, 2015). Suda kolaylıkla çözünerek kaygan, sabunumsu bir his veren alkalın özellikte bir çözelti oluşturur. Cilde temas ettiğinde tahriş edici etkiler gösterebilir. Laboratuvar ortamlarında özellikle karbondioksit (CO_2) gibi asidik gazların absorpsiyonunda kullanılır. Endüstriyel uygulamalarda ise sodyum hidroksit; yapay ipek, sabun, kağıt, boya, deterjan üretimi ve petrol rafinasyon süreçlerinde yaygın olarak

kullanılmaktadır. Güçlü bir baz olan sodyum hidroksit, su ile reaksiyona girdiğinde yaklaşık 5 dakika içinde sıcaklığı 50 °C'ye kadar yükseltir ve bu sıcaklık yaklaşık 15 dakika boyunca korunur. İnşaat laboratuvarlarında da organik madde tayini gibi analizlerde sıklıkla kullanılmaktadır.

2.3. Puzolan Malzemelerin Tanımı

Puzolanlar, tek başlarına bağlayıcılık özelliği göstermeyen veya çok düşük bağlayıcılığa sahip olan, ancak ince taneli halde ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girdiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Yadollahi ve ark., 2014). Puzolanların bileşiminde yüksek oranda silis (SiO_2) ve alümin (Al_2O_3) bulunmasının yanı sıra, az miktarda demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon da yer alabilir. Puzolanlar genel olarak iki grupta sınıflandırılmaktadır:

- Doğal puzolanlar: Volkanik küller, tüfler, volkanik camlar, ısı işlem görmüş killeri ve diatomlu topraklar gibi doğada doğal olarak bulunan malzemelerdir.
- Yapay puzolanlar: Endüstriyel yan ürünlerden elde edilen bu grupta uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu yer almaktadır.

Puzolanlar içerisinde en eski ve rezerv açısından en zengin olanlar, volkanik tüflerdir (Öksüzer, 2016). Bu malzemeler, yüksek oranda silis içermekte olup yapılarında genellikle zeolit mineralleri barındırmaktadır. Zeolitler; kafes yapısında alüminyum, silisyum ve oksijen elementlerini, gözenekli yapılarında ise alkali veya toprak alkali metaller ile birlikte su bulunduran mikrogözenekli kristal katılar olarak tanımlanmaktadır.

2.3.1. Silis dumanı

Silisyum metali ve ferro-silisyum alaşımlarının üretimi esnasında, 2000 °C'yi geçen sıcaklıklardaki elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsın indirgenmesi sonucu açığa çıkan endüstriyel yan ürünler silis dumanı olarak adlandırılmaktadır (Gülmez, 2018). Silis dumanı (SD), içerdiği yüksek orandaki reaktif silika sayesinde, alkali bir çözeltiyle reaksiyona girdiğinde yoğun alüminosilikat hidratlı jel oluşumunu teşvik eder. Bu jel yapılar, geopolimer matrisin mikro yapısını iyileştirerek daha kompakt ve daha az boşluklu bir yapı kazandırır. Bu da doğrudan basınç dayanımının artmasına neden olur (Bajpai, 2020). Silis

dumanının ortalama çapı 0,1 mikrondur ve portland çimento parçalarından yüz kat daha küçüktür. Göstermiş olduğu avantajların sebebi, %90 ve üzeri oranlarda yüksek saflıkta kuvars içeren amorf silisyumun varlığından kaynaklanmaktadır (Chishi ve Gautam, 2023). SD, çok ince yapısı ve yüksek silika içermesi sebebiyle, son derece etkili bir puzolanik malzeme olarak kabul edilmektedir. Özellikle betonun bazı özelliklerine olumlu yönde etki sağlaması için katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Örneğin betonun aşınma direnci, aderans ve basınç dayanımı gibi mekanik özelliklerini iyileştirmekle birlikte betonun geçirgenliğini de azaltarak donatıların korozyona karşı direnç sağlamasına katkıda bulunur. Bu özellikleriyle, betonun uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlayarak, yapıların performansını önemli ölçüde iyileştirir (Kaya, 2021).

2.3.2. Uçucu kül

Birçok termoelektrik santrali elektrik üretmek için kömür kullanır. Kömürün yanması önemli miktarda kalıntı, yani uçucu kül üretir. Uçucu küller düşük parçacık boyutuna sahiptir ve yanma gazlarıyla birlikte sürüklenerek hava emisyon kontrol cihazlarında yakalanır. Uçucu külün puzolanik bir malzeme olarak kabul edildiği ve 1950'ler veya 1960'lardan beri betonda kullanıldığı bilinmektedir (Teixeira, 2016). Uçucu kül, kömürle çalışan fırınlarda toz kömürün yanması sonucu oluşan termik santrallerin bir yan ürünüdür. Dünya çapında kömürle çalışan buhar santrallerinde her yıl yaklaşık bir milyar ton uçucu kül üretilmektedir. Uçucu külün büyük üretimi, arazi kullanımının geniş olması ve çevredeki alanlar üzerinde kısa ve uzun vadeli etkilere sahip olması açısından çevresel etkisi herkes için büyük bir endişe kaynağıdır. Bu külü ekolojik olarak hassas bir şekilde ortadan kaldırmanın bir seçeneği, onu yeniden kullanmaktır (Rashad, 2014).

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kristalin ve amorf faz içerikleri ile parçacık boyutu dağılımı, büyük ölçekte kömürün ana kaynağına, yanma sürecindeki sıcaklık ve süre gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Kop ve Yazıcıoğlu, 2023). Kimyasal bileşimdeki bu değişiklikler, uçucu külün alkali aktivatör çözeltilerinde ki çözünme hızını ve buna bağlı olarak gerçekleşen geopolimerizasyon sürecindeki kimyasal reaksiyonunu doğrudan etkilemektedir (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2003). Sınıfsız uçucu küller, çimento ve beton standartlarını karşılamadıkları için bu alanlarda doğrudan kullanım imkanı barındırmamaktadır. Bu nedenle, değerlendirilmeden bertaraf edilen bu tür atıklar, çevre kirliliği açısından önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Binici ve ark, 2012).

Standartlara göre uçucu kül (UK), kimyasal bileşimi ve elde edildiği kömürün kaynağına bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Bitümlü kömürün yakılmasıyla oluşan ve bileşiminde SiO_2 (silisyum oksit), Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve Fe_2O_3 (demir oksit) toplamda %70 veya üzeri olan uçucu küller, F sınıfı uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Öte yandan, yarı bitümlü kömürlerin yakılması sonucu elde edilen ve aynı oksitlerin toplamı %50 ve üstü olan uçucu küller ise C sınıfı uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır. Ek olarak, C sınıfı uçucu küllerin karakteristik özelliği olarak, kalsiyum oksit (CaO) içeriğinin genellikle %10'un üzerinde olduğu belirtilmektedir (Kaya, 2020).

Uçucu kül, bileşiminde yüksek oranda alümina (Al_2O_3) ve silika (SiO_2) içermesinden kaynaklı alkali aktivasyon ile birlikte geopolimerleşme süreci avantajlı hal alır bu nedenle de geopolimer üretiminde kullanılan en yaygın malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir. Uçucu külün avantajları arasında yüksek reaktiviteye sahip oluşu, bol miktarda ve ucuz bir atık malzeme olması, çevre dostu olması, geopolimer bağlayıcıların mekanik ve kimyasal dayanımını artırması, çimento kullanımını azaltarak CO_2 salınımını düşürmeye katkı sağlaması gibi özelliklerini sıralayabiliriz. Bu nedenlerle uçucu kül, hem ekonomik hem de çevresel açılardan geopolimer teknolojisinin temel taşlarından biri olarak öne çıkar (Papadakis, 2000). Termik santrallerin atığı olan uçucu kül (UK), geopolimer üretiminde hammadde kaynağı olarak yoğun bir şekilde talep görmektedir. Ancak ilerleyen zamanlarda santrallerin enerji üretiminde kömür kullanımını azaltmasıyla birlikte, baca filtrelerinde biriken uçucu küllerin de azalacağı varsayılmaktadır. Bu sebeple, geopolimer beton üretiminde uçucu kül tercih etmek yerine uçucu küllere alternatif olabilecek diğer endüstriyel atıkları değerlendirmek, kaynakların devamlılığı ve verimliliği adına büyük ölçüde önem taşımaktadır (Çelikten ve ark., 2024).

Ülkemizde faaliyet gösteren ve kömürle çalışmakta olan 12 termik santralden, yanma süreci esnasında bir yıl içinde yaklaşık 15 milyon ton uçucu kül (UK) oluşmaktadır. Ülkemizde aktif olarak çalışan santrallerin bilgisi Tablo 2.2'de verilmiştir (Aruntaş, 2006).

Tablo 2.2. Türkiye’de linyit kömürü ile çalışan termik santraller (Aruntaş, 2006)

NO	Santral Adı	Yakıt Cinsi	Kurulu Güç(MW)	Bulunduğu İl
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş

2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
5	Kangal	Linyit	457	Sivas
6	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
7	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
8	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
9	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
10	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
11	Yatağan	Linyit	630	Muğla
12	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

2.3.2.1. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Uçucu külün (UK) fiziksel özellikleri, esasında termik santralde yakılan kömürün cinsi ile uygulanan yanma işleminin yapılış şekline göre farklı özellikler ortaya çıkarmaktadır. Uçucu küllerin rengi genel olarak gridir fakat, içerdiği yanmamış karbon miktarının artması durumunda rengi koyulaşmaktadır. UK, %60 ila %90 oranında camsı bir faza sahip olup, oldukça ince taneciklerden oluşmaktadır. Bu tanecikler genellikle yuvarlak şekilli olup, çapları 1 ile 200 μm arasında değişiklik gösterebilmektedir. Tane çaplarının boyutu yaklaşık olarak %75'i 45 μm 'den, %50'sinden fazlası ise 20 μm 'den daha küçüktür. UK'nın yoğunluğu yaklaşık olarak 2.2–2.7 g/cm^3 değer aralığında olup, özgül yüzeyi çimentoya benzer şekilde olmasından kaynaklı tekrardan öğütme işlemine tabi tutulmadan da kullanılabilme potansiyeline sahiptir (Aruntaş, 2006). Uçucu külün incelik modülü, ilk olarak kazana atılan kömürün öğütülme şekline bağlıdır (Güler ve ark, 2005). İkinci olarak, külün inceliğini etkileyen bir diğer önemli faktör ise, bacadan kaçan parçacıkların mümkün olduğunca tutulmasıdır. Bacadan dışarı kaçan kül miktarı azaldıkça, elde edilen uçucu külün inceliği artmaktadır. Uçucu kül, baca içerisine giren ve boyutları 0,5 ila 150 mikrometre arasında değişen ince parçacıkları içermektedir (Aruntaş, 2006).

2.3.2.2. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal yapısına bakıldığında, temel olarak silika (SiO_2), demir oksit (Fe_2O_3) ve magnezyum oksit (MgO) bileşiklerinden oluştuğu görülmektedir (Güler ve ark., 2005). İçerdiği karbon miktarı ise kullanılan kömür tipine ve yakma işleminin

özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ayrıca bazı uçucu küller, tercih edilen kömürün cinsine göre önemli miktarda CaO da içerebilmektedir. Uçucu kül, kireç ve suyun bir arada bulunduğu ortamlarda reaktif bir davranış sergilemektedir (Girgin, 2016). Bu reaktivite, yüksek olasılıkla uçucu külün camsı özelliğine dayanmaktadır. Literatürde, uçucu kül içerisinde yer alan camsı yapının oranının %50 ile %90 arasında değiştiği belirtilmektedir. İnce tane boyutu ve amorf mineralojik yapısı nedeniyle uçucu kül, doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedir. Bu özellik sayesinde, kalsiyum hidroksit ile sulu ortamda reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık kazanmaktadır. Bu sebeple uçucu kül hem Portland çimento üretiminde, hem de beton karışımlarına ilaveten katkı malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanımı tercih edilmektedir. Uçucu külün özellikle beton teknolojisinde, katkı malzemesi olarak kullanımı, çimento miktarının %15 ila %50'si arasında değişiklik gösterebilmektedir.

2.3.2.2. Uçucu külün mevcut kullanım alanları

Uçucu kül, bilhassa yapı ve mühendislik alanlarında geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir (Zeybek, 2009). Puzolanik bir malzeme olması ve tek boyutlu küresel tanecik yapısı nedeniyle inşaat sektöründe seçilen bir yapı malzemesi olarak öne çıkmaktadır. Karayolu ve demiryolu inşaat alanlarında, donatılı zemin duvarlarında ve dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Uçucu külün siltli yani çok ince tanecik yapısı sıkışma açısından elverişli bir yapı sunarken, inceliği sayesinde donma-çözülme etkilerine karşı da yüksek dayanım göstermektedir. Uçucu külün sahip olduğu özelliklerinden faydalanılarak, stabilize karayolu yapımında C tipi uçucu kül ve su ile hazırlanan karışım, grouting yöntemiyle kaba agregalar arasında uygulanmakta; böylece daha iyi sıkışmış ve dayanıklı bir stabilize zemin elde edilmektedir. Uçucu külün karayolu inşaatındaki bir diğer önemli kullanım alanı ise asfalt betonu üretimidir. Tek tip, ince ve küresel tanecik boyutuna sahip olması, asfalt beton gradasyon tasarımında dolgu malzeme olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır. Filler malzeme olarak kullanıldığında, agregalar arasındaki ince boşlukları doldurarak asfaltın agrega ile olan aderansını artırmakta, bu da özellikle aşınma tabakasında soyulmaları ve tekerlek izi oluşumlarını azaltmaktadır. Böylece asfalt kaplamanın dayanıklılığı ve servis ömrü artmaktadır. Ayrıca, silindirle sıkıştırılmış baraj betonlarında da uçucu kül yoğun olarak kullanılmakta olup, beton hacminin %60–70'ine kadar olan kısmını oluşturabilmektedir. Bu uygulama “Pozzocrete” olarak adlandırılmakta ve uçucu külün

küresel taneli yapısı sayesinde betonun işlenebilirliği ile sıkışabilirliğinin artması nedeniyle tercih edilmektedir.

Çeşitli ülkelerde uçucu külün önemli miktarlarda kullanılmaya başlanması, özellikle baraj inşaatlarında betonun hidratasyon ısını düşürme amacıyla olmuştur (Pelin ve ark, 2009). Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'nde uçucu kül ilk kez 1940'lı yıllarda Hoover ve ardından Hungry Horse Barajı inşaatlarında kullanılmıştır. Türkiye'de ise bu malzemenin kullanımı 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk Barajı projelerinde gündeme gelmiştir. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün bu baraj uygulamalarının yanı sıra, Karayolları Genel Müdürlüğü de bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amaçlı uçucu kül kullanımı gerçekleştirmiştir. Ancak bu dönemde uçucu kül katkılı çimento üretimi oldukça sınırlı kalmış; katkılı çimentolarda da yalnızca kısıtlı oranlarda kullanılmıştır. Uzun yıllar boyunca uçucu kül kullanımı, bu sınırlı uygulamalarla devam etmiş ve yıllık üretilen miktarın %1'ine dahi ulaşamamıştır. Ancak son yıllarda, özellikle hazır beton endüstrisinin gelişimi ve Avrupa Birliği uyum süreci kapsamında benimsenen yeni çimento ve beton standartları, çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır.

2.4. İnşaat Yıkıntı Atığı

İnşaat sektörünün hızla ilerleyen teknolojik gelişmeleri ve sektörün aktif faaliyetlerindeki artış, miktarca fazla yıkıntı atığını da beraberinde getirmektedir. Yapıların inşası, bakımı ve yıkımı süreçlerinden açığa çıkan tüm malzemeler inşaat yıkıntı atıkları dahilindedir. Küresel ölçek değerlendirmelerine bakıldığında, yalnızca inşaat sektörünün payına düşen yıkıntı atığı miktarı yılda 10 milyar tondan fazla olması sebebiyle önemli bir atık kaynağı haline gelmiştir (Alakara, 2022). Bunların yaklaşık 700 milyon tonu ABD'de üretiliyor, Avrupa Birliği'nde 800 milyon tonun üzerinde ve Çin yaklaşık 2300 ton inşaat yıkıntı atığı üretmektedir. Bu miktar toplam kentsel atıkların %40'ına karşılık gelmektedir. Dolayısıyla İYA en geniş kapsamlı atık malzemelerden biri olarak kabul görmektedir. Genel olarak inşaat yıkım atıkları yenileme veya yıkım faaliyetleri sırasında boşa giden yapı malzemelerini ifade eder. İnşaat yıkıntı atıklarının çoğu geri dönüştürülebilirdir. Öte yandan inşaat yıkıntı atıklarının küçük bir kısmı, insanlar ve çevre üzerinde olumsuz etkilere yol açan tehlikeli bileşenler içerebilir. Bu nedenle inşaat yıkıntı atıklarını en aza indirmek ve çevre üzerindeki etkilerini azaltmak için çalışmalar yapılmaktadır (Wu ve ark., 2019).

2.5. Mermer

Mermer, adını günümüzden yaklaşık 2000 yıl önce antik dönemde mermer işletmeciliğinin başladığı yer olarak bilinen Marmara Adası'nın sessiz harflerden oluşmuş şeklinden almıştır (Öksüzer, 2016). Zaman içerisinde birçok medeniyetin inşasında ve bir kültür unsuru olarak gelişiminde önemli rol oynamış bir yapı malzemesidir. Mermer kavramı, geniş bir sınıfı kapsamakla birlikte, genellikle bilimsel ve ticari olmak üzere iki farklı şekilde tanımlanmaktadır. Bilimsel tanımda mermer; başkalaşım (metamorfizma) sürecinden geçmiş ve bu sürecin izlerini taşıyan, kalker veya dolomit gibi karbonat bileşimli kayalar olarak ifade edilmektedir. Bileşiminin %90-98'i kalsiyum karbonattan (CaCO_3) meydana gelmektedir. Ayrıca düşük oranda magnezyum karbonat (MgCO_3) da içermektedir. CaCO_3 kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral kalsittir. Bununla birlikte az miktarda silika, feldispat, demir oksit, mika, florin ve bazı organik maddeler de bulunabilmektedir (Sağlam, 2012).

Dünya genelinde ve Türkiye'de mermer talebi sürekli artmakta olup, mermer sektörü giderek daha cazip bir yatırım ve üretim alanı haline gelmektedir (Kabirova ve ark., 2020). Mermer kullanımındaki artışın başlıca nedenleri arasında; doğal desenlere sahip olması, estetik ve çevreyle uyumlu yapısı, sağlıklı ve zamana karşı dayanıklı oluşu, geri dönüştürülebilirliği ve farklı mekanlara estetik bir uyum sağlayabilecek çeşitliliğe sahip olması sayılabilir. Ayrıca, mermer artıklarının çeşitli alanlarda değerlendirilebilmesi, bu talebi destekleyen unsurlar arasındadır. Bu doğrultuda, önümüzdeki yıllarda mermer üretiminin artarak devam etmesi öngörülmektedir.

Dünya genelindeki mermer rezervleri incelendiğinde; kristalize kireçtaşlarının, Alp Kuşağı boyunca Ege Adaları, Türkiye, İran, Pakistan ve Hindistan'dan Çin'e kadar uzanan, jeolojik olarak benzer yapıya sahip geniş bir alanda bulunduğu görülmektedir (Ceylan, 2000). Bunun yanı sıra, metamorfik masifler içerisinde oluşan mermer yatakları ile magmatik kökenli kayalara bağlı mermer oluşumları Kanada, İsveç, Türkiye, Ural Dağları-Sibirya, Güney Afrika, Güney Amerika ve Avustralya gibi bölgelerde de yaygın olarak gözlemlenmektedir. Dünya genelinde üretilen mermerin neredeyse tamamı tüketilmekte olup, önemli bir stok birikimi söz konusu değildir. Bu nedenle, küresel ölçekte mermer üretim miktarı ile tüketim miktarının birbirine eşit kabul edilmesi, önemli bir sapma oluşturmayacaktır. Dünya'da 1990 ve 2020 yılında mermerin en çok tüketildiği alanlar Tablo 2.3' te verilmiştir.

Tablo 2.3. Dünya’da 1990 ve 2020 yılında mermerin en çok tüketildiği alanlar (Ceylan, 2000)

Tüketim Alanı	1990 (%)	2020 (%)
Yer döşemesi	34.4	35.0
Dış cephe kaplaması	20.3	8.0
Mezartası, Heykelcilik	15.6	18.0
Yapı elemanları	9.4	7.0
Merdiven/Basamak/Rıht	6.3	3.0
İç cephe kaplaması	4.7	9.0
Eşya, özel kullanım ve diğer	9.3	20.0

Türkiye’nin görünür doğal taş rezerv toplamının yaklaşık 13,9 milyar ton civarında olduğu tahmin edilmektedir (Demir ve Başpınar, 2003). Bu rezervlerin önemli bir kısmı Afyon, Balıkesir, Muğla, Eskişehir, Denizli, Tokat, Çanakkale, Konya, Bilecik, Kırşehir ve Elazığ illerinde yoğunlaşmaktadır. Türkiye’de üretilen başlıca mermer çeşitleri arasında Afyon Beyazı, Bilecik Pembesi, Marmara Beyazı, Mustafa Kemalpaşa Beyazı, Karacabey Siyahı, Elazığ Vişnesi, Denizli Traverteni ve Trakya Graniti yer almaktadır. Ülke genelinde mermer üretim faaliyetleri yürüten yaklaşık 20 entegre tesis, 40 orta ölçekli işletme ve 1500 civarında küçük ölçekli atölye ile yılda ortalama 1,2 milyon ton mermer işlendiği bilinmektedir.

2.5.1. Atık mermer tozu

Atık mermer tozu (MT), mermer işleme tesislerinde blok ve plakaların kesimi sırasında oluşan en küçük boyutlu mermer atıklarını ifade etmektedir (Ünal ve Uygunoğlu, 2004). Bu taneciklerin büyük bir kısmı 1 mm’nin altındaki boyutlara sahiptir. Kesme işleminin suyla yapılması sebebiyle bu atıklar doğrudan suya karışmakta ve fosfojips halinde çöktürme havuzlarında ya da arıtma tesislerinde kek formunda depolanmaktadır. Bu atıklar, çeşitli özelliklere sahip mermer tozlarıyla birlikte kesim esnasında karışan yabancı maddeleri de içermektedir.

Ülkemizde işlenen mermerlerin yaklaşık %30’u üretim artığı olarak ortaya çıkmaktadır (Kabirova ve ark., 2020). Yıllık ortalama 2.800.000 ton mermer bloğunun işlendiği göz önünde bulundurulduğunda, yaklaşık 660.000 ton mermer tozunun herhangi bir değerlendirme sürecine tabi tutulmadan atık olarak ayrıldığı söylenebilir.

Dünya genelinde, mermerin ocaktan çıkarılmasından işlenmiş nihai ürün olarak piyasaya sunulmasına kadar geçen süreçte, farklı aşamalarda çeşitli boyut ve nitelikte atıklar oluşmaktadır (Ceylan, 2000). Ortaya çıkan atık miktarı ve özellikleri, mermerin kullanım amacına göre fabrikalarda maruz kaldığı işlem türlerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Mermerin yoğun olarak tüketildiği alanlarda atık oranı yaklaşık %40 seviyelerinde seyrederken, özel kullanım alanlarında bu oran %60'a kadar ulaşabilmektedir. Söz konusu atıklar hem toz hem de iri parçalar şeklinde oluşabilmektedir.

Mermer üretiminde kullanılan patlayıcılarla delme ve kamalama gibi geleneksel yöntemlerin uygulandığı ocaklarda, genellikle iri boyutlu parça atıklar oluşmaktadır (Ceylan, 2000). Ayrıca, ocak sahalarında yapısal süreksizlikler nedeniyle bütünlük arz etmeyen ve blok olarak değerlendirilemeyen büyük boyutlu mermer kütleleri, ekonomik değer taşımadıkları gerekçesiyle çoğunlukla atıl durumda bırakılmaktadır. Mermer fabrikalarında ise; kesim, silme ve cilalama işlemleri sırasında boyutu 2 mm'nin altında olan ve "toz atık" olarak adlandırılan ince tanecikli atıklar meydana gelmektedir (Çınar, 2019). Bunun yanı sıra, köprü kesme, mantolama, baş kesme ve levha ebatlama makinelerinde yapılan işlemler sonucu alt ve yan kısımlarda oluşan, parça atık olarak nitelendirilen ve teknik olarak yeniden değerlendirilebilecek nitelikte olan atıklar da ortaya çıkmaktadır. Mermer atıkları toplam atık miktarına oranlanırsa %75'e varan miktarlar elde edilebilmektedir. Bu atıkların olumlu koşullar altında bertaraf edilememesi, özellikle ince toz hali ile çevreye salınması ve su kaynaklarına karışmış olma durumunda ciddi çevresel sorunlara davetiye çıkarabilme potansiyeline sahiptir. Bahse konu olan mermer atıkları, hava kalitesini olumsuz etkileyebilmekte ve insan sağlığı üzerinde zararlı etkiler oluşturabilmektedir. Uzun vadede düşünüldüğünde ise tarım arazilerini kaplayıp, toprağa karışarak toprak kalitesini düşürdüğü gibi tarımsal üretime de zarar vermektedir.

2.6. Literatür Taraması

Sevinç (2021), yüksek oranda kalsiyum oksit içeren ve iki farklı tane boyutuna sahip Afşin-Elbistan uçucu külünün, geopolimer harç üretiminde hammadde olarak değerlendirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışma kapsamında sodyum silikat/sodyum hidroksit ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) oranlarını 1 ve 1,5, NaOH molaritelerini 10 M ve 14 M, kür sıcaklıklarını ise 24 saat boyunca 60 °C ve 90 °C olarak belirlemiştir. Elde ettiği sonuçlara göre, öğütülmüş uçucu kül kullanımı, geopolimer harçların hem taze

hem de sertleşmiş hallerindeki birim hacim ağırlıklarında bir miktar artış gözlemlemiştir. Bu artışı, öğütme işlemi sonucunda külün özgül ağırlığında meydana gelen yükselmeye bağlamaktadır. Ultrasonik ses hızı ölçümleri, öğütülmüş kül kullanımının yanı sıra artan molarite, SS/SH oranı ve kür sıcaklığının daha yoğun ve boşluksuz bir yapı oluşumunu desteklediğini ve ses hızını arttırdığını tespit etmiştir. Öğütülmüş uçucu kül kullanılan numuneler, öğütülmemiş kül içeren numunelere kıyasla %47 ila %184 oranında daha yüksek basınç dayanımları sergilemiştir. Ayrıca, NaOH molaritesinin, SS/SH oranının ve kür sıcaklığının artması da basınç dayanımında belirgin iyileşmelere yol açmıştır. Bu artışlar X-Işını Difraksiyonu (XRD) ve Termogravimetrik Analiz (TGA) ile desteklenmiştir. Sonuç olarak, düşük oranlarda çimento yerine kullandığı Afşin- Elbistan uçucu külünü, bu çalışmada %100 oranında geopolimer bağlayıcı olarak değerlendirmiş ve 10,3 MPa düzeyinde basınç dayanımı elde etmiştir.

Kaya (2020), bu çalışmada, farklı oranlarda C ve F sınıfı uçucu külleri birlikte kullanarak geopolimer harç numuneleri üretmiştir. Üretimde aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) kullanmıştır. Deneysel sonuçlara göre, NaOH ile aktive edilen numunelerin yayılma tablasındaki yayılma çapı değerlerini, KOH ile aktive edilen numunelere kıyasla daha yüksek bulmuştur. En yüksek birim hacim ağırlık, %60 C sınıfı UK ve %40 F sınıfı UK içeren karışımlardan elde edilen NaOH ile üretilen numunelerde $1,98 \text{ g/cm}^3$, KOH ile üretilenlerde ise $1,95 \text{ g/cm}^3$ olarak ölçmüştür. Mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, NaOH ile aktive edilen C60-F40 kodlu numune en yüksek dayanımı göstermiştir. Bu numunede 28 günlük basınç dayanımı 28 MPa, eğilme dayanımını ise 3,8 MPa olarak tespit etmiştir. Öte yandan, KOH ile aktive edilen aynı oranlı numunede, 13,4 MPa basınç dayanımı ve 2,9 MPa eğilme dayanımı elde etmiştir.

Atabey (2017), alkalilerle aktifleştirilmiş iki farklı F sınıfı uçucu kül ile üretilen geopolimer harçların üretim ve kür parametrelerinin geliştirilmesini sağlamak amacıyla dayanım ve durabilite özelliklerini araştırmak üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, Sugözü ve Çatalağzı Termik Santrallerinden temin edilen uçucu küller, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) çözeltileri ile kimyasal olarak aktive edilmiştir. Deneysel çalışmalarda, alkali aktivatör çözeltisinde sodyum (Na) oranı %6, %9, %12 ve %15 olacak şekilde dört farklı düzeyde belirlemiştir. Isıl kür uygulamaları ise üç farklı sıcaklık seviyesinde (60°C , 80°C ve 100°C) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kürleme sürelerini 3, 6, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat olarak çeşitlendirip, bu parametrelerin geopolimerleşme sürecine etkilerini incelemiştir. Alkali ile aktive edilen Sugözü uçucu külü

geopolimer harçlarının birim hacim ağırlıklarının Çatalağzı geopolimer harçlarına göre, Sugözü uçucu külünün yoğunluğunun Çatalağzı uçucu külünden fazla olmasından dolayı biraz daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Na konsantrasyonundaki artışın, geopolimer harçların birim hacim ağırlıklarının artmasına neden olduğunu tespit etmiştir. Buna karşılık, ısı k r sıcaklığının yükseltilmesi ve k r süresinin uzatılması, harçların birim hacim ağırlıklarında azalmaya yol açmıştır. Bu durum, yüksek sıcaklık ve uzun k r süresi etkisiyle sistem içerisindeki suyun buharlaşarak matris yapısından uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu su kaybı, geopolimer yapının daha gözenekli hale gelmesine neden olarak yoğunluğun düşmesine sebep olmuştur. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) veya sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanımının, geopolimer karışımının kıvamı üzerinde benzer etkiler gösterdiğini belirtmiştir. Bu bağlamda, her iki aktivatör türü ile elde edilen kıvam değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğunu ve kıvam açısından anlamlı bir farklılık oluşturmadıklarını gözlemlemiştir. Sugözü ve Çatalağzı termik santrallerine ait F sınıfı uçucu külleri kullanılarak üretilen geopolimer harçlarda, sodyum hidroksit (NaOH) ile yapılan aktivasyonun, sodyum silikat (Na_2SiO_3) ile yapılan aktivasyona kıyasla daha yüksek basınç dayanımı sağladığını belirtmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, geopolimer numunelerin basınç dayanımı ve durabilite özellikleri bakımından en yüksek performansı, uçucu küllerin %15 Na içeriğine sahip sodyum hidroksit (NaOH)   zeltisi ile aktive edilmesi, 100  C sıcaklıkta ve 24 saatlik ısı k r koşullarında gerçekleştirilmesi ile elde ettiğini belirtmiştir.

şinik (2019), yaptığı çalışmada geopolimer beton numunelerini hazırlarken agregalar, alkali aktifleştiriciler ve uçucu kül kullanmış olup tüm serileri aynı oranlarda hazırlamıştır. Hazırladığı  rnekler incelendiğinde, 8 ve 24 saatlik k r sürelerinde 60  C’de en yüksek görünen porozite ve su emme değerlerine ulaştığını belirtmiştir. Öte yandan, 5 saat k r uygulanan örneklerde en yüksek görünen porozite ve su emme değerlerini 70  C’de tespit etmiştir. Geopolimerlerin boşluklu yapısındaki artış ile tüm k r sürelerinde en düşük birim hacim ağırlık değerleri 60  C’de gözlemlediğini belirtmiştir. Buna karşılık, en yüksek birim hacim ağırlık değerlerini tüm k r sürelerinde 70  C’de elde ettiğini belirtmiştir. Genel olarak değerlendirme yaptığında ise sıcaklık artışının örneklerin geopolimerizasyon mekanizmasını hızlandırdığı, boşluklu yapının azalmasına bağlı olarak görünen porozite ve su emme değerlerinde düşüşlere neden olduğunu belirtmiştir. Bu doğrultuda, 70  C’de k r edilen örneklerin birim hacim ağırlıklarının daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Uğurlu (2020), yapmış olduğu deneysel çalışmada yüksek fırın cürufu esaslı geri dönüştürülmüş agregası (GDA) oranları ve dozaj miktarını farklı oranlarda alarak 15 farklı numune grupları hazırlamıştır. Numunelerde GDA oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığını ancak dozaj miktarının artması ile basınç dayanımının arttığını tespit etmiştir. Aynı zamanda hazırlanan geopolimer beton numunelerde GDA oranı artışıyla birlikte su emme oranında da artış olduğunu gözlemlemiştir. Ancak geopolimer beton numunelerinde dozaj miktarının artışı ile su emme oranında azalma gösterdiğini gözlemlemiştir.

Eryılmaz ve ark., (2023), yapmış oldukları bu çalışmada geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların fiziksel özelliklerini ve bu agregalar kullanılarak üretilen geopolimer betonun mekanik özelliklerini incelemiştir. Literatür araştırmaları sonucunda, aynı tane boyutundaki doğal agregalarla karşılaştırdıklarında geri dönüştürülmüş geopolimer agregaların su emme oranının ve pH değerinin yüksek, tane yoğunluğunun, Los Angeles aşınma direncinin ve alkali-silika reaksiyonun düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca geri dönüştürülmüş agregası ile ürettikleri geopolimer betonun sahip olduğu mekanik özelliklerinin, portland çimentoyla üretilen betonun mekanik özelliklerine kıyasla daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Gümüş (2016), geopolimer beton numunelerini hazırlarken hammadde olarak kullandığı uçucu kül (UK) ve metakaolin (MK) malzemelerini, alkali aktivatörler olan sodyum silikat (Na_2SiO_3) ve sodyum hidroksit (NaOH) ile tepkimeye en uygun girecek şekilde farklı oranlarda hazırlayıp karıştırmıştır. Termal kür işlemini yapabilmek için, geopolimer beton numunelerini farklı sürelerde (5 ve 24 saat) ve farklı sıcaklıklarda (60°C ve 90°C) kür etmiştir. 60°C 'de kür işlemi yaptığı geopolimer beton numunelerinde, kür süresindeki artışın görünen poroziteyi artırdığını tespit etmiştir. Geopolimer beton numunelerinin 5 saat boyunca kür işlemine tabi tutulduğu durumlarda, uçucu kül (UK) ikameli beton örneklerinde UK ikame oranının artmasıyla birlikte, geopolimer betonların görünen porozite oranlarında da bir artış gözlemlemiştir. Geopolimer betonların 60°C 'de ve 24 saat kür işlemine tabi tutulduğunda ise, UK ikame oranının %20'ye kadar artırılması ile görünen porozite oranlarında azalma gözlemlemiştir. Ancak UK ikame oranını %30'a çıkarmasıyla birlikte, numunelerin görünen porozite değerlerinde yeniden bir artış meydana geldiğini gözlemlemiştir. 5 saat boyunca kür işlemine tabi tuttuğu numunelerle kıyasladığında, görünen porozite değerlerindeki farklılıkların sebebini, numunelerin bünyesinde gerçekleşen geopolimerleşme mekanizmasıyla ilgili olduğunu düşünmektedir. Geopolimer beton numunelerinde kür sıcaklığının artırılması ile birlikte, su emme

oranlarının da genel olarak artış gösterdiğini gözlemlemiştir. Bu artışların sebebinin, bünye içerisindeki yükselen sıcaklıkla birlikte alkali çözeltinin daha hızlı buharlaşmasına neden olması ve bu hızlı buharlaşmanın, numunelerde kılcal çatlakların bir miktar daha artmasına yol açması sonucunda meydana geldiğini düşünmektedir. Sonuç olarak, geopolimer beton numunelerine uyguladığı kür sıcaklıklarını dikkate aldığına, kür süresinin uzaması ve uçucu kül (UK) oranının artışı ile numunelerin basınç dayanımlarında da artış meydana geldiğini tespit etmiştir.

Görür (2015), termik santrallerin yan ürünü olan F sınıfı uçucu külü NaOH ile aktive ederek elde ettiği numuneleri incelemiştir. Farklı derişim oranlarında NaOH kullanarak ürettiği harç numunelerine farklı kür süreleri ve farklı sıcaklıklar uygulamıştır. Harç numunelerindeki NaOH oranının artışı ile, işlenebilirlik düzeylerinde de bir artış olduğunu tespit etmiştir. Optimum derişim oranını belirlemek amacıyla yapmış olduğu basınç ve eğilme dayanımı deneyleri sonucunda, en yüksek eğilme ve basınç dayanımını %14 derişimle hazırlanan ve 115°C’de 24 saat süreyle kürlemiş olduğu numunelerde tespit etmiştir. Sonuç olarak, uygun derişim ve kür koşulları uygulayarak 100 MPa’nın üzerinde basınç dayanımına sahip ve Portland çimentosuna kıyasla üstün dayanıklılık özellikleri gösteren bir geopolimer harcı elde etmiştir.

İpek ve Ekmen, (2022), yapmış olduğu çalışmada doğal kuma alternatif olarak geri dönüştürülmüş kum malzemelerini araştırmıştır. Uçucu kül bazlı geopolimer harç üretiminde, yapı malzemelerinden geri dönüştürülmüş farklı kum türlerinin potansiyel kullanım etkilerini incelemek üzere deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada bazalt, granit, mermer, seramik karo ve beton gibi inşaat malzemelerinin geri dönüştürülmesiyle elde edilen beş farklı türde geri dönüştürülmüş malzemeleri doğal kuma alternatif olacak şekilde değerlendirmişlerdir. Dere kumunun geri dönüştürülmüş kumlarla ikame edilmesinin, geopolimer harçların birim ağırlıkları üzerinde belirgin bir etki oluşturmadığı; ancak yalnızca bazalt karosunun geri dönüşümüyle elde edilen kumun harçların birim ağırlığını artırdığını ve bu artışın %5’ten fazla olmadığını tespit etmişlerdir. Geri dönüştürülmüş kumlar kullanılarak üretilen geopolimer harçların su emme oranlarının, kontrol geopolimer harcına kıyasla daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Betonun geri dönüşümünden elde edilen kumun geopolimer harç üretiminde kullanılması, harçların yarmada çekme dayanımını azaltırken; mermer karonun geri dönüşümünden elde edilen kumun ise genel olarak yarmada çekme dayanımını artırdığını tespit etmişlerdir. Diğer geri dönüştürülmüş kum türlerinin ise belirgin ve sistematik bir etki göstermediğini

gözlemlemişlerdir. Tüm geri dönüştürülmüş kumların, nehir kumu ile benzer bir gradasyon eğrisine sahip olduğu; ancak fiziksel özellikleri ve partikül şekilleri açısından farklılıklar gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ancak, bu farklılıklara rağmen çalışma kapsamında üretilen geri dönüştürülmüş kumların, geopolimer harç üretiminde dere kumu yerine kullanılabileceği sonucuna varmışlardır.

Nasr ve ark., (2018), yapmış oldukları çalışmada, alkali aktivatör konsantrasyonunun ve kürleme koşullarının alkali aktive edilmiş cüruf harçlarının (AAC) ısı direnci özellikleri üzerindeki etkisini ele almayı amaçlamışlardır. Sonuçlar, alkali aktivatör dozajından bağımsız olarak ısı ile kürlemenin, ortam ve su kürleme koşullarına kıyasla yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra AAC harçlarının basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ortaya koyduğunu belirtmişlerdir. Eğilme dayanımı açısından, ısı ile kürlenmiş AAC harçları yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra dayanım kazanımı yaşadığını ve artışın belirli bir alkali aktivasyon seviyesinde daha yüksek olduğunu vermiştir.

Kop ve Yazıcıoğlu (2023), yapmış oldukları çalışmada alkali aktivatör olarak 4M, 8M ve 12M NaOH (sodyum hidroksit) ile Na_2SiO_3 (sodyum silikat) kullanmışlardır. $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranını 2 olarak belirlemiş ve bu oranı tüm deney serilerinde sabit tutmuşlardır. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve her ikisini %50 oranında karıştırarak hibrit geopolimer harçlar üretilip ve bu harçlara 12 saat boyunca 50 °C, 75 °C ve 100 °C etüvde kür uygulamışlardır. Kür uygulaması sonucunda, numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla eğilme, çekme ve basınç dayanımı testleri yapıp, mikroyapı analizleri için ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, tüm numuneler için en iyi performansı 100 °C’de elde etmişlerdir. 4M NaOH, Na_2SiO_3 ve yüksek fırın cürufu kullanarak ürettikleri numunelerin ortalama eğilme çekme dayanımı 5,4 MPa, basınç dayanımını ise 60,05 MPa olarak belirlemişlerdir. Uçucu kül ile ürettikleri numunelerde ise, yüksek fırın cürufuna kıyasla basınç ve eğilme çekme dayanımlarının belirgin şekilde düşük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Soares ve ark., (2021), geopolimerin betonarme yapılarda onarım malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu nedenle bu çalışma metakaolin bazlı onarım geopolimer harçların mekanik özelliklerini incelemek üzerine yürütülmüştür. Geopolimer harçlar, taze karışımların özelliklerini (işlenebilirlik, priz süreleri), 28 güne kadar basınç ve çekme dayanımlarındaki kazanımı belirlemek için sodyum ve potasyum silikatları, sodyum ve potasyum hidroksitlerle birleştirerek alkali aktivatörler

hazırlamışlardır. Sonuçlar, tüm geopolimer harçların yapısal onarım uygulamaları için temel olan erken yaşlarda yüksek mekanik mukavemete ulaştığını gözlemlemişlerdir. Basınç dayanımındaki kazanç 28 günlük numunelerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında ilk gün %60, 3 gün sonra %85 ile %93'e kadar değiştiğini tespit etmişlerdir. Tüm numunelerin 28 günde 80 MPa'dan fazla basınç dayanımlarına ve 5 ile 6 MPa arasında çekme dayanımlarına ulaştığını tespit etmişlerdir. Kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu analizi sonucunda, kullanılan alkali aktive edici çözeltinin türüne bağlı olarak önemli farklılıklar ortaya koyduğunu gözlemlemişlerdir. Potasyum hidroksit ile üretilen harçlar biraz daha yoğun ve daha homojen bir matris gösterirken, karışık silikatlar ve hidroksitler içeren harçlar diğerlerinden daha az çatlak içeren bir geçiş bölgesi (matris-ince agrega arayüzü) gösterdiğini tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmada geliştirilen geopolimer harçların betonarme yapıların onarımında kullanılabilmesi için muazzam bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Karaaslan ve ark., (2022), yapmış oldukları çalışmada uçucu kül ve/veya kalsiyum alüminat çimentosu, ağırlıkça toplam toz bağlayıcının %10, %20 ve %30'u oranında pomza ile ikame edilerek, pomza esaslı geopolimer (PGP) harçlar üretmişlerdir. Bu çalışma ile pomzanın, alternatif bir alüminosilikat kaynak olarak geopolimer bağlayıcılarda kullanım potansiyelini değerlendirip ve farklı ikame oranlarının harçların özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ortam sıcaklığında ve 60 °C'de kür ettikleri bu harç numuneleri, 28. gün sonunda %5 derişime sahip sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisine yerleştirip, 120 gün süreyle asidik ortamda bekletmişlerdir. Sülfürik asit etkisiyle PGP numunelerde meydana gelen görsel değişimler, ağırlık kayıpları ve kalan basınç dayanımları 60. ve 120. günlerde ölçerek, Portland çimentosu esaslı referans harçlarla karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda, referans numunelerinin sülfürik asit ortamında çözünerek 60. günün sonunda %25,6 oranında ağırlık kaybına uğradığını, basınç testine giremeyecek kadar şeklinin bozulduğunu ve buna karşılık, %20 - %30 oranında kalsiyum alüminat çimentosu içeren ve ortam sıcaklığı dışında kür edilen PGP harçlarda görsel açıdan herhangi bir çözünme gözlemlenmediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, 120 gün sonunda ortam sıcaklığında kürledikleri PGP numunelerinin en fazla %6,5, 60 °C'de kür edilenlerin ise en fazla %4,1 oranında ağırlık kaybına uğradığını tespit etmişlerdir. Her ne kadar PGP harçlar sülfürik asit çözeltisinde 120 gün sonunda %70'e varan basınç dayanımı kayıpları yaşamış olsa da, yeterli miktarda uçucu kül ve kalsiyum alüminat çimentosu ikamesi ile bu harçların hem basınç dayanımı hem de asit direnci önemli ölçüde iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Acar ve ark., (2020) yapmış oldukları çalışmada geopolimer harç numunelerine, zeolit katkısının dayanım üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Eğilme dayanımı açısından, zeolit katkılı karışımlar ile yalnızca uçucu kül kullanılan karışımlar arasında benzer sonuçlar elde etmiş olsalar da, basınç dayanımı bakımından zeolit katkılı karışımların daha düşük performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Bu durumu iyileştirmek amacıyla alkali aktivatör/alüminosilikat oranları ile $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranlarını değiştirip ve bu değişikliklerin basınç dayanımında bir miktar artış sağladığını tespit etmişlerdir. Ancak, bu artış eğilme dayanımında bir düşüşe neden olmuştur. Ayrıca, zeolit katkılı karışımlardan elde ettikleri en iyi basınç dayanımı sonuçları dahi, yalnızca uçucu kül içeren karışımlarla kıyaslama yaptıklarında daha düşük seviyede kaldığını gözlemlemişlerdir. Zeolit ve uçucu külü birlikte kullandıkları deneylerde eğilme ve basınç dayanımı arasında ters orantı olduğunu gözlemlemişlerdir. Eğilme dayanımı yüksek olduğunda basınç dayanımının düşük çıktığını, basınç dayanımının arttığı durumlarda ise eğilme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlar doğrultusunda, zeolit katkısının her iki dayanım türünü aynı anda iyileştirmede etkili olmadığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, zeolit katkısı ile elde edilen dayanım değerlerinin hiçbir zaman zeolit katkısı olmayan karışımlardan elde edilen değerleri aşmadığı kanısına varmışlardır. Ancak zeolitın ağır metal iyonlarını adsorbe etme özelliği sayesinde, çevre dostu ve düşük çevresel etkiye sahip yeşil yapı malzemeleri üretiminde potansiyel bir katkı maddesi olabileceğini vurgulamışlardır. Bu nedenle, zeolit katkısı her ne kadar mekanik dayanımı sınırlı düzeyde etkilese de, sürdürülebilir malzeme tasarımı açısından değerlendirilmeye değer bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

Eser ve ark., (2024) yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül ve seramik sektörü atıklarından olan vitrifiye atığı (V), filtre pres karo atığı (K), çömlek atığı (Ç) kullanarak, iki farklı alkali aktivatör yardımıyla sentezlenen geopolimer harçların dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Amaç, bu iki endüstriyel atığın birlikte değerlendirilerek çevre dostu ve yüksek performanslı bağlayıcı sistemlerin elde edilip edilemeyeceğini ortaya koymaktır. Çalışma verileri sonucunda, seramik sektörü atıkları, yüksek silika ve alümina içeriği sayesinde uçucu kül ile birlikte veya uçucu kül içermeyen sistemlerde geopolimer üretimi için önemli bir potansiyele sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Aktivatör olarak sodyum silikat kullanımı, özellikle silis içeriği yüksek olan atık tozların yer aldığı üçlü karışımlarda erken priz alma problemine yol açtığı için bu durum, nihai basınç dayanımında düşüşe neden olduğunu tespit etmişlerdir. Buna karşılık, NaOH içeren üçlü karışımlardan elde edilen dayanım değerlerinin, sodyum silikat içeren harçlara kıyasla daha yüksek olduğu

gözlemlenmiştir. Uçucu kül ve seramik atıklarının birlikte kullanıldığı üçlü karışımlarda, 28 günlük basınç dayanımının genellikle 30 MPa'nın üzerinde olduğunu belirlemişlerdir. Benzer şekilde, uçucu kül içermeyen ancak seramik atıkların yer aldığı 150 Ç-K-V kodlu üçlü karışımlarda da, her iki tip aktivatör kullanımıyla yaklaşık 30 MPa seviyesinde 28 günlük basınç dayanımı elde etmişlerdir. Harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasında genel olarak bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, sodyum silikat ile aktive edilen harçların eğilme dayanımlarının, sodyum hidroksit ile aktive edilen harçlara kıyasla genellikle daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Huseien ve ark., (2016) gerçekleştirdikleri çalışmada farklı çözelti tipleri ile kalsiyum silikat oranlarının, yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve palmiye yağı yakıt külü ile hazırlanmış oldukları geopolimer harçların özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre, karışımdaki kalsiyum oksit (CaO) oranının artırılması, taze harcın işlenebilirliğini ve priz süresini önemli ölçüde azaltmıştır. Sodyum silikat çözeltisinin kullanımı ise işlenebilirliği düşürmüştür; buna karşılık priz süresinde uzamaya neden olmuştur. Ca/Si oranı 1,41 olan karışımın, 28 günlük kür süresi sonunda daha yüksek basınç dayanımı gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, %20 oranında uçucu kül içeren harçların, düşük uçucu kül içeriğine sahip harçlara kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha iyi mekanik performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Özellikle 60 °C'de kürlenmiş sodyum silikat çözeltili harçlar, daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Yüksek kalsiyum içeriğine sahip geopolimer harçların, laboratuvar ortam sıcaklıklarında onarım malzemesi olarak kullanılabilir potansiyele sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Ekinci ve Türkmen, (2021), geopolimer hamurların basınç dayanımı özellikleri üzerinde kullanılan hammadde türü ile alkali aktivatör özelliklerinin etkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Ham madde olarak F sınıfı uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmış ve bu malzemeleri belirli oranlarda birbirleriyle ikame ederek değerlendirmişlerdir. Alkali aktivasyon, Na_2SiO_3 ve farklı molaritelerde (8 M, 10 M, 12 M ve 14 M) NaOH çözeltileri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri bulgular, kullanılan hammadde tipi ve alkali aktivatör özelliklerinin basınç dayanımı üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu ortaya koymuştur. YFC ikame oranının artırılmasıyla birlikte basınç dayanımında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, F sınıfı uçucu kül içeren geopolimer karışımların yüksek dayanım geliştirebilmeleri için ısıtma uygulamasına ihtiyaç duyduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, kullanılan hammadde türünden bağımsız olarak, sodyum silikat (Na_2SiO_3) içeren tüm numunelerin, 28 günlük nihai basınç dayanımının

%85'inden fazlasını ilk 7 gün içerisinde kazandığını tespit etmişlerdir. Öte yandan, optimum basınç dayanımına ulaşılabilmesi için gereken sodyum hidroksit (NaOH) konsantrasyonunun, karışımdaki bağlayıcı içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterdiğini saptamışlardır.

Kabirova ve ark., (2020), yapmış oldukları çalışmada mermerin işlenmesi sürecinde oluşan mermer atığının geopolimer harç üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Bunun için, çökeltme havuzundaki mermer çamurunu laboratuvar koşullarında 105 °C'deki etüvde kurutup, daha sonra kırıp, öğütmüşlerdir. Ardından agrega olarak kullanılan dere kumu, %25 ve %50 oranlarında eleme sonucu elde ettikleri mermer tozuyla ikame etmişlerdir. En yüksek basınç dayanımını, %25 oranında mermer tozu içeren harç serisinde elde ederken, %50 oranında mermer tozu içeren harç serisinde basınç dayanımının düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Helmy (2016), çalışmasında F sınıfı uçucu küllü geopolimer betonu üretimi yaparken aralıklı kürleme yöntemi kullanmanın etkilerini araştırmayı hedeflemiştir. Sabit ve üç farklı mol oranında, iki çeşit alkali aktivatör (NaOH ve Na₂SiO₃) çözeltisi kullanmıştır. Kürleme sıcaklığını, günde 6 saat olmak üzere 4 adımda aralıklı olarak uygulayarak 70 °C'ye ayarlamış ve ardından ortam sıcaklığında 18 saat dinlendirmiştir. Aralıklı kürlemenin, her kürleme adımının sonunda tüm geopolimer harçlarının basınç dayanımını artırdığını tespit etmiştir. 72 saatlik dinlenme süresinin, ek su içeriğiyle veya ek su içeriği olmadan uyguladığı aralıklı kürleme işleminin sonucunda, 24 saatlik dinlenme süresinden daha yüksek 7 günlük basınç dayanımı kazandığını belirtmiştir. En yüksek ortalama 7 günlük basınç dayanımı, sırasıyla 72 saatlik ve 24 saatlik dinlenme sürelerine tabi tuttuğu en düşük mol oranı 9,97 olan numunelerinde 63,5 ve 60,4 MPa olarak tespit etmiştir.

Topal, (2020), yapmış olduğu deneysel çalışmada 5 farklı oranda geri dönüştürülmüş agrega ile geopolimer beton numunesi hazırlamıştır. Beton numunelerinin oda sıcaklığında geri dönüştürülmüş agrega oranı arttıkça numunelerin basınç dayanımının azaldığını tespit etmiştir. Su emme oranının ise geri dönüştürülmüş agrega oranının artmasıyla arttığını tespit etmiştir. Aynı şekilde kılcal geçirimlilik katsayısında da GDA oranı ve sıcaklık artışıyla birlikte artış olduğunu gözlemlemiştir. Aynı sıcaklıktaki geopolimer karışımlarda GDA oranı arttıkça su emme oranında da artış olduğunu tespit etmiştir.

Atabey ve ark., (2020), yapmış oldukları bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül kullanarak ürettikleri geopolimer harçların taşıma özellikleri üzerine aktivatör tipi ve sodyum (Na) içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlarına göre, harç karışımlarında sodyum

miktarının %6'dan %15'e çıkarılması, taşıma özelliklerinde iyileşme sağlamıştır. Özellikle %15 Na içeriği ile hazırlanan numunelerin en iyi performansı sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, yalnızca sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak aktive edilen harçların, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) karışımı ile aktive edilenlere kıyasla daha iyi taşıma özelliklerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Kullanılan aktivatör tipinin numunelerde farklı özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir. Örneğin, NaOH tek başına Na_2SiO_3 - NaOH karışımından daha iyi geçirgenlik özellikleri sağladığını deneysel veriler sonucunda tespit etmişlerdir.

Bayram (2023), yapmış olduğu çalışmada F sınıfı uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer harçların, farklı oranlardaki aktivatörler ile aktifleştirilmesi ve çeşitli süre ve sıcaklıklarda kürlenmesi sonucu oluşan mekanik, içyapı ve bazı durabilite özelliklerini incelemiştir. Ayrıca, farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agrega (GDA) ikamesinin bu özellikler üzerindeki etkisini araştırmıştır. GDA oranının artmasıyla birlikte, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren sistemlerin her ikisinde de işlenebilirlik değerlerinde düşüş gözlemlemiştir. Bu durumun, GDA ırmak kumuna kıyasla daha yüksek su emme oranına sahip olmasıyla ilgili olduğunu açıklamıştır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu temelli geopolimer sistemlerde kullanılan aktivatör miktarının artışı, eğilme ve basınç dayanımında bir yükselişe neden olduğunu gözlemlemiştir. Bu sonucun, literatürdeki çalışmalarla uyumluluk gösterdiğini belirtmiştir.

Turhan, (2020), Türkiye'de geniş rezervlere sahip perliti, belirli oranlarda endüstriyel atık ürünlerle ikame ederek, geopolimer beton üretiminde kullanılması üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Endüstriyel atık ürünlerle ikame edilen tüm numune gruplarının basınç dayanımları, %100 perlit içeren kontrol grubuna kıyasla daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Basınç dayanımı sonuçları, endüstriyel atıkların perlit esaslı geopolimer betonlarda ikame edilmesinin olumlu bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemiştir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren numune gruplarında endüstriyel atık ikame oranı artışıyla paralel olarak donma-çözünme direncinin de arttığını tespit etmiştir.

Zhu ve ark., (2019), yapmış oldukları çalışmada 25 ve 50 çevrim donma-çözünme çevrimlerinin karşılaştırılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Elde ettikleri veriler doğrultusunda uçucu kül ikame oranı arttıkça ağırlık kaybının 25 donma-çözünme döngüsünden sonra %0,69'dan %1,42'ye, 50 donma-çözünme döngüsünden sonra ise %2,17'den %24,60'a yükseldiğini tespit etmişlerdir.

Kalkan (2017), yaptığı deneysel çalışmada ısıl kür işlemi uygulanmış ve silis dumanı ilave edilmiş geopolimer beton numunelerin fiziksel yapısının bozulduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca, silis dumanı miktarının arttırılmasıyla birlikte numunelerde oluşan çatlak boyutlarının büyüdüğünü gözlemlemiştir. Aynı zamanda silis dumanı miktarının arttırılmasıyla birlikte basınç dayanım değerlerinin düştüğünü tespit etmiştir.

Koç (2025), yapmış olduğu çalışmada metakaolin ve yüksek fırın cürufu tabanlı farklı molariteler ve silis kumuna mermer tozu ikamesi ile üretilen geopolimer harçların mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Çalışmada 10M, 12M, 14M ve 16M olmak üzere dört farklı seri hazırlamıştır. Mermer tozu atığının %20 oranında silis kumuna ikamesiyle üretilen geopolimer beton numunelerinin, sadece silis kumuyla üretilen geopolimer beton numunelerine kıyasla basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığını tespit etmiştir. Doğru oranlarda kullanılan dolgu malzemesinin nihai dayanımları arttırdığını tespit etmiştir. MT atığı ikameli geopolimer harçların erken dayanımları, referans numunesi olarak hazırlanan 14 M geopolimer harçlara kıyasla 7 günlük erken dayanımları azalma gösterirken, 28 günlük nihai dayanıma ulaşma sürecinde dayanımların iyileştiğini ve aynı zamanda referans olarak kabul edilen numunelerden daha yüksek dayanımlara ulaştığını tespit etmiştir. MT atığı içeren harçların, MT oranı arttırıldıkça alkali ihtiyacında arttığını gözlemlemiştir. En az su emme oranını %20 MT ikameli harçlarda tespit etmiştir. 600°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde geopolimerlerin matrisinde olduğu düşünülen ayrışmadan ötürü kılcal çatlaklar gözlemlemiştir. En net çatlaklar MT ikamesi %60 oranında olan geopolimer numunelerden tespit etmiştir. 900°C sıcaklık sonrasında numunenin yüzeyinde oluşan tahribatlar ve çatlak artışları gözlemlemiştir. Sıcaklık artışıyla beraber numunelerde oluşan tahribatların da arttığını tespit etmiştir.

Kong ve ark., (2007), çeşitli karışım oranlarında metakolin ve uçucu kül kullanarak ürettiği geopolimer numuneler üzerinde yüksek sıcaklığın etkisini araştırmak üzere bir çalışma gerçekleştirmiştir. Alkali çözelti olarak ise potasyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmıştır. Sonuçlar sonrası uçucu kül bazlı geopolimerin mukavemetinde, yüksek sıcaklıklara (800°C) maruz kaldıktan sonra artış olduğunu gözlemlemiştir. Her iki geopolimer türünü de termogravimetrik, taramalı elektron mikroskobu ve cıva intrüzyon porozimetri testlerine tabi tutmuştur. Test sonuçları neticesinde uçucu kül bazlı geopolimerlerin, ısıtıldığında nemin kaçmasını kolaylaştıran çok sayıda küçük gözeneklere sahip olduğunu ve böylece geopolimer matrisine minimum hasar verdiği yönünde bir kanıya varıyor. Öte yandan, metakaolin geopolimerleri bu tür gözenek dağılım yapılarına sahip değildir. Uçucu

kül geopolimerlerindeki mukavemet artışını, kısmen reaksiyona girmemiş uçucu kül parçacıklarının sinterleme reaksiyonlarından ötürü olduğu düşünülmektedir.



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, geopolimer harçların üretiminde kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri, karışım tasarımına ilişkin esaslar, harçların laboratuvar ortamında hazırlanma süreci ve üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların kapsamı ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Bağlayıcılar

3.1.1. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül

Yapılan deneysel çalışmada Adana'nın Yumurtalık ilçesindeki İskan Termik Santral'inden temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Deneyde kullanılan uçucu kül, gri renkte olup ince taneli yapıya sahip atık bir malzemedir. Deneylerde kullanılan uçucu külün özgül ağırlığı 2.27'dir. Şekil 3.2'de verilen UK'nın XRD kırınım eğrisi incelendiğinde UK içindeki hakim fazın mullit olduğu ve ilaveten kuvars mineralinin bulunduğu

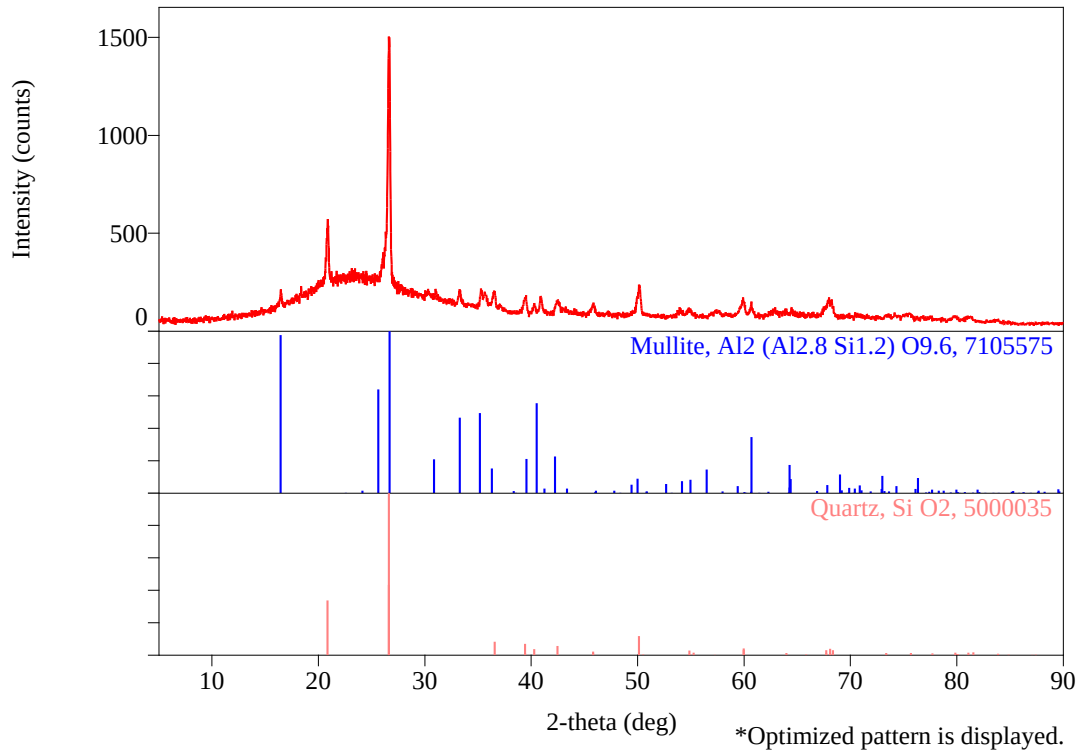
görülmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül Şekil 3.1’de, malzemenin kimyasal analizi ise Tablo 3.1’de, XRD analizi ise Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan uçucu kül

Tablo 3.1. Uçucu kül kimyasal analizi

Bileşenler	Değerler (%)
SiO ₂	63,003
TiO ₂	0,892
Al ₂ O ₃	20,483
Fe ₂ O ₃	7,004
Mn ₃ O ₄	0,069
MgO	1,915
CaO	2,522
Na ₂ O	1,031
K ₂ O	2,492
P ₂ O ₅	0,137
SO ₃	0,121



Şekil 3.2. Uçucu kül XRD analizi

3.1.2. Deneysel çalışmada kullanılan silis dumanı

Yapılan deneysel çalışmada silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Silis dumanı, çok ince taneli, pürüzsüz yüzeyli ve camsı görünümüne sahip bir malzemedir. Deneylerde kullanılan silis dumanının özgül ağırlığı 2.09' dur. Şekil 3.4'te verilen SD'nin XRD kırınım eğrisi incelendiğinde içerisinde ağırlıklı olarak kuvars mineralinin varlığına saptanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan silis dumanı Şekil 3.3'te, malzemenin kimyasal analizi Tablo 3.2'de, silis dumanı XRD analizi ise Şekil 3.4'te verilmiştir.

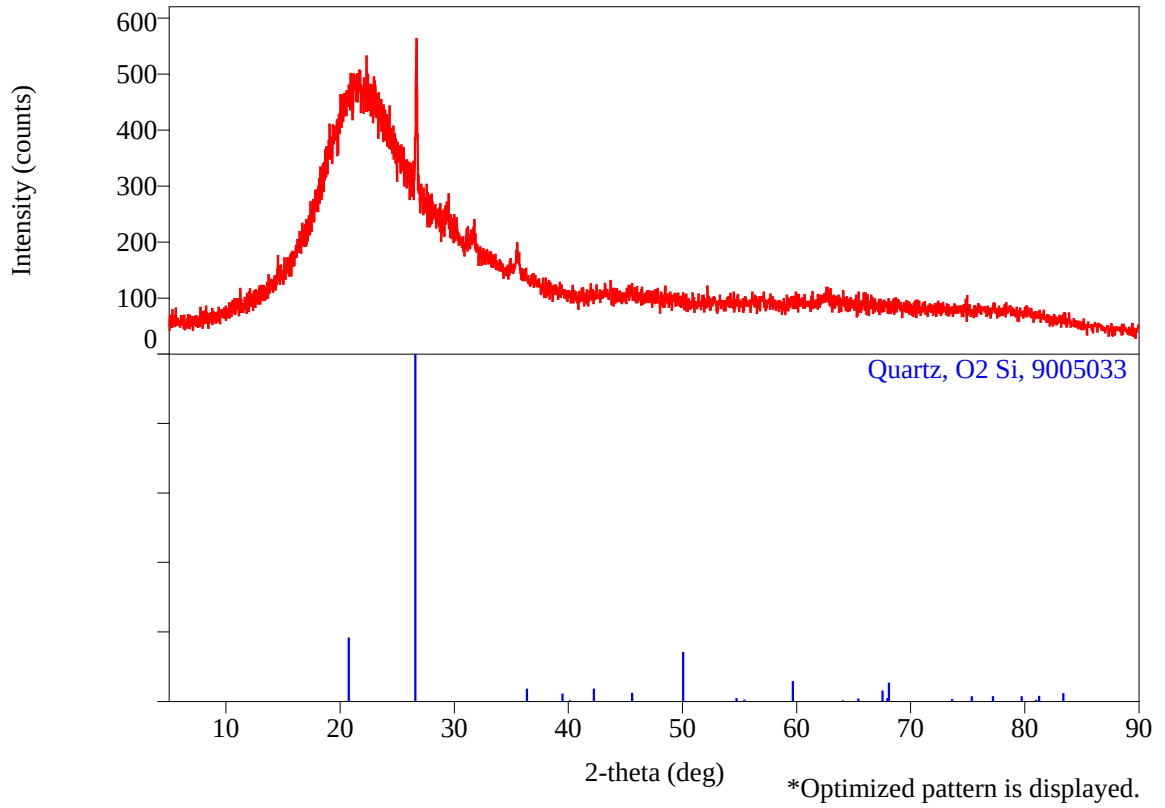
Tablo 3.2. Silis dumanı kimyasal analizi

Bileşenler	Değerler (%)
SiO ₂	88,555
TiO ₂	0,083
Al ₂ O ₃	2,179
Fe ₂ O ₃	2,314
Mn ₃ O ₄	0,114

MgO	1,473
CaO	1,866
Na ₂ O	0,958
K ₂ O	1,865
P ₂ O ₅	0,218



Şekil 3.3. Deneysel çalışmada kullanılan silis dumanı



Şekil 3.4. Silis dumanı XRD analizi

3.2. Deneyisel Çalışmada Kullanılan Agregalar

3.2.1. Deneyisel çalışmada kullanılan mermer tozu

Yapılan deneyisel çalışmada Elazığ Aktaş Mermer San. Tic. A.Ş' den temin edilen mermer tozu kullanılmıştır. Kullanılan agregaların kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, su emme yüzdesi deneyleri ASTM-C128 standartlarına göre, sıkışık birim ağırlık, gevşek birim ağırlık deneyleri ASTM-C29 standartlarına göre, elek analizi ve incelik modülü tayini ASTM-C136 standartlarına göre yapılmıştır. Mermer tozu agregası boyut olarak 2 mm ve 2 mm'den daha küçük boyutlardadır. Deneylerde kullanılan mermer tozunun özgül ağırlığı 2.86' dır. Şekil 3.7'de verilen MT'nin XRD kırınım eğrisi incelendiğinde yoğun olarak magnezyum kalsit mineralinin bulunduğu görülmektedir. Deneyisel çalışmada kullanılan mermer tozu Şekil 3.5' de, malzemenin fiziksel özellikleri Tablo 3.3'de, mermer

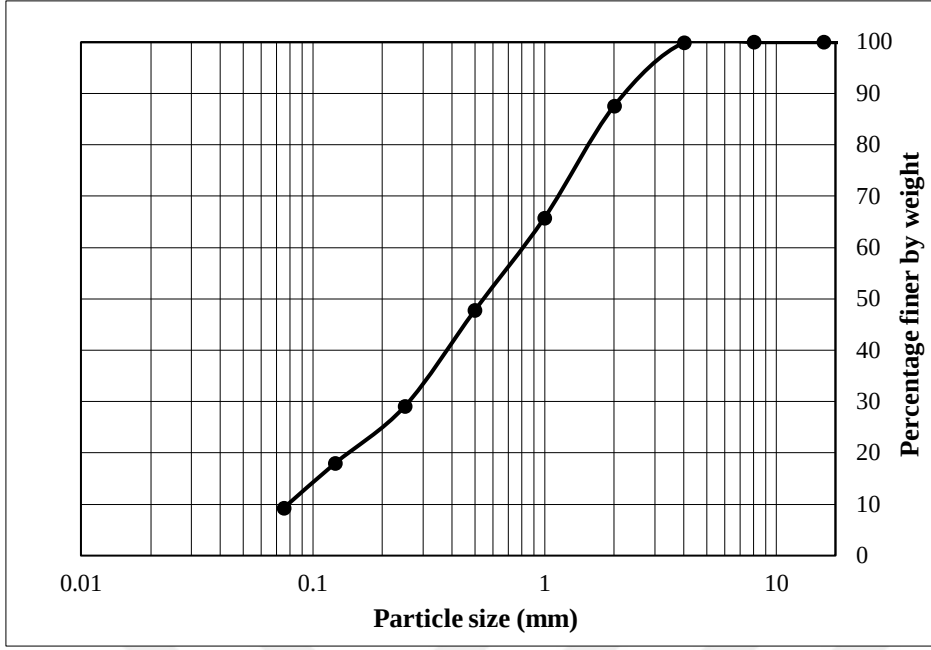
tozunun granülometri eğrisi Şekil 3.6’da, mermer tozunun XRD analizi Şekil 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Mermer tozunun fiziksel özellikleri

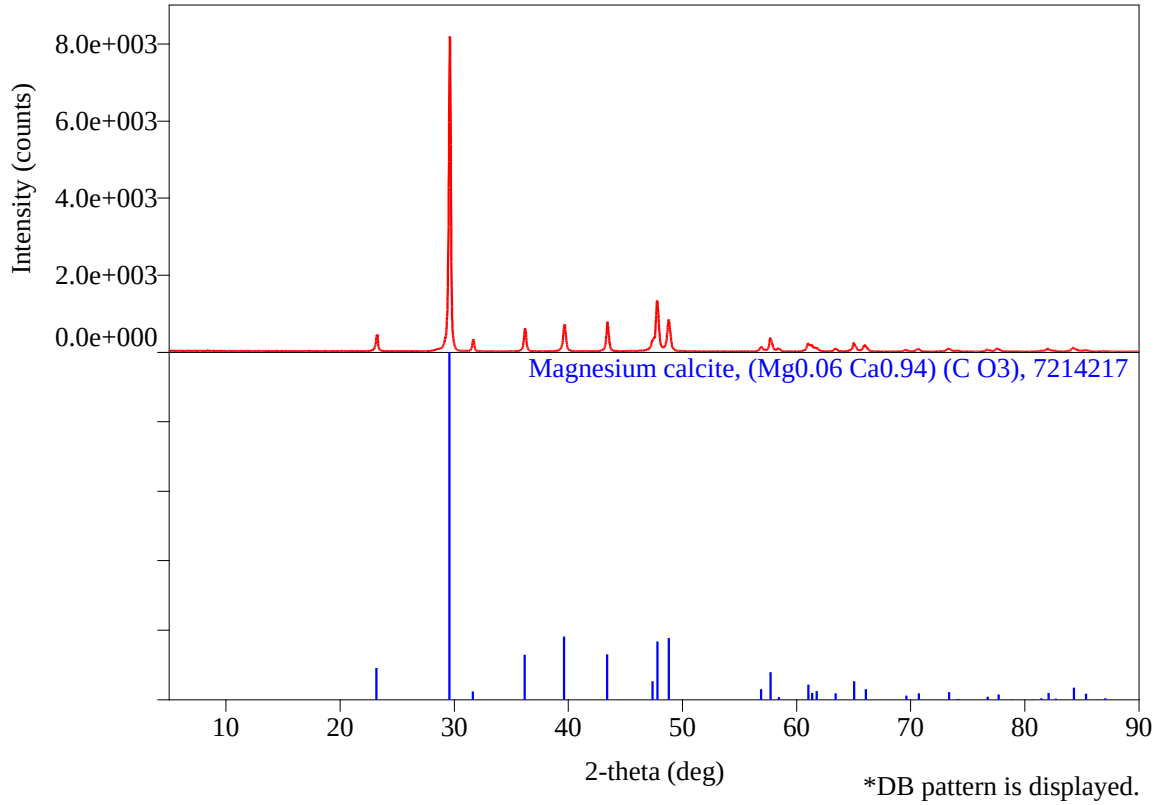
Fiziksel özellikler	Değerler
Su emme yüzdesi (%)	2,67
DKY özgül ağırlık	2,54
Gevşek birim ağırlık (gr/cm ³)	1,11
Sıkışık birim ağırlık (gr/cm ³)	1,14
İncelik modülü	4,67



Şekil 3.5. Deneysel çalışmada kullanılan mermer tozu



Şekil 3.6. Mermer tozunun granülometri eğrisi



Şekil 3.7. Mermer tozu XRD analizi

3.2.2. Deneyisel çalışmada kullanılan yıkıntı atığı

Yapılan deneyisel çalışmada Elazığ Yeni mahalle de deprem sonrası yıkımı gerçekleştirilmiş bir binanın atık betonları kullanılmıştır. Kullanılan agregaların kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, su emme yüzdesi deneyleri ASTM-C128 standartlarına göre, sıkışık birim ağırlık, gevşek birim ağırlık deneyleri ASTM-C29 standartlarına göre, elek analizi ve incelik modülü tayini ASTM-C136 standartlarına göre yapılmıştır. Atık beton agregası, maksimum 4 mm çapında olup ince agrega olarak kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan atık beton agregasının özgül ağırlığı 2.73'tür. Yıkıntı atığının toplandığı alan Şekil 3.8'de, öğütölmüş hali ise Şekil 3.9'da verilmiştir. Yıkıntı atığının fiziksel özellikleri Tablo 3.4'te, granölometri eğrisi ise Şekil 3.10'da verilmiştir.



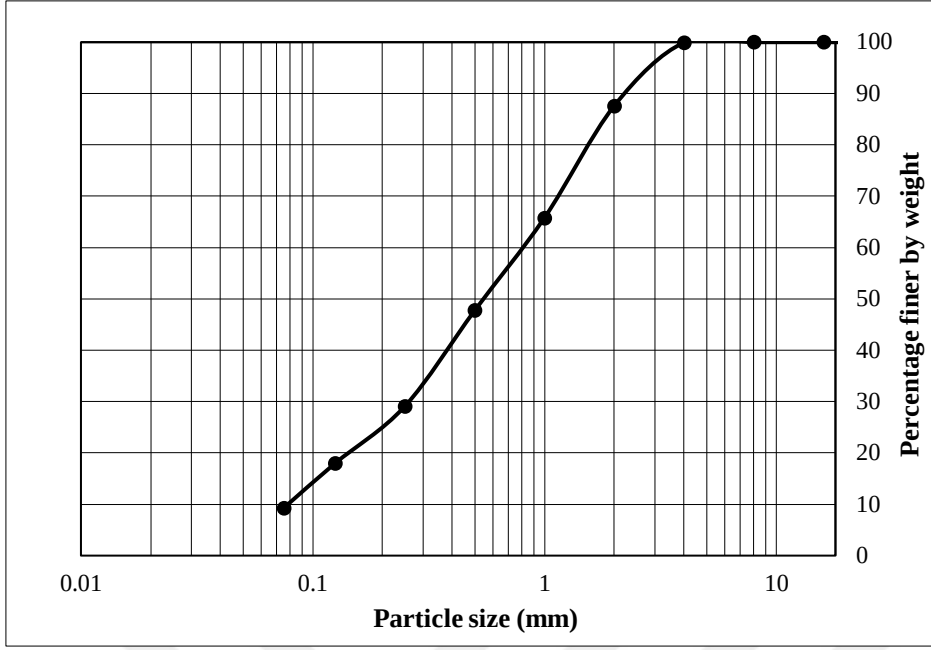
Şekil 3.8. Yıkıntı atığının toplandığı alan



Şekil 3.9. Yıkıntı atığının öğütülmüş hali

Tablo 3.4. Yıkıntı atığının fiziksel özellikleri

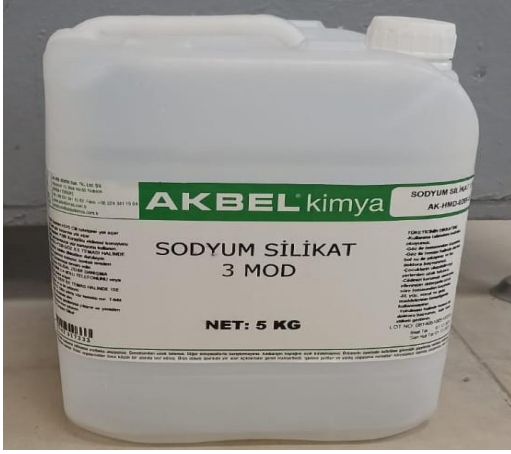
Fiziksel özellikler	Değerler
Su emme yüzdesi (%)	9,15
DKY özgül ağırlık	2,65
Sıkışık birim ağırlık (gr/cm ³)	1,64
Gevşek birim ağırlık (gr/cm ³)	1,41
İncelik modülü	3,43



Şekil 3.10. Yıkıntı atığı granülometri eğrisi

3.3. Deneyisel Çalışmada Kullanılan Alkaliler

Deneylerde kullanılan bağlayıcı malzemelerin alkali aktivasyonunun gerçekleşmesini sağlamak amacıyla, alkali çözeltileri olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Sodyum silikat (Na_2SiO_3) sıvı olarak temin edilmiştir. Alkali aktivasyonu sağlamak için kullanılan NaOH özgül ağırlığı 1,35, Na_2SiO_3 özgül ağırlığı 1,38 olarak bulunmuştur. Sodyum silikat sıvı halde mod 3 olarak, sodyum hidroksit (NaOH) %99 saflıkta katı pelet bir malzeme olarak temin edilmiştir. Deneyisel çalışmada kullanılan sodyum silikat Şekil 3.11’de, sodyum hidroksit Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan sodyum silikat



Şekil 3.12. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit

3.4. Deney Metodu

Sertleşmiş harç numunelerinin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık performanslarının değerlendirilmesi amacıyla; kuru yoğunluk, doymun kuru yüzey yoğunluk, görünür porozite, su emme kapasitesi, eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve kılcal su emme özellikleri üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

3.5. Agregalar Üzerinde Gerçekleştirilen Testler

3.5.1. Elek analizi

Deneylerde kullanılan mermer tozu ve yıkıntı atığı agregalarının tane boyutu dağılımını belirlemek amacıyla elek analizi gerçekleştirilmiştir. Ancak bu analiz öncesinde, deprem sonrası yıkımı gerçekleştirilmiş bir binadan temin edilen yıkıntı atıkları, uygun boyuta indirgenmeleri amacıyla Los Angeles aşındırma cihazında demir bilyeler eşliğinde öğütülmüştür. Şekil 3.13'te yıkıntı atıkları, Şekil 3.14'te ise kullanılan Los Angeles cihazı gösterilmektedir.

Elek analizi için kullanılan cihaz Şekil 3.15'te sunulmuştur. Eleme işlemi sırasında, elekler en altta tava olacak şekilde, artan elek açıklıklarına göre (0.075 mm, 0.125 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm ve 31.5 mm) sıralanarak cihaz düzeneğine yerleştirilmiştir. Analizi yapılacak numune en üstteki eleğe dökülmüş ve kapak kapatılarak cihaz 10 dakika süreyle çalıştırılmıştır. İşlem sonunda, her bir elek üzerinde kalan malzeme ayrı ayrı tartılmış ve bu veriler doğrultusunda tane boyutu dağılımı belirlenmiştir.



Şekil 3.13. Yıkıntı atığı



Şekil 3.14. Los Angeles cihazı



Şekil 3.15. Elek analizi cihazı

3.5.2. Özgöl ağırlık deneyi

Bu çalışmada kullanılan agregre ve bağlayıcı malzemeler üzerinde balon joje, piset, cam huni ve spatula yardımıyla özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan ekipmanlar Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16. Özgöl ağırlık deney ekipmanları

3.5.3. Su emme tayini

İnce agrega numuneleri, doymuş kuru yüzey (DKY) duruma getirilmek üzere koni yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Bu amaçla, agrega bir tepsi içerisinde su ile tamamen kaplanarak 24 saat boyunca bekletilmiş, ardından ince malzeme kaybına yol açmayacak şekilde süzülerek fazla su uzaklaştırılmıştır. Numune, DKY kıvama ulaşıncaya kadar sıcak hava akımı altında sürekli karıştırılarak kurutulmuştur.

Agreganın DKY durumuna ulaşp ulaşmadığı, koni yöntemi ile kontrol edilmiştir. Bu kapsamda numune koni içerisine yerleştirilmiş ve koninin kaldırılmasıyla birlikte malzemenin serbestçe akabilen bir kıvam kazanıp kazanmadığı gözlemlenmiştir. Numunenin serbestçe akabilen hale gelmesi, DKY durumunun sağlandığını göstermiştir. Bu aşamadan sonra, ince agreganın doymuş kuru yüzey özgül ağırlığı ve su emme oranı hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan kesik koni, 24 saat süreyle su içerisinde bekletilen atık mermer tozu ve yıkıntı atığına ait görseller sırasıyla Şekil 3.17’de, Şekil 3.18’de ve Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.17. İnce agregada özgül ağırlık ve su emme oranı tayininde kullanılan kesik koni



Şekil 3.18. Doygunluk işlemi için su içerisinde bekletilen atık mermer tozu numunesi



Şekil 3.19. Doygunluk işlemi için su içerisinde bekletilen yıkıntı atığı numunesi

3.6. Geopolimer Harç Karışımlarının Hazırlanması ve Karışım Oranları

3.6.1. Alkali çözeltinin hazırlanması

Çalışma kapsamında alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Alkali çözelti hazırlanırken $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$ oranı 2 olacak şekilde belirlenmiştir. Katı pelet formda temin edilen sodyum hidroksitin alkali aktivatör çözelti haline getirilebilmesi için öncelikle suda çözündürülmesi gerekmektedir. Her karışım oranı için gerekli olan sodyum hidroksit çözeltisi, 12 M derişimde hazırlanmıştır. Bu amaçla, karışım hesabına göre belirlenen miktarda NaOH ve su, bir beher içerisinde alınarak cam çubuk yardımıyla homojen şekilde karıştırılmıştır. Çözünme işlemi sırasında ekzotermik bir reaksiyon gerçekleştiğinden dolayı, çözelti yüksek miktarda ısı açığa çıkarmıştır. Bu nedenle, hazırlanmış çözelti daha sonra kullanılmak üzere 24 saat boyunca oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Soğuma süresince buharlaşma kaynaklı derişim kaybını önlemek amacıyla beherin ağzı hava geçirmeyecek şekilde kapatılmıştır. Soğumaya bırakılan sodyum hidroksit çözeltisi Şekil 3.20’de sunulmaktadır.



Şekil 3.20. Soğumaya bırakılan sodyum hidroksit çözeltisi

3.6.2. Karışımların hazırlanma prosedürü ve malzeme oranları

Bu çalışmada, atık malzemelerin geopolimer harç üretiminde kullanım potansiyelini değerlendirmek amacıyla, farklı oranlarda atık agrega ve bağlayıcı ikameleri içeren karışımlar hazırlanmıştır.

Karışımların hazırlanmasında mermer tozu ve yıkıntı atığı agregaları %0, %25 ve %50 oranlarında birbirleriyle yer değiştirilerek kullanılmış, bağlayıcı sistemde ise uçucu kül ve farklı oranlarda silis dumanı içeren karışımlar tercih edilmiştir. Silis dumanı, uçucu kül ile %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Deneylerde kullanılan tüm karışım oranlarına ait bileşen miktarları Tablo 3.5’de verilmiştir.

Deneylerde kullanılmak üzere her karışım oranı için 40×40×160 mm boyutlarında toplamda 72 adet geopolimer harç numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin yarısı (36 adet) fiziksel ve mekanik deneylerde, diğer yarısı ise durabilite deneylerinde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Her bir deneysel parametre için üç adet eşdeğer numune hazırlanmış ve sonuçlar bu numunelerden elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak değerlendirilmiştir.

Karışımların hazırlanmasında laboratuvarında bulunan harç mikseri kullanılmıştır. Kullanılan miksera ait görsel Şekil 3.21’de sunulmuştur. Öncelikle, referans oluşturması amacıyla ön deney harçları hazırlanmış ve bu aşamada uçucu kül ile silis dumanı oranlarına karar verilmiştir. Harç üretim süreci şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Hesaplanan miktardaki

agregalar miksera alınarak 30 saniye karıştırılmış, ardından daha önceden hazırlanmış sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi eklenerek karışım 1,5 dakika daha sürdürülmüştür. Bu aşamadan sonra, belirlenen oranlardaki bağlayıcı malzemeler (uçucu kül ve silis dumanı) karışıma ilave edilerek 2 dakika karıştırılmış ve son olarak, homojenlik sağlamak amacıyla 2 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Böylece, her bir karışım toplamda 6 dakikada tamamlanmıştır. Harç hazırlama süreci ve kullanılan ekipmanlara ait görseller Şekil 3.22’de sunulmuştur.

Taze harçlar, önceden yağlanmış 40×40×160 mm boyutlarındaki çelik kalıplara yerleştirilmiş (Şekil 3.23), hemen ardından sarsma tablası üzerine alınarak sıkıştırılmıştır. Bu sayede kalıplara yerleştirme sırasında oluşabilecek hava boşlukları minimum seviyeye indirilmiştir. Kullanılan sarsma tablası da Şekil 3.24’te verilmiştir.

Numuneler, kalıplarda 24 saat süreyle laboratuvar ortamında bekletilerek ilk prizini tamamlamıştır. Dökülen numunelerin genel görüntüsü Şekil 3.25’de sunulmuştur. Ardından, kalıplardan çıkarılan numunelere 75 °C sıcaklıkta 5 gün boyunca etüv kürü uygulanmış, son olarak numuneler 24 saat daha laboratuvar koşullarında bekletilerek kür işlemi tamamlanmıştır. Isıl kür uygulaması için kullanılan etüv cihazının görseli Şekil 3.26’da verilmiştir.

Tablo 3.5. Deneylerde kullanılan tüm karışım oranlarına ait bileşen miktarları

Numune	Uçucu kül (kg/m ³)	Silis dumanı (kg/m ³)	Yıkıntı atığı (kg/m ³)	Mermer tozu (kg/m ³)	Sodyum hidroksit (kg/m ³)	Sodyum silikat (kg/m ³)
100UK100YA	510.75	-	1228.5	-	146.24	299
100UK25YAM	510.75	-	921.37	321.75	146.24	299
100UK50YAM	510.75	-	614.25	643.5	146.24	299
90UK100YA	459.67	47.02	1228.5	-	146.24	299
90UK25YAM	459.67	47.02	921.37	321.75	146.24	299
90UK50YAM	459.67	47.02	614.25	643.5	146.24	299
80UK100YA	408.6	94.05	1228.5	-	146.24	299
80UK25YAM	408.6	94.05	921.37	321.75	146.24	299
80UK50YAM	408.6	94.05	614.25	643.5	146.24	299
70UK100YA	357.52	141.07	1228.5	-	146.24	299
70UK25YAM	357.52	141.07	921.37	321.75	146.24	299
70UK50YAM	357.52	141.07	614.25	643.5	146.24	299



Şekil 3.21. Mikser



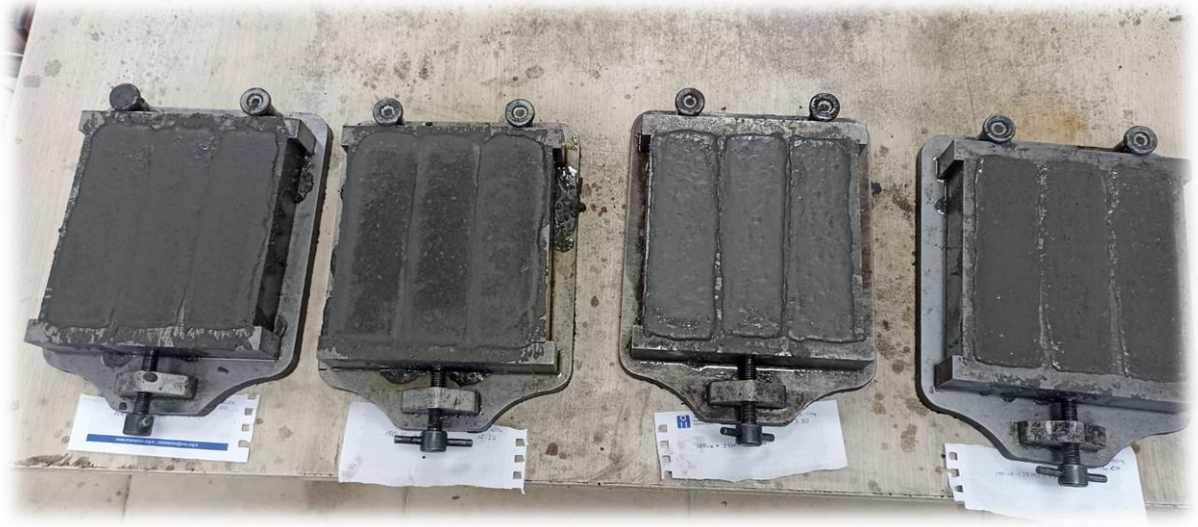
Şekil 3.22. Karışımın hazırlanma aşaması



Şekil 3.23. Deneylerde kullanılan çelik kalıplar



Şekil 3.24. Sarsma tablası



Şekil 3.25. Deneyler için hazırlanan numuneler



Şekil 3.26. Etüv cihazı

3.7. Sertleşmiş Geopolimer Harçlar Üzerinde Yapılan Deneyler

3.7.1. Fiziksel deneyler

3.7.1.1. Kuru yoğunluk, doymuş kuru yüzey yoğunluk, görünür porozite ve su emme deneyleri

Harçların fiziksel özelliklerini belirlemek için kuru yoğunluk, doymuş kuru yüzey yoğunluk, görünür porozite ve su emme deneyleri ASTM-C 642 standardına göre yapılmıştır. Her karışım türünden üçer adet numune teste tabi tutulmuş ve çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Bu deney için önce numuneler 40x40x160 mm boyutlarındaki çelik kalıplardan çıkarıldıktan sonra 75°C sıcaklıktaki etüvde 5 gün boyunca bekletilmiştir. Numunelerin etüve yerleştirilmiş hali Şekil 3.27’de belirtilmiştir. Daha sonra çıkarılan numuneler laboratuvar koşullarında soğumaya bırakılmıştır. Soğumaya bırakılan numuneler Şekil 3.28’de belirtilmiştir. Soğuyan numunelerin kuru ağırlığı hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Sonrasında ise numuneler 24 saat su kürüne yatırılmıştır. Su kürüne yerleştirilen numuneler Şekil 3.29’da sunulmuştur. Su küründen çıkarılan numuneler temiz bir havlu yardımıyla kurutulup suya doymuş ağırlığı tartılmıştır. Daha sonra numunelerin tek tek Arşimet terazisi yardımıyla suda ağırlıkları tartılıp not edilmiştir. Bu aşamada kullanılan Arşimet terazisi ile, hazırlanan sertleşmiş geopolimer numunelerinin fiziksel özellikleri (kuru yoğunluk, doymuş kuru yüzey yoğunluk, porozite ve su emme yüzdesi) aşağıda verilen denklemlere göre hesaplanmıştır. Deneylerde kullanılan Arşimet terazisi Şekil 3.32’de sunulmuştur.

$$\text{Kuru yoğunluk} = \frac{\text{etüv kuru ağırlık}}{\text{suya doymuş ağırlık} - \text{suda ağırlık}} \quad (3.1)$$

$$\text{Doymuş kuru yüzey yoğunluk} = \frac{\text{suya doymuş ağırlık}}{\text{suya doymuş ağırlık} - \text{suda ağırlık}} \quad (3.2)$$

$$\text{Su emme kapasitesi (\%)} = \frac{\text{suya doymuş ağırlık} - \text{etüv kuru ağırlık}}{\text{etüv kuru ağırlık}} \times 100 \quad (3.3)$$

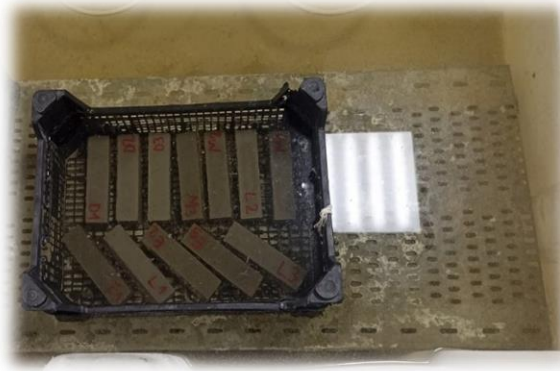
$$\text{Görünür porozite (\%)} = \frac{\text{suya doymuş ağırlık} - \text{etüv kuru ağırlık}}{\text{suya doymuş ağırlık} - \text{suda ağırlık}} \times 100 \quad (3.4)$$



Şekil 3.27. Numunelerin etüve yerleştirilmiş hali



Şekil 3.28. Soğumaya bırakılan numuneler



Şekil 3.29. Numunelerin su kürüne yerleştirilmesi

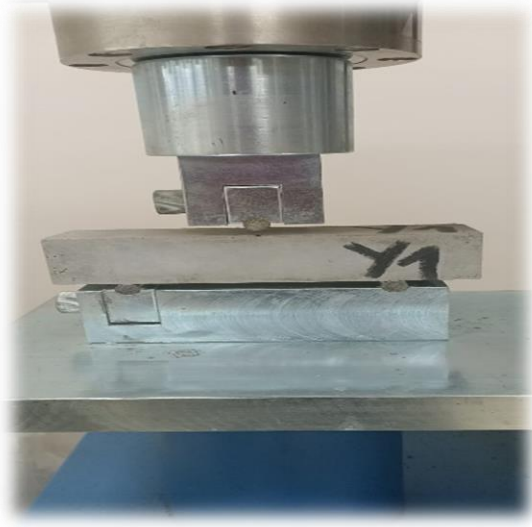


Şekil 3.30. Arşimet terazisi

3.7.2. Mekanik deneyler

3.7.2.1. Üç nokta eğilme deneyi

Eğilme dayanım deneyi 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde TS-EN 196-1 standartlarına uygun olacak şekilde yapılmıştır. Eğilme dayanımı testinde kırılan numune parçaları üzerinde daha sonra ise basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Cihaz 0,5 kN/s yükleme hızına göre ayarlanmıştır. Numune, mesnetler üzerine yerleştirilmiş ve deney süresince kırılma gerçekleşene kadar sürekli olarak yük uygulanmıştır. Kırılma anında elde edilen maksimum yük değeri not edilmiştir. Her karışım türünden üçer adet numune teste tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçların ise ortalaması alınmıştır. Eğilme dayanımı deney düzeneği Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Eğilme dayanımı deney düzeneği

3.7.2.2. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanım deneyi, eğilme deneyi sonrasında ikiye ayrılan $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki numunelerin düzgün kırılma yüzeyleri üzerine, 40×40 mm basınç başlığı kullanılarak ve TS-EN 196-1 standartlarına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Cihaz 2.4 kN/s yükleme hızına göre ayarlanmıştır. Eğilme deneyi sonucunda kırılan üç prizmanın her birinden elde edilen iki yarım parçayla toplam altı numune elde edilmiş, bu numunelerin basınç dayanımlarının ortalaması alınarak sonuçlar belirlenmiştir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.32. Basınç deneyi düzeneği

3.7.3. Durabilite deneyleri

3.7.3.1. Kılcal geçirimlilik deneyi

Numunelerin kılcal geçirimlilik deneyi TS-EN 480-5 standartlarına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harçların kılcal su geçirimliliğini belirlemek amacıyla, 40×40×160 mm boyutlarındaki prizma numunelerin yalnızca suyla temas eden yan yüzeyleri boşluk kalmayacak şekilde parafinle kaplanmış ve numuneler 24 saat süreyle su havuzunda bekletilmiştir. Süre sonunda elde edilen veriler, kılcal geçirimlilik katsayısının hesaplanmasında kullanılmıştır. Deneyde kullanılan su havuzu Şekil 3.33'te gösterilmiştir.

Kılcal geçirimlilik katsayısı aşağıdaki denklem aracılığıyla hesaplanmıştır:

$$K = Q / (A \times t^{1/2}) \quad (3.5)$$

Burada;

K: kılcal geçirimlilik katsayısı (cm/s^{1/2}),

Q: emilen su miktarı (cm³),

A: suya temas eden yüzey alanı (cm²),

t: süre (saniye)'dir.



Şekil 3.33. Kılcal geçirimlilik tayini için kullanılan su havuzu

3.7.3.2. Donma-çözülme deneyi

Deneyler için hazırlanan 40x40x160 mm boyutlarındaki kür sürelerini tamamlayan numunelerde donma-çözülme direnci deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan donma-çözülme cihazı her çevrimde 6 saat donma ve 2 saat çözülme işlemi uygulayarak toplamda 8 saatte bir tam çevrim gerçekleştirmektedir. Numuneler 32 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuş, çevrimler sonrasında oluşan kütle değişimleri değerlendirilmiştir. Numunelerin donma-çözülme cihazı içerisindeki görüntüsü Şekil.3.34’te verilmiştir.



Şekil 3.34. Numunelerin donma-çözülme cihazı içerisindeki görüntüsü

3.8. Mikroyapısal Analizler

Seçilen sertleşmiş geopolimer numuneler üzerinde, Munzur Üniversitesi Nadir Toprak Elementleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (MUNTEAM) Laboratuvarı'nda taramalı elektron mikroskobu (SEM), Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) ve X-ışını difraktometresi (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM, numunelerin mikroyapısal özelliklerini incelemek, EDS ise elementel dağılımlarını belirleyerek malzemenin bileşimini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. XRD ise, numunelerdeki mineral fazların tespiti için uygulanmıştır.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, geopolimer harç numunelerine ait sonuçlar ve ayrıca yıkıntı atığı, mermer tozu, endüstriyel atık gibi malzemelerin geopolimer harçların mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri üzerindeki etkileri sunulmuştur.

4.1. Geopolimer Numunelerin Fiziksel Özelliklerine Ait Deney Sonuçları

Fiziksel deneyler kapsamında yığın yoğunluk, görünür porozite ve su emme tayini deney sonuçları aşağıda verilmektedir.

4.1.1. Yığın yoğunluk, görünür porozite, su emme tayini deney sonuçları

Sertleşmiş geopolimer harçlar üzerinde yapılan yığın yoğunluk deney sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir. Yığın yoğunluk sonuçları incelendiğinde 100U100Y numunesine %25 MT ikamesiyle %1.02 oranında, %50 MT ikamesiyle %1.52 oranında kuru özgül ağırlığın azaldığı, doymun kuru yüzey ağırlığının ise %25 MT ikamesiyle %2.83 artış %50 MT ikamesiyle %1.38 azalış gösterdiği görülmektedir. 100U100Y numunesinin kuru özgül ağırlığı %10 oranında SD ikamesiyle %0.51, %20 SD ikamesiyle %2.54 oranında artış gözlenirken, %30 SD ikamesiyle herhangi bir değişiklik olmamıştır. Numunenin doymun kuru yüzey ağırlığının ise %10 SD ikamesiyle %2.83 oranında, %20 SD ikamesiyle %4.25, %30 SD ikamesiyle %1.89 oranında artış gözlenmiştir. En düşük kuru özgül ağırlık 1.94 oranıyla 100U50M50Y numunesinde, en düşük doymun yüzey kuru ağırlık ise 2.12 oranıyla 100U100Y numunesinde gözlenmiştir.

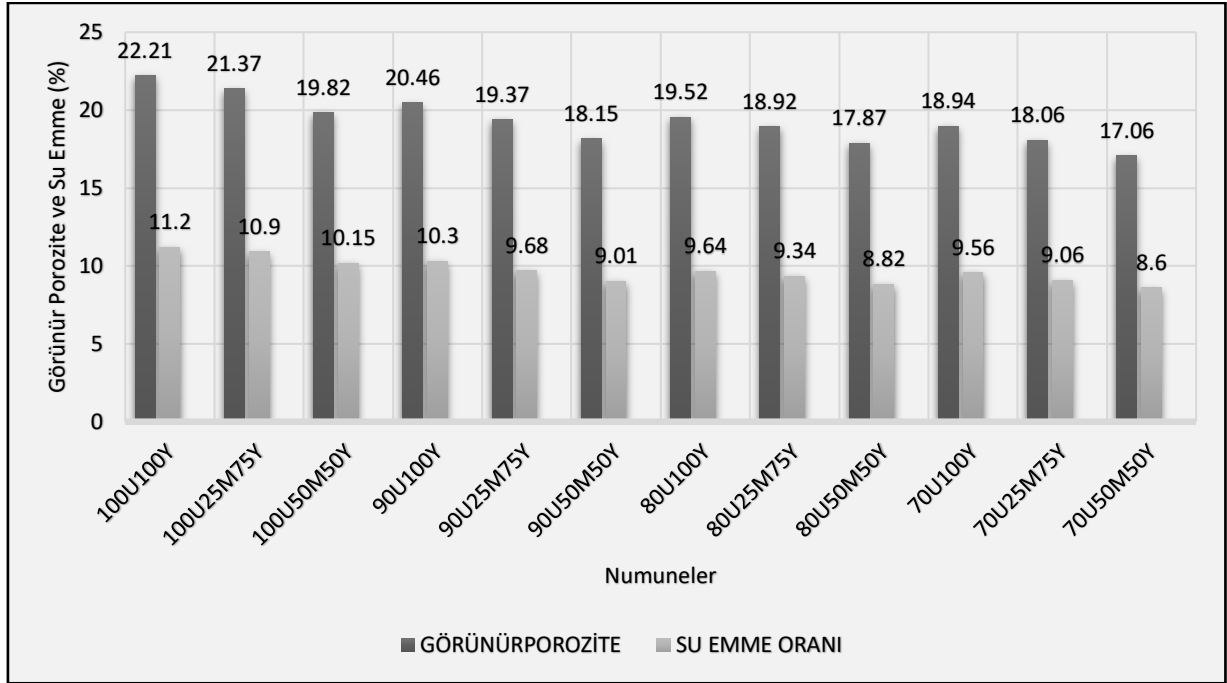
Sertleşmiş geopolimer harçların görünür porozite ve su emme yüzdelerine ilişkin deneysel veriler Şekil 4.1’de yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde su emme oranı ve görünür porozitenin birbirine paralel olduğu görülmektedir. Su emme oranı azaldıkça görünür porozitenin de azaldığı görülmektedir. Literatürde de belirtildiği gibi, malzemeler yeterli düzeyde reaksiyona girmediğinde veya matris yoğunluğu azaldığında açık gözeneklerin sayısı artar bu da su emme ve görünür poroziteyi de beraberinde artırır (Farhana ve ark., 2015). En yüksek su emme %11,2 ve görünür porozite oranı % 22,21 ile 100U100Y numunesine aittir. En düşük su emme %8,6 ve görünür porozite oranı %17,06 ile 70U50M50Y numunesine aittir. Genel olarak tüm numuneler dikkate alındığında görünür porozite oranları %17,06 –% 22,21 değerleri arasında, su emme oranları ise %8,6 - %11,2

değerleri arasında değişim göstermektedir. En yüksek su emme ve görünür porozite oranına sahip 100U100Y numunesine %25 mermer tozu (MT) ikamesiyle su emme değerlerinde %2,68 oranında, %50 MT ikamesiyle %9,37 oranında, görünür porozite değerlerinde ise %25 MT ikamesiyle %3,78 oranında, %50 MT ikamesiyle %10,76 oranında bir azalma gözlenmiştir. 100U100Y numunesinin %30 oranında silis dumanı ile yer değiştirilmesiyle elde edilen numunede su emme değerleri %14,64 oranında, %25 MT ikamesiyle %19,88 oranında, %50 MT ikamesiyle %15,27 oranında azalma gözlenmiştir. Görünür porozite değerlerinde ise %30 oranında silis dumanı ile yer değiştirilmesiyle elde edilen numunede %14,72 oranında, %25 MT ikamesiyle %15,49 oranında, %50 MT ikamesiyle %13,93 oranında azalma gözlenmiştir. Karışımlardaki uçucu kül oranı azaldıkça su emme ve görünür porozite oranı da azalmaktadır. Aynı zamanda karışımlarda mermer tozu oranı arttıkça su emme ve görünür porozite oranı azalmaktadır. Alharthy ve ark., (2022), yapmış oldukları çalışmada SEM analizlerini inceledikten sonra MT'nin boşlukları ve gözenekleri doldurma yeteneğine sahip olmasıyla geopolimer özelliklerini iyileştirdiğini belirtmiştir. Silis dumanı ikamesiyle de su emme ve görünür porozite oranlarında azalma gözlenmiştir. Sukontasukkul ve ark., (2020), bunu silis dumanının yüksek özgül yüzey alanına sahip olmasından ötürü matrislerde mikro dolgusu gibi davranarak karışımlardaki boşlukları doldurup su emme miktarını azaltabilmesi özelliğine atfetmiştir. Khater (2013)' de silis dumanı ile ürettiği geopolimer beton numunelerinde benzer sonuçlar bulmuş, silis dumanı oranı arttıkça su emme oranının azaldığını gözlemlemiştir. İnşaat yıkıntı atığı olan beton agregasının azalması da yine aynı şekilde su emme ve görünür porpzitede azalma sağladığını gözlemlemiştir. Yine benzer şekilde Rostami ve Behfarnia, (2017), üretmiş oldukları geopolimer numunelerin görüntülerinde, silis dumanı ilavesinin hem gözenekleri doldurduğunu hem de matristeki parçacıklar arası boşluklarda CSH jeli oluşturduğunu gözlemlemiştir. Dolayısıyla SD ikamesinin poroziteyi azaltıp aynı zamanda da durabilitesini ve mekanik özelliklerini iyileştirebileceğini vurgulamışlardır. Sukontasukkul ve ark., (2020), yapmış olduğu çalışmada geri dönüştürülmüş beton agregaların ilavesiyle su emme değerlerinde artış gözlemlemiştir. Bunun sebebi olarak geri dönüştürülmüş agregalardaki harçta bulunan boşluklar gözeneklerin oluşmasına sebebiyet verdiğini ve doğal agregalara kıyasla daha pürüzlü yapıya sahip olduklarından ötürü daha fazla boşluk ve su emilimine neden olduğunu vurgulamışlardır. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde az gözenekli ve daha düşük geçirgenliğe sahip geopolimer matrisleri, iyi reaksiyon gösteren geopolimerizasyonlara sebebiyet vermektedir. Yılmazoğlu (2025),

yapmış olduğu çalışma doğrultusunda porozitenin düşük olmasının malzemenin su geçirgenlik özelliğini sınırlandırdığını ve su emme kapasitesini de azalttığını vurgulamıştır. Bu sonuçlar neticesinde düşük porozitenin malzemenin suya karşı daha dayanıklı ve betonun da uzun ömürlü olduğu kanısına varmıştır.

Tablo 4.1. Geopolimer harçların kuru ve doymun kuru yüzey yoğunluk değerleri

NUMUNE	YIĞIN YOĞUNLUK	
	Kuru Yoğunluk (g/cm ³)	Doymun Kuru Yüzey Yoğunluk (g/cm ³)
100U100Y	1.97	2.12
100U25M75Y	1.95	2.18
100U50M50Y	1.94	2.15
90U100Y	1.98	2.18
90U25M75Y	1.99	2.18
90U50M50Y	2.01	2.19
80U100Y	2.02	2.21
80U25M75Y	2.02	2.21
80U50M50Y	2.02	2.20
70U100Y	1.97	2.16
70U25M75Y	1.99	2.17
70U50M50Y	1.97	2.14



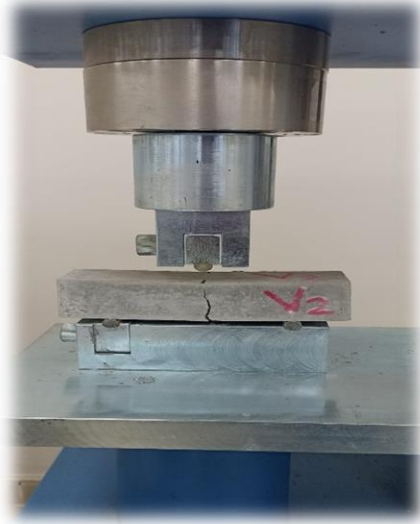
Şekil 4.1. Geopolimer harçların görünür porozite ve su emme yüzdesi değerleri

4.2. Geopolimer Numunelerin Mekanik Özelliklerine Ait Deney Sonuçları

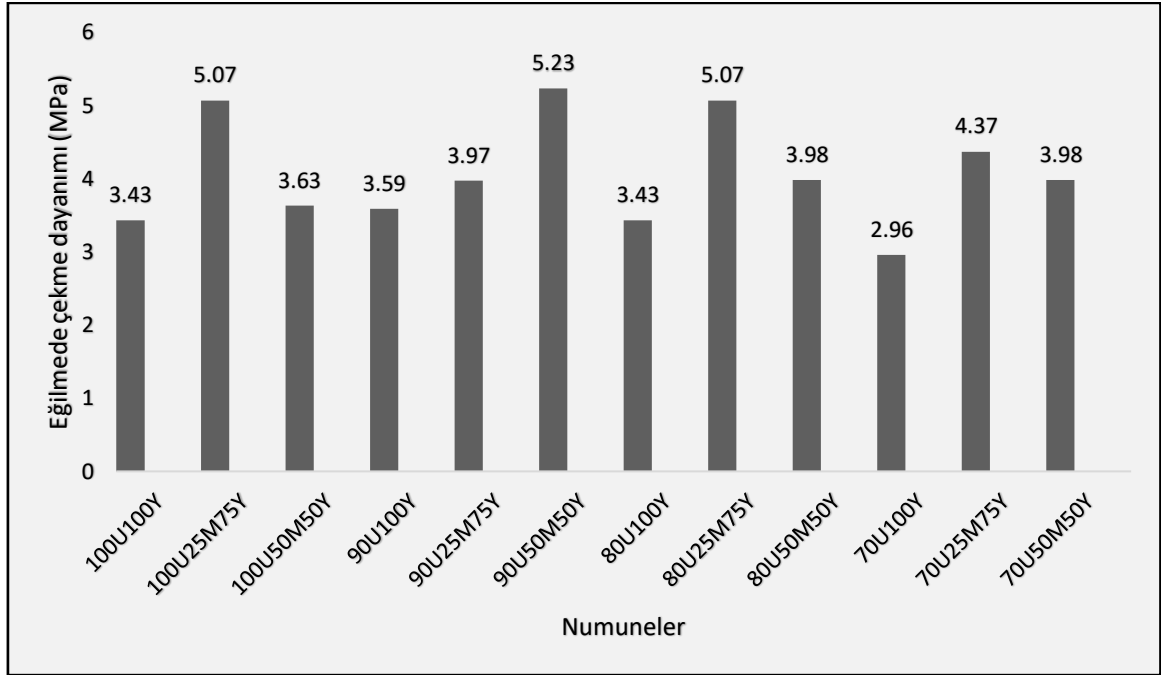
4.2.1. Eğilmede çekme deneyi sonuçları

Sertleşmiş geopolimer harçlara uygulanan eğilmede çekme deneyi Şekil 4.2’de gösterilmekte, elde edilen eğilmede çekme dayanımı sonuçları ise Şekil 4.3’te verilmektedir. Geopolimer beton numunelerinden elde edilen eğilmede çekme deneyi sonuçları incelendiğinde mermer tozu ilavesinin %0-%25 oranı arasında artışa, %25 oranı sonrasında eğilmede çekme dayanımında azalmalara sebep olduğu gözlenmiştir. Singhal ve ark., (2021), ince agrega yerine kullanılan mermer tozunun ince yapısı sayesinde dolgu etkisi yaratıp boşlukları doldurmasıyla eğilme dayanımında artış gösterdiğini, ancak %25 MT ikamesi sonrasında ince yapısı sebebiyle betondaki gözenekleri arttırıp eğilme dayanımında azalma gösterdiğini vurgulamıştır. Lim ve ark., (2021), yine aynı şekilde MT’nin optimum seviyesinin üstüne çıkılmasıyla matriste bulunan yüksek CaO miktarının fazla su gereksinimi sebebiyle uygunsuz hidrosyon ile eğilme dayanımında düşüklere sebep olduğunu belirtmişlerdir. Yalnızca %10 silis dumanı içeren 90U50M50Y numunesinde %25 mermer tozu ilavesi sonrasında da artış gözlenmiştir. Hazırlanan geopolimer beton numunelerinde en yüksek eğilmede çekme dayanım sonucunu 90U50M50Y numunesi 5,23

MPa olarak vermiştir. En düşük eğilmede çekme dayanım sonucunu ise 70U100Y numunesi 2,96 MPa olarak vermiştir. Hazırlanan 100U100Y geopolimer numunesine %25 oranında MT ikamesiyle eğilmede çekme dayanımında %47,81 oranında artış, %50 MT ikamesiyle %5,83 oranında artış gözlenmiştir. 100U100Y geopolimer numunesine %10 oranında SD ikamesi %4,66 oranında artışa, %20 oranında silis dumanı ikamesi eğilmede çekme dayanımında herhangi bir değişiklik oluşturmazken, %30 silis dumanı ikamesiyle %13,70 oranında bir azalışa sebep olmuştur. Skvara ve ark., (2006), çalışmaları kapsamında geopolimer karışımındaki sodyum hidroksit içeriğinin ve $\text{SiO}_2 / \text{NaO}_2$ oranının dayanımı etkilediği kanısına varmışlardır. Dutta ve ark., (2010), silis dumanı ikameli geopolimer beton üretimi sonucunda, eğilmede çekme dayanımında ilk etapta artış, SD ikamesi arttıkça da azalış gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni olarak da artan SD miktarının tam çözünmesi için gerekli olan sodyum oksitinin bulunmaması olarak belirtmişlerdir. Bu sebepten ötürü SD'nin bir kısmı geopolimer jelinde reaksiyona girmeden kalarak dayanımın düşmesine olanak tanımıştır. 100U25M75Y numunesine %20 oranında silis dumanı ile yer değiştirmesi eğilmede çekme dayanımında herhangi bir değişiklik oluşturmazken, %30 silis dumanı ile %13,81 oranında azalışa sebep olmuştur. 100U50M50Y numunesinin %10 silis dumanı ile yer değiştirmesi eğilmede çekme dayanımında %44,08 oranında artışa sebep olmuştur. Genel olarak sonuçlara bakıldığında Mermer tozu ikamesi %25 oranında arttırılmasıyla dayanımında artışa neden olurken, %25 sonrasında dayanımlarda ciddi düşüşlere sebep olmaktadır.



Şekil 4.2. Eğilmede çekme dayanımı deneyi sonrasında kırılan geopolimer harç numunesi



Şekil 4.3. Eğilmede çekme deneyi sonuçları

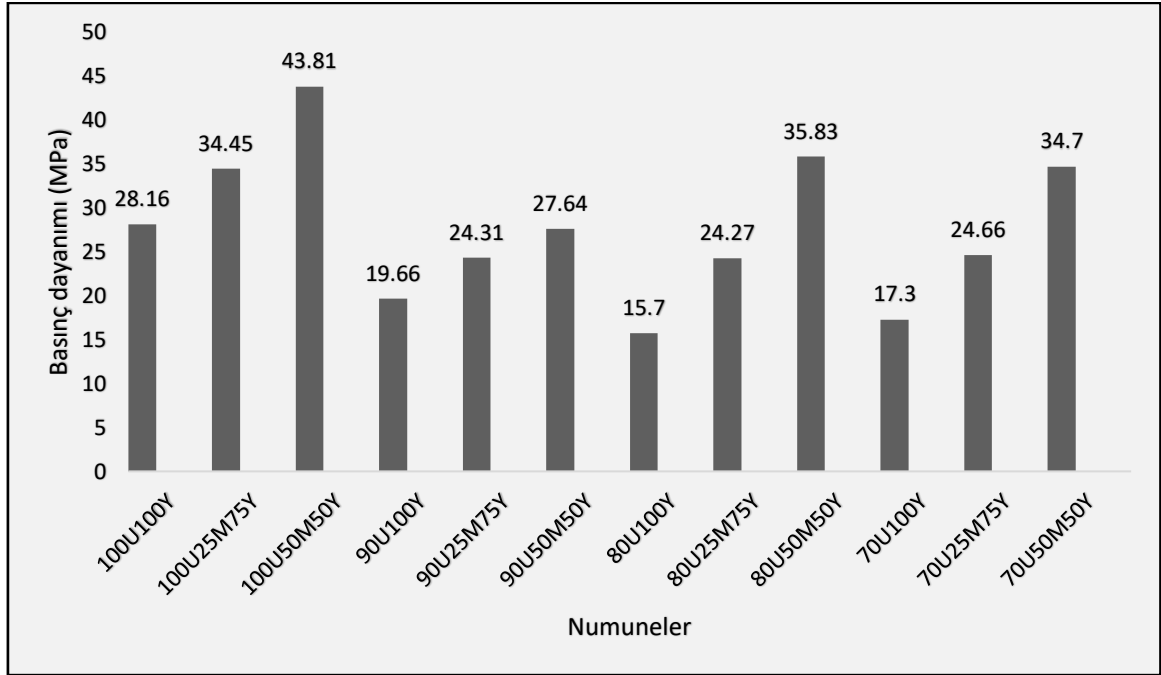
4.2.2. Basınç dayanımı deney sonuçları

Şekil 4.4'te basınç dayanımı deneyi sonrasında kırılan geopolimer harç numunesi görülmekte, Şekil 4.5'de ise basınç dayanımı sonuçları sunulmaktadır. Geopolimer beton numunelerinden elde edilen basınç dayanım değerleri incelendiğinde tüm numunelerde mermer tozu ilave oranı arttıkça basınç dayanımında da artış gözlenmiştir. Yine aynı şekilde Singh ve Mehta (2021), yapmış oldukları çalışmada mermer tozunun %10 ile %50 oranında ikamesiyle basınç dayanımlarında artış elde etmişlerdir. Lim ve ark., (2021), yapmış oldukları çalışmada mermer tozunun %50 ikamesine kadar basınç dayanımında artış olduğunu, %75 ve %100 oranlarında MT ikamesiyle basınç dayanımında azalma olduğunu gözlemlemiş olmalarına rağmen yine de %100 ikamesinde bile 25 MPa'dan büyük sonuçlar elde etmişlerdir. Bunun sebebini de mermer tozundaki CaO'nun su ile reaksiyona girerek CSH, CASH ve NASH jellerini oluşturup ana matrise bağlanabileceğine bağlamışlardır. Fakat MT %50 üzerine çıkarıldığında aşırı hidratasyon ısısı çıkarması sebebiyle çatlakların oluşabilmesinden ötürü düzgün ve yoğun matrisin bozulup dayanımlarda düşüşlere sebep olabileceğini de belirtmişlerdir. Silis dumanı ikame oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Uçucu kül bazlı alkali aktive edilmiş geopolimer harcına silis dumanı ilave etmek mekanik özellikleri iyileştirebilir fakat silis dumanı

optimum seviyenin yani %10 oranının üzerine çıkınca, aşırı miktarda SiO_2 alkali aktive edilmiş bağlayıcıda çatlamaya ve genişlemeye neden olduğundan basınç dayanımında azalma etkisi gösterir (Aghajanzadeh ve ark., 2024). Sukontasukkul ve ark., (2020), yapmış oldukları çalışmada nuuneleri uçucu kül ile silis dumanı oranını 100/0 ile 70/30 arasında yer değiştirerek hazırlamışlardır ve en iyi sonuçları 90/10 yani %10 oranında silis dumanı içeren numuneden elde ederek literatürü desteklemişlerdir. Gülmez, (2018), yapmış olduğu çalışma doğrultusunda SD ikamesinin belirli bir orana kadar kullanılmasının geopolimer harçlarda iyileştirme sağlayabileceği gibi, belli bir orandan sonra porozite ve kılcal geçirimliliğin artışına sebep olmasından ötürü mekanik özelliklerde azalma gösterdiği kanısına varmıştır. Yine aynı şekilde Memon ve ark., (2013), silis dumanı ikamesinin %10 oranına kadar iyileştirdiği yönünde çalışma bulguları elde etmişlerdir. Hazırlanan geopolimer numunelerde en yüksek basınç dayanımını 100U50M50Y numunesi 43,81 MPa olarak vermiştir. En düşük basınç dayanımını ise 80U100Y numunesi 15,7 MPa olarak vermiştir. Hazırlanan 100U100Y numunesi %10 oranında silis dumanı ile yer değiştirdiğinde basınç dayanımında %30,18 oranında, %20 ile %44,25 oranında, %30 ile %38,57 oranında düşüş gözlenmiştir. Silis dumanı ikamesiz üretilen numuneye %50 MT ikamesi %55,58 oranında, en düşük dayanımı veren 80U100Y numunesine %50 MT ikamesi ile basınç dayanımında %128,22 oranında artış gözlenmiştir.



Şekil 4.4. Basınç dayanımı deneyi sonrasında kırılan geopolimer harç numunesi



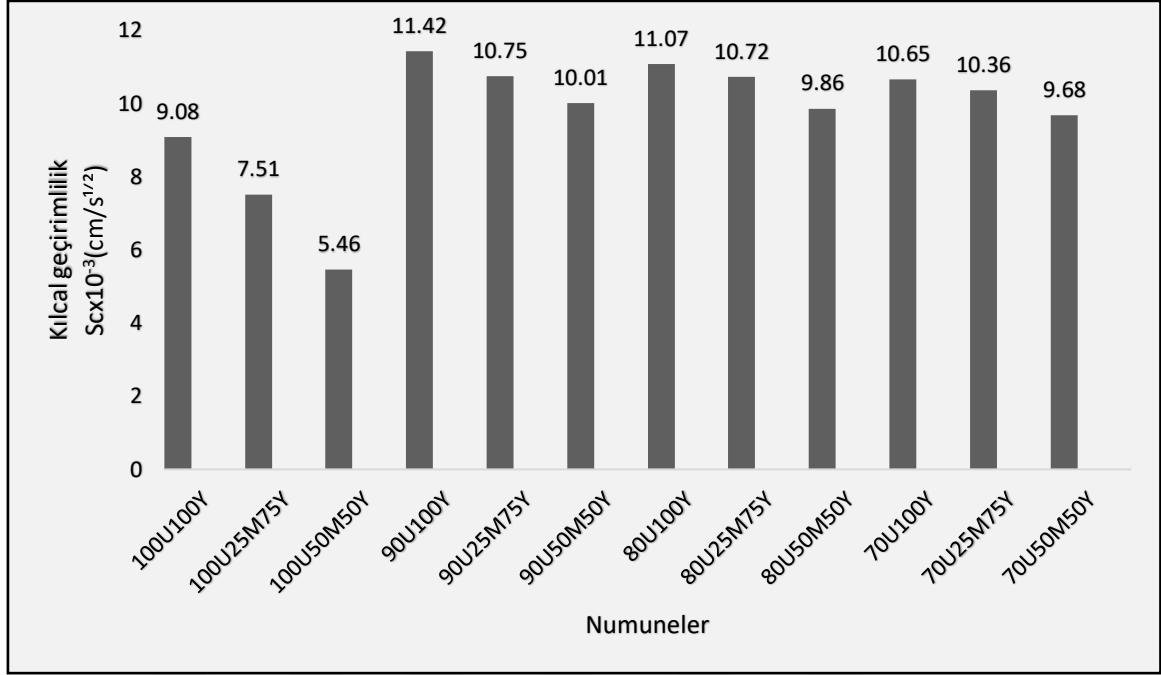
Şekil 4.5. Basma dayanımı sonuçları

4.3. Geopolimer Numunelerin Durabilite Özelliklerine Ait Deney Sonuçları

4.3.1. Kılcal geçirimlilik deney sonuçları

Şekil 4.6’da sertleşmiş geopolimer harçlara ait kılcal geçirimlilik deneyi verileri sunulurken, Şekil 4.7’de ise deney sonrasında numunelerin görünümü gösterilmektedir. Geopolimer numunelerden elde edilen kılcal geçirimlilik deney sonuçları genel olarak incelendiğinde mermer tozu ikamesi arttıkça kılcal geçirimlilikte düşüşler gözlenmiştir. Aliabdo ve ark., (2014), mermer tozunun yüksek oranda kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeren ve ince taneli bir mineral katkı malzemesi olması özellikleriyle matris içindeki boşlukları fiziksel olarak doldurduğunu, kapiler gözeneklerin hacmini ve sürekliliğini azalttığını belirtmişlerdir. Yine aynı şekilde Tayeb ve ark., (2011) yapmış oldukları çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonlarda MT’nin gözenek hacmini küçülterek kılcal su geçişini sınırlandırdığını gözlemlemişlerdir. En düşük kılcal geçirimliliğe sahip numune silis dumanı ikamesi olmayan ve en yüksek basma dayanımı değerini veren 100U50M50Y numunesi iken

en yüksek kılcal geçirimliliğe sahip numune 90U100Y numunesi olarak tespit edilmiştir. Mehta ve Siddique, (2017) kılcal geçirimlilik oranı düştükçe basınç dayanımının artacağını belirtmişlerdir. SD ikamesi olmayan 100U100Y numunesine %10 SD ikamesi kılcal geçirimlilikte %25,77 oranında, %20 SD ikamesi %21,92 oranında, %30 SD ikamesi %17,29 oranında bir artışa neden olmuştur. 100U50M50Y numunesine %10 SD ikamesi kılcal geçirimlilikte %83,33 oranında, %20 SD ikamesi %80,59 oranında, %30 SD ikamesi ise %77,29 oranında artışa sebep olmuştur. SD ikamesi genel olarak numunelerin kılcal geçirimliliğinde artışa sebep olmuştur. Silis dumanının yüksek oranda amorf SiO₂ bulundurulması, erken yaşta yüksek miktarda suya ihtiyaç duyulmasına neden olabilir ve bu ihtiyaç duyulan su yeterli miktarda bulunmazsa tam geopolimerleşme sağlayamaz ve gözenekli yapı gelişir. Dolayısıyla SD ikamesinin yüksek oranlarda kullanılması, bağ yapısının zayıflaması, mikro çatlak oluşumu ve homojen olmayan jelleşme gibi faktörler sayesinde kılcal geçirimliliği arttırabilir (Temuujin ve ark., 2009). Diğer numunelere kıyasla sadece UK ile üretilen serilerin MT ikameli ve ikamesiz haliyle de en düşük kılcal geçirimlilik değerleri gözlenmiştir. Amran ve ark., (2021), bunun sebebini uçucu külün geçirgenliği ve gözenekliliği azaltarak dayanıklılığı arttırması özelliğine atfetmişlerdir. Yine aynı şekilde Wongpa ve ark., (2010), çözelti/UK oranı azaldıkça geçirimliliğin de azaldığını vurgulamışlardır. En düşük kılcal geçirimliliğe sahip serilerin çözelti/UK oranı, diğer serilere kıyasla en düşük orana sahiptir. Bu çalışmada da uçucu kül azaldıkça çözelti/UK oranı arttığından ötürü kılcal geçirimlilikte artış gözlenmiştir.



Şekil 4.6. Kılcal geçirimlilik deney sonuçları



Şekil 4.7. Kılcal geçirimlilik deney sonrası numuneler

4.3.2. Donma-çözülme deney sonuçları

Donma-çözülme deneyine tabi tutulan geopolimer harç numunelerinin deney öncesi ve sonrası görünüşleri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da sunulmuştur. Tablo 4.2’de donma-çözülme deneyi öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri verilmiştir. Görsele bakıldığında

100U50M50Y ve 100U25M75Y numunelerinin hasarlı olduğu anlaşılmaktadır. 100U100Y numunesinin ise dağıldığı görülmektedir. Tamamen dağılan ve silis dumanı ikamesi bulunmayan ve aynı zamanda su emme oranı en yüksek olan 100U100Y serisi %41,55 oranında ağırlık kaybına uğramıştır. Farhana ve ark., (2015), su emme oranı ve gözenekliliği yüksek olan numunelerin dayanıklılığının daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Dolayısıyla dağılan ve hasar gören numunelerin, dayanıklılık gösteremeyip ağırlık kaybına uğramış olmalarını en yüksek su emme oranlarına sahip olmalarına atfedilebilir. Hasar gören ve aynı zamanda en yüksek su emme değerini takip eden 100U50M50Y serisi %3,88 ve 100U25M75Y serisi %2,32 oranında ağırlık kaybına uğramıştır. Bunların aksine MT ve SD ile üretilmiş 90U50M50Y, 80U100Y, 80U25M75Y, 80U50M50Y, 70U100Y, 70U25M75Y, 70U50M50Y serileri ise sırasıyla %0,07, %0,04, %0,17, %0,29, %0,07, %0,32 ve %0,11 oranında ağırlık kaybına uğrayarak donma-çözülme etkilerine karşı oldukça dirençli oldukları gözlemlenmiştir. Genel olarak sonuçlar incelendiğinde, yalnızca silis dumanı ikamesi olmayan serilerde hasarlar gözlenmiştir. Mermer tozu ikamesinin bulunmadığı seri ise tamamen dağılmıştır. Sonuç olarak MT ve SD ikamesinin numunelerin zorlu koşullarda iyi performans göstermesi için olumlu katkılar sunduğu söylenebilir.



Şekil 4.8. Numunelerin donma-çözülme deneyi öncesi görüntüsü



Şekil 4.9. Numunelerin donma-çözülme deneyi sonrası görüntüsü

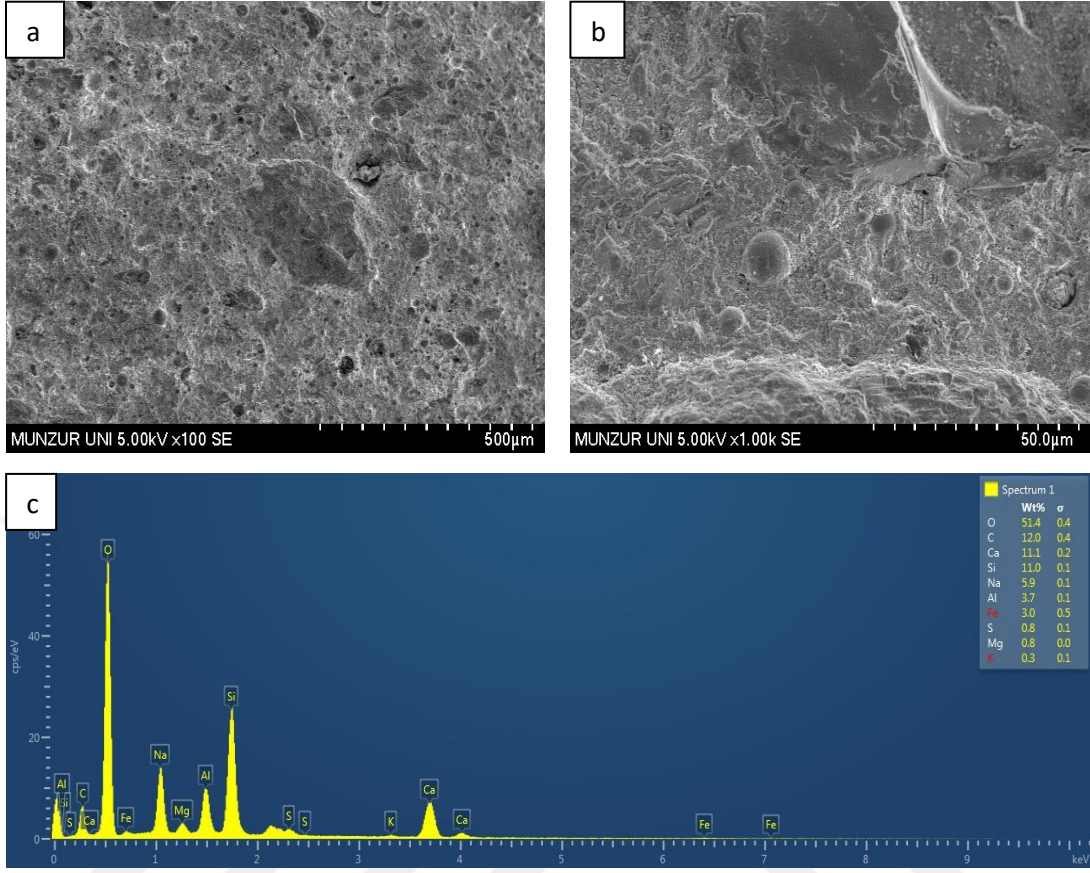
Tablo. 4.2. Numunelerin donma-çözülme deney öncesi ve sonrası ağırlık ölçümleri

NUMUNE	DENEY ÖNCESİ AĞIRLIK (gr)	DENEY SONRASI AĞIRLIK (gr)
100U100Y	569,86	348,83 (dağıldı)
100U25M75Y	566,29	553,16
100U50M50Y	557,46	535,83
90U50M50Y	564,42	564
80U100Y	563,24	563
80U25M75Y	560,28	559,33
80U50M50Y	553,58	552
70U100Y	564,39	564
70U25M75Y	564,30	562,5
70U50M50Y	553,63	553

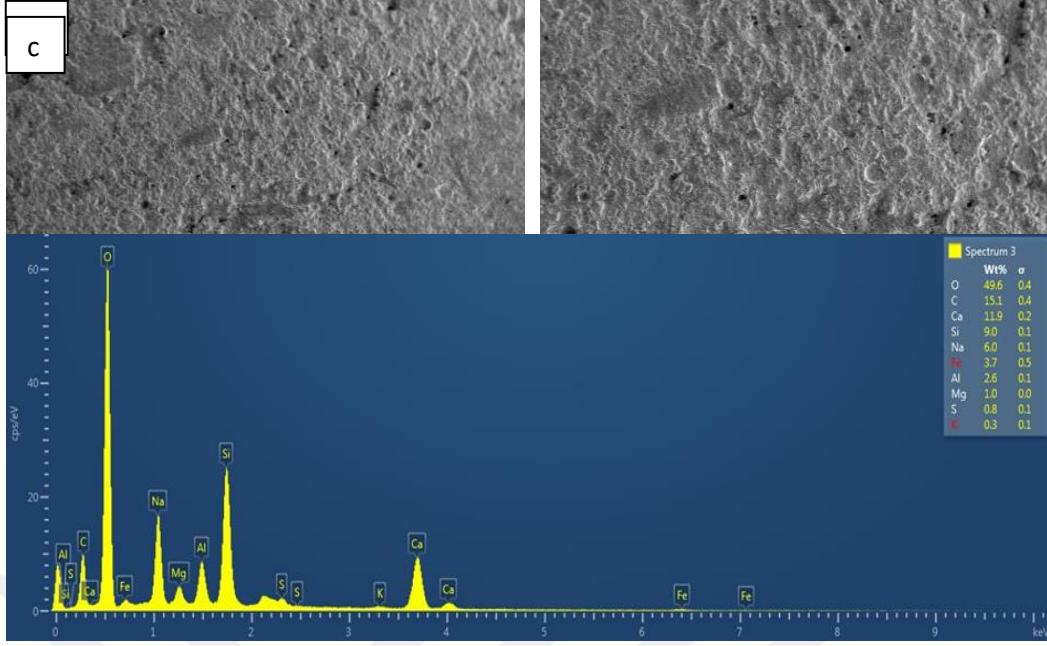
4.4. Geopolimer Numunelerinin SEM/EDS Analizi Sonuçları

Şekil 4.11’de 100U50M50Y numunesine ait 10x ve 100x büyütmedeki SEM görüntüleri ile EDS analiz sonuçları; Şekil 4.12’de 80U50M50Y numunesinin 50x ve 100x

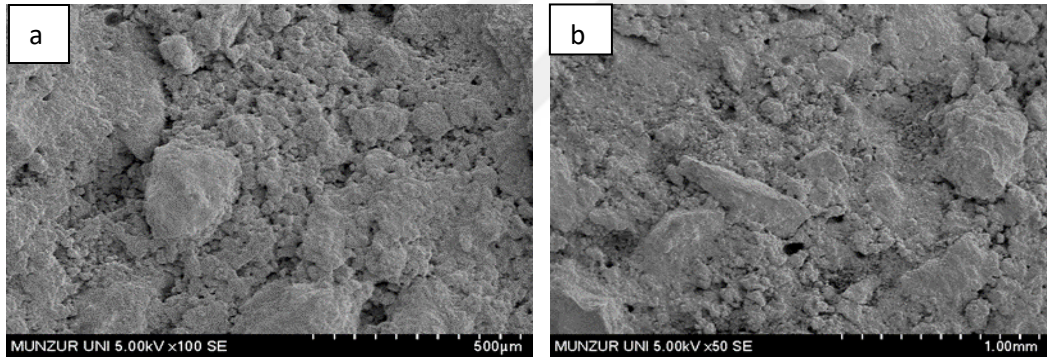
büyütmedeki SEM görüntüleri ile EDS verileri; Şekil 4.13’de ise 80U100Y numunesine ait 50x ve 100x büyütmede elde edilen SEM görüntüleri ile EDS analiz sonuçları sunulmuştur. 100U50M50Y numunesi en yüksek basınç dayanımını vermesine rağmen, Şekil 4.12 incelendiğinde tam olarak aktive olamamış uçucu kül taneciklerine rastlanılmaktadır. Uçucu külün XRD analizi sonucu hakim fazların Mullit ve Kuvars olduğuna rastlanılmıştır. Kore ve Vyas (2016), yapmış oldukları çalışma doğrultusunda SEM analizlerini incelemişler ve numunede mermer tozunun yüksek CaO içermesinden kaynaklanan kalsiyum magnezyum karbonat yani dolomite rastlamışlardır. Yüksek CaO’nun alkali aktive edilmiş betonlarda CASH ve NASH jellerine ek olarak CSH jellerinin de oluşumuna yol açtığını ve bu jellerin bileşenler arasındaki bağ yapısını iyileştirip yüksek dayanımlara sebep olduğunu vurgulamışlardır. SEM analizleri neticesinde de MT’nin dolgu etkisi gösterdiğini ve yoğun bir yapı oluşturduğunu vurgulamışlardır. Li ve ark., (2019), geopolimer üretiminde yine aynı şekilde düşük kalsiyum içerikli (metakaolin, F sınıfı uçucu kül) malzemelerin kullanımıyla N-A-S-H jellerinin oluştuğunu, yüksek kalsiyum içerikli (C sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu) malzemelerin kullanımı ile de C-A-S-H jellerinin oluştuğunu ve bu jellerin geopolimer betonunun mekanik özelliklerini belirlediğini vurgulamışlardır. 100U50M50Y numunesinde O, C, Ca, Si, Na, Al, Fe, S, Mg, K elementlerinin ağırlık dağılımı sırasıyla %51.4, 12.0, 11.1, 11.0, 5.9, 3.7, 3.0, 0.8, 0.8, 0.3 olarak tespit edilmiştir. EDS analiz sonuçlarına göre 100U50M50Y numunesinin temel elementlerinin O, C ve Ca olduğu görülmüştür. 80U50M50Y numunesinde O, C, Ca, Si, Na, Fe, Al, Mg, S, K elementlerinin ağırlık dağılımı sırasıyla %49.6, 15.1, 11.9, 9.0, 6.0, 3.7, 2.6, 1.0, 0.8, 0.3 olarak tespit edilmiştir. EDS analiz sonuçlarına göre 8050M50Y numunesinin temel elementlerinin O, C, Ca olduğu görülmüştür. 80U100Y numunesinde O, Na, C, Si, Ca, Al, S, Fe, Mg, K elementlerinin ağırlık dağılımı sırasıyla %48.8, 21.0, 15.3, 7.3, 3.3, 1.6, 1.1, 0.9, 0.4, 0.2 olarak tespit edilmiştir. EDS analiz sonuçlarına göre 80U100Y numunesinin temel elementlerinin O, Na, C olduğu görülmüştür.



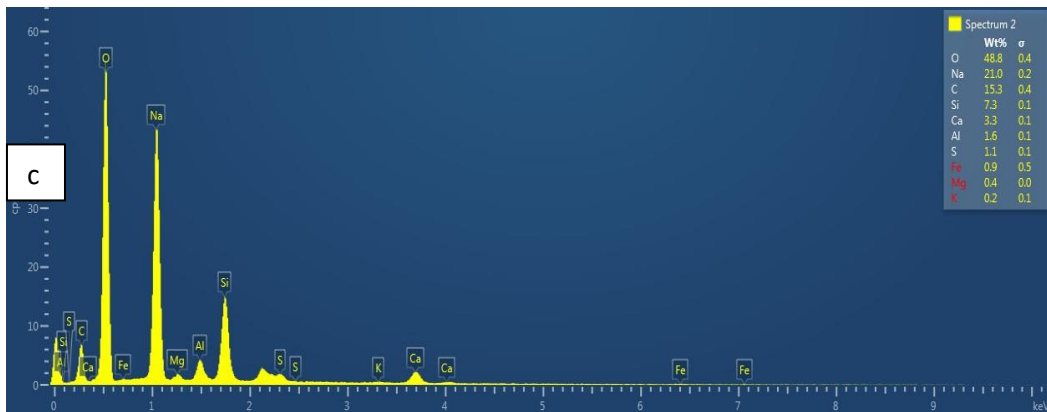
Şekil 4.10. 100U50M50Y numunesine ait (a) 100x büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) 1000x büyütmedeki SEM görüntüsü ve (c) EDS analiz sonuçları



Şekil. 4.11. 80U50M50Y numunesine ait (a) 50x büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) 100x büyütmedeki SEM görüntüsü ve (c) EDS analiz sonuçları



Şekil. 4.12. 80100Y numunesine ait (a) 100x büyütmedeki SEM görüntüsü, (b) 50x büyütmedeki SEM görüntüsü ve (c) EDS analiz sonuçları



5. SONUÇ

Sunulan çalışmada, inşaat yıkıntı atığı (YA) ve mermer tozunun (MT) geopolimer harçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hazırlanan harç karışımlarında bağlayıcı olarak uçucu kül (UK) ve silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Karışımlarda SD, UK'nın ağırlıkça %0, %10, %20, %30 oranında yer değiştirmesiyle hazırlanmıştır. Yapılan çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Karışımlardaki uçucu kül oranı azaldıkça su emme oranı da azalmıştır.
- Karışımlardaki uçucu kül oranı azaldıkça görünür porozite oranı azalmıştır.
- En düşük su emme ve görünür porozite oranı 70 UK+ 50 MT+ 50 YA numunesine aittir.
- Eğilmede çekme deneylerinde en yüksek sonuç 90 UK+ 50 MT+ 50 YA numunesine aittir.
- Silis dumanı arttıkça eğilmede çekme dayanımında artış gözlenmiştir fakat belli bir orandan sonra tekrar düşüş göstermeye başlamıştır. En düşük eğilmede çekme dayanımı ise 70 UK+ 100 YA numunesine aittir. Yine aynı şekilde silis dumanı ile paralel olacak şekilde mermer tozu da arttıkça eğilmede çekme dayanımı artmıştır fakat belli bir orandan sonra düşüş gözlemlenmektedir.
- Basınç dayanımı deneyinde en yüksek sonuç 100 UK+ 50 MT+ 50 YA numunesine aittir. Silis dumanı oranı arttıkça da basınç dayanımında düşüş gözlemlenmektedir fakat %30 silis dumanı ilavesinden sonra değerlerde tekrardan yükseliş gözlenmektedir.
- Basınç dayanımı deneylerinde atık mermer tozunun oranı arttıkça tüm numunelerde artış gözlenmektedir.
- Donma-çözülme deneyinde gözlemlenen hasarlar silis dumanı oranı %0 olan numunelere aittir.

6. ÖNERİLER

Yapılan deneysel sonuçlar, inşaat yıkıntı atıkları ve mermer tozunun geopolimer beton ve harç üretiminde kullanılabileceğini göstermektedir. Silis dumanı, uçucu kül ve mermer tozu gibi bileşenler, geopolimer harcın fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. Ancak, performansın daha da iyileştirilmesi için mermer tozu ve silis dumanının farklı oranlarda kombinasyonu, alkali aktivasyon oranlarının optimizasyonu ve kür süresinin arttırılması gibi stratejiler önerilmektedir. Ayrıca, bileşenlerin etkileşimlerini anlamak için mikroyapısal analizlerin derinleştirilmesi ve uzun vadeli dayanıklılık testlerinin yapılması gerekmektedir. Bu testler, çevresel etkilere karşı betonun performansını değerlendirerek daha sağlam ve uzun ömürlü malzemeler elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

7. KAYNAKLAR

- Acar, M. C., Şener, A., Özbayrak, A., & Çelik, A. İ.** (2020). Geopolimer Harçlarda Zeolit Katkısının Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 820-832.
- Aghajanzadeh, I., Ramezaniapour, A. M., Amani, A., & Habibi, A.** (2024). Mixture optimization of alkali activated slag concrete containing recycled concrete aggregates and silica fume using response surface method. *Construction and Building Materials*, 425, 135928.
- Alakara, E. H.** (2022). İnşaat yıkıntı atıklarından elde edilen atık tuğlaların geopolimer harçlarda kullanımının incelenmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 11(3), 251-259.
- Alharthy, S. E., Hodhod, O. A., & Abdelkadir, B. A.** (2022). Developing a geopolymers pastes using marble dust. *Water Science*, 36(1), 144-153.
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Auda, E. M.** (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and building materials*, 50, 28-41.
- Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T.** (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270, 121857.
- Annakoa, M. A. I.** (2019). Geopolimer betonda cam tozu kullanımının araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Kastamonu üniversitesi, Kastamonu, 83s.
- Aruntaş, H.** (2006). Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(1), 193-204.
- Atabey, İ. İ.** (2017). F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması. *Doktora tezi*, Erciyes üniversitesi, Kayseri, 200s.
- Atabey, İ. İ., & Oztürk, Z. B.** (2021). Seramik sağlık gereci atıklarının geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(1), 212-219.
- Atabey, İ. İ., Karahan, O., Bilim, C., & Atiş, C. D.** (2020). The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 264, 120268.
- Atiş, C. D., Bilim, C., Çelik, Ö., & Karahan, O.** (2009). Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construction and building materials*, 23(1), 548-555.
- Ayşe, E. S. E. R., Oztürk, Z. B., Atabey, İ. İ., & Çelikten, S.** (2024). Uçucu kül ve farklı seramik sektörü atıklarının kullanımı ile üretilen geopolimer harçların dayanım

özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 1-1.

Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 113-120.

Bajpai, R., Choudhary, K., Srivastava, A., Sangwan, K. S., & Singh, M. (2020). Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120147.

Bayram, U. (2023). Geri kazanılmış agregaların geopolimer sistemlerde kullanımının araştırılması. *Yüksek lisans tezi*, Erciyes üniversitesi, Kayseri, 109s.

Binici, H., Eken, M., & Aksoğan, O. (2012). Cüruf, uçucu kül, silis kumu ve pomza esaslı geopolimerlerin fiziksel, mekanik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2), 12-25.

Ceylan, H. (2000). Mermer fabrikalarındaki mermer toz atıklarının ekonomik olarak değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 53s.

Chishi, A. K., & Gautam, L. (2023). Sustainable use of silica fume in green cement concrete production: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(7), 195.

Çelikten, S., Baran, B., & Oztürk, Z. B. (2024). Uçucu kül ve perlit esaslı geopolimer harçlarda çömlek sır atığı ikamesinin yüksek sıcaklık dayanıklılığı üzerindeki etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 1326-1334.

Çınar, M. (2019). An investigation of fresh and hardened properties of cementitious grout made with combined use of waste marble powder and fly ash. *Ph.D. Thesis*, Hasan Kalyoncu University, Gaziantep, 190s.

Davidovits, J. (2008). They built the pyramids, published by institute geopolimer. *Saint Quentin*, France.

Davidovits, J. (2008). *Geopolymer chemistry and applications*. Geopolymer Institute.

Demir, İ., & Başpınar, M. S. (2003). Mermer tozu artıklarının (havuz çökeltisi) hafif yapı blokları üretiminde kullanılması. *Türk/Ye İv. Mermer Sempozyumu (Mersem'2003) Bildiriler Kitabı*, Afyon, 18-19 Aralık 200.1.

Dutta, D., Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2010). Effect of silica fume additions on porosity of fly ash geopolymers. *J. Eng. Appl. Sci*, 5(10), 74-79.

Ekinci, E., & Türkmen, İ. (2021). Farklı aktivatör ve ham madde değişkenlerinin geopolimer hamurun basınç dayanımına etkisinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 169-175.

- Eryılmaz, K., Polat, R., Turhan, D., & Karagöl, F.** (2023). Geopolimer beton atıklarından elde edilen agregaların geopolimer betonda kullanılabilirliğinin araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 419-431.
- Eryılmaz, K., Polat, R., Turhan, D., & Karagöl, F.** (2023). Geopolimer beton atıklarından elde edilen agregaların geopolimer betonda kullanılabilirliğinin araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 419-431.
- Farhana, Z. F., Kamarudin, H., Rahmat, A., & Al Bakri, A. M.** (2015). The relationship between water absorption and porosity for geopolimer paste. *In Materials Science Forum* (Vol. 803, pp. 166-172). Trans Tech Publications Ltd.
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A.** (2003). Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 82(18), 2259-2265.
- Gagg, CR** (2014). Mühendislik malzemesi olarak çimento ve beton: Tarihsel bir değerlendirme ve vaka çalışması analizi. *Mühendislik Arıza Analizi*, 40, 114-140.
- Girgin, S.** (2016). NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 81s.
- Görür, E. B.** (2015). Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması. *Doktora Tezi*, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 159.
- Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., & Mordoğan, H.** (2005). Uçucu küllerin özellikleri ve kullanım alanları. *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı*, İzmir, 09-12 Haziran, 419-423s.
- Gülmez, N.** (2018). Bağlayıcı ve agrega olarak kullanılan endüstriyel atıkların geopolimer harçların özellikleri üzerine etkisi. *Doktora Tezi*, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 198s.
- Gümüş, A.** (2016). Geopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi. *Yüksek lisans tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 84s.
- Güzelküçük, S., & Demir, İ.** (2019). Perlit esaslı geopolimer kompozitlere kür süresi ve sıcaklığın etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(2), 730-737.
- Hamalı, Y.** (2007). Metakolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 54s.
- Helmy, A. I. I.** (2016). Intermittent curing of fly ash geopolimer mortar. *Construction and Building Materials*, 110, 54-64.
- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., & Hussin, M. W.** (2016). Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolimer mortars

containing fly ash and palm-oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 125, 1229-1240.

- İpek, S., & Ekmen, Ş.** (2022). Yapı malzemelerinin geopolimer harç üretiminde kum olarak geri dönüştürülmesinin incelenmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(17), 404-419.
- Kabirova, A., Uysal, M., & Canpolat, O.**, (2020). Mermer atığının geopolimer üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *6. Uluslararası Öğrenci Sempozyumu Bildiriler Kitabı -1- Mühendislik Bilimleri*, 36-47s.
- Kalkan, Y.** (2017). Farklı kür şartlarının Elazığ ferrokrom cürufundan üretilen geopolimer betonların mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerine etkilerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 77s.
- Kantarci, F.** (2021). Lif boyunun ve içeriğinin geopolimer betonların asit direncine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 424-437.
- Karaaslan, C., Yener, E., Bağatur, T., Polat, R., & Gül, R.** (2022). Uçucu kül ve kalsiyum alüminat çimentosu katkılı pomza esaslı geopolimer harçların sülfürik asit direnci. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(4), 2302-2312.
- Karagöl, F.** (2022). Uçucu kül esaslı ve cüruf katkılı geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), 1592-1606.
- Kaya, M.** (2020). Yüksek ve düşük kalsiyum içeren uçucu küller ile üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(2), 96-104.
- Kaya, M.** (2021). Kaolin esaslı geopolimer harçlarda silis dumanı ve mikro SiO₂ katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 640-647.
- Khater, H. M.** (2013). Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5, 1-10.
- Koç, G.** (2025). Metakaolin ve cüruf esaslı mermer tozu atığı ikameli geopolimer harçların mekanik özelliklerinin ve yüksek sıcaklık direncinin incelenmesi. *Yüksek lisans tezi*, İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul, 74s.
- Koçak, Y.** (2011). Termik Santral Atığı Uçucu Külün Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 14(2), 135-140.
- Kong, D. L., Sanjayan, J. G., & Sagoe-Crentsil, K.** (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and concrete research*, 37(12), 1583-1589.

- Kop, M., & Yazıcıoğlu, S.** (2023). Uçucu kül ve yüksek fırın cüruf esaslı geopolimer harçların ısıtılma ortamında mekanik özellikleri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 11(3), 756-765.
- Kore, S. D., & Vyas, A. K.** (2016). Impact of marble waste as coarse aggregate on properties of lean cement concrete. *Case studies in construction materials*, 4, 85-92.
- Leong, H. Y., Ong, D. E. L., Sanjayan, J. G., & Nazari, A.** (2016). The effect of different Na₂O and K₂O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer. *Construction and Building Materials*, 106, 500-511.
- Li, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H., & Liu, Y.** (2019). A review on mixture design methods for geopolymer concrete. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107490.
- Lim, Y. Y., Pham, T. M., & Kumar, J.** (2021). Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies. *Construction and building materials*, 283, 122795.
- Mahmut, O.** (2015). Geopolimer harç üretiminde Elazığ ferrokrom cürufu kullanımının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Düzce Üniversitesi, Düzce, 53s.
- Mehta, A., & Siddique, R.** (2017). Properties of low-calcium fly ash based geopolymer concrete incorporating OPC as partial replacement of fly ash. *Construction and building materials*, 150, 792-807.
- Memon, F. A., Nuruddin, M. F., & Shafiq, N.** (2013). Effect of silica fume on the fresh and hardened properties of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20, 205-213.
- Nasr, D., Pakshir, A. H., & Ghayour, H.** (2018). The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag (aas) mortars. *Construction and Building Materials* 190, (2018) 108–119.
- Olivia, M., & Nikraz, H.** (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design*, (1980-2015), 36, 191-198.
- Öksüzer, N.** (2016). Farklı inceliklere sahip mermer ve Bayburt taşı atıklarının lif donatılı geopolimer bağlayıcı sistemlerde kullanılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Bayburt üniversitesi, Bayburt, 126s.
- Özdal, M.** (2019). Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme dayanıklılığının araştırılması. *Yüksek lisans tezi*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 82s.
- Papadakis, VG** (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and concrete research*, 30(2), 291-299.

- R. Bajpai, K. Choudhary, A. Srivastava, K. S.** (2020). Sangwan, M. Singh, Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete, *Journal of Cleaner Production*, 254, 120147.
- Rashad, A. M.** (2014). A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Materials & Design*, 53, 1005-1025.
- Ravikumar, D., Peethamparan, S., & Neithalath, N.** (2010). Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder. *Cement and Concrete composites*, 32(6), 399-410.
- Rostami, M., & Behfarnia, K.** (2017). The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete. *Construction and building materials*, 134, 262-268.
- Sağlam, G.** (2012). Çimento üretiminde atık mermer tozu ve atık alçının kullanılabilirliği. *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 94 s.
- Sağlık, A. Ü.** (2009). Alkali-silica reactivity and activation of ground perlite-containing cementitious mixtures. *Master's thesis*, Middle East Technical University, Ankara.
- Sevinç, A. H.** (2021). Farklı tane boyutuna sahip afşin-elbistan uçucu külünün geopolimer hammaddesi olarak kullanımı. *El-Cezeri*, 8(2), 751-765.
- Singh, A., & Mehta, S.** (2021). Partial replacement of fine aggregate with Copper slag and marble dust powder in geo-polymer concrete: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 889, No. 1, p. 012070). IOP Publishing.
- Singhal, V., Nagar, R., & Agrawal, V.** (2021). Use of marble slurry powder and fly ash to obtain sustainable concrete. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4387-4392.
- Skvara, F., Kopecky, L., Nemecek, J., & Bittnar, Z.** (2006). Microstructure of geopolymer materials based on fly ash. *Ceramics-Silikaty*, 50.
- Soares, J. C., Dias, D. P., de Carvalho, E. A., & de Azevedo, J. S.** (2021). Determination of shear strength by Iosipescu (V-notch) method of metakaolin-based geopolymeric resins activated by different silicate and hydroxide combinations. *Construction and Building Materials*, 275, 122120.
- Sukontasukkul, P., Chindaprasirt, P., Pongsopha, P., Phoo-Ngernkham, T., Tangchirapat, W., & Bantia, N.** (2020). Effect of fly ash/silica fume ratio and curing condition on mechanical properties of fiber-reinforced geopolymer. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(4), 218-232.
- Sun, Y., Zhang, P., Hu, J., Liu, B., Yang, J., Liang, S., ... & Hou, H.** (2021). A review on microwave irradiation to the properties of geopolymers: Mechanisms and challenges. *Construction and Building Materials*, 294, 123491.

- Şinik, O.** (2019). Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 80 s.
- Tam, V. W., Tam, L., & Le, K. N.** (2010). Cross-cultural comparison of concrete recycling decision-making and implementation in construction industry. *Waste management*, 30(2), 291-297.
- Tayeb, B., Abdelbaki, B., Madani, B., & Mohamed, L.** (2011). Effect of marble powder on the properties of self-compacting sand concrete.
- Teixeira, E. R., Mateus, R., Camões, A. F., Bragança, L., & Branco, F. G.** (2016). Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2221-2230.
- Temuujin, J., Van Riessen, A., & Williams, R.** (2009). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymers. *Journal of hazardous materials*, 167(1-3), 82-88.
- Tokdemir, M., Ramyar, K., & Gültekin, A.** (2024). Agregat türünün uçucu kül ve tuğla tozu esaslı geopolimer harç özelliklerine etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 14(1), 259-273.
- Topal, Ö.** (2020). Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların yangın dayanımına geri dönüştürülmüş agreganın etkisinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 106s.
- Topçu, İ. B., & Sofuoğlu, T.** (2020). Pres filtre atığı ve uçucu kül ile elde edilen geopolimer harçların farklı koşullar altında birim ağırlığı ve basınç dayanımının değerlendirilmesi. *El-Cezeri*, 7(2), 806-823.
- Turhan, D.** (2020). Perlit esaslı geopolimer betonda endüstriyel atıkların değerlendirilmesi. *Yüksek lisans tezi*, Atatürk üniversitesi, Erzurum, 94s.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., & Yeğinoba, A.** (2009). Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. *Tçmb*, Ankara.
- Uğurlu, A.İ.**, 2020. Yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma çözülme ve sülfat direncine geri dönüştürülmüş agreganın etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Malatya, 95s.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs.** (2018, May 16). *68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN.*
- Ünal, O., ve Uygunoğlu, T.** (2004). Afyon mermer tozu ve soma uçucu kül katkılı betonların donma-çözülme özellikleri ve ekonomik değerlendirilmesi. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 13-14 Mayıs.

- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., & Lukey, G. C. (2007).** Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of hazardous materials*, 139(3), 506-513.
- Van Deventer, J. S., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012).** Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89-104.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S., & Lukey, G. C. (2002).** The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89(1-3), 63-73.
- Villa, C., Pecina, E. T., Torres, R., & Gómez, L. (2010).** Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2084-2090.
- Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2010).** Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete. *Materials & Design*, 31(10), 4748-4754.
- Wu, H., Zuo, J., Zillante, G., Wang, J., Yuan, H., (2019).** Construction and demolition waste research: a bibliometric analysis. *Architectural Science Review*, 62(4), 354-365.
- Yadollahi, M. M., Demirboğa, R., & Polat, R. (2014).** Effect of heat treatment temperature on ground pumice activation in geopolymer composites. *Science and Engineering of Composite Materials*, 21(3), 377-382.
- Yılmazoğlu, L. (2025).** Farklı yöntemlerle üretilen hafif geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, 82s.
- Yurt, Ü., & Emiroğlu, M. (2020).** Zeolit ikameli geopolimer betonlarda kür şartlarının etkileri. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 8(2), 396-402.
- Zeybek, O. (2009).** Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 99s.
- Zhu, H., Liang, G., Xu, J., Wu, Q., Du, J. (2019).** Surface-modification of fly ash and its effect on strength and freezing resistance of slag based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 199, 574-580.

ÖZGEÇMİŞ

