



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE UÇUCU KÜL VE
KALKER KATKILI ZEOLİT ESASLI
GEOPOLİMER HARÇLARIN
TASARLANMASI

Roble İbrahim LIBAN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Roble Ibrahim LIBAN tarafından hazırlanan “Taguchi Yöntemi ile Uçucu Kül ve Kalker Katkılı Zeolit Esaslı Geopolimer Harçların Tasarlanması” adlı tez çalışması 16/05/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Burak UZAL

.....

Danışman

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

.....

Üye

Prof. Dr. Ali KÖKEN

.....

Üye

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

.....

Üye

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 211104033 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Roble Ibrahim LIBAN

Tarih: 16/05/2022

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TAGUCHİ YÖNTEMİ İLE UÇUCU KÜL VE KALKER KATKILI ZEOLİT ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN TASARLANMASI

Roble Ibrahim LIBAN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

2022, 147 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

Prof. Dr. Burak UZAL

Prof. Dr. Ali KÖKEN

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

Günümüzde en önemli ve kritik faktörlerden birisi sürdürülebilir bir çevre yaklaşımıdır. Bu nedenle pratikte tüm endüstriyel sektörler çevre dostu ürünlerin üretimini teşvik etmektedir. Düşük karbon dioksit (CO₂) emisyonu, yüksek mekanik ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle, kireç ve Portland Çimentosu'ndan sonra üçüncü nesil çimento olarak kabul edilen geopolimerler, Portland çimentolarına alternatif olarak kullanılacak çevre dostu bir ürün olarak görülmektedir. Geopolimerler, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerin geri dönüşümü ve yeniden kullanılma gibi CO₂ emisyonlarını azaltmanın yanı sıra çevresel ve ekonomik faydalara sahiptir. Bu çalışmada, doğal zeolit (DZ), C sınıfı uçucu kül (UK) ve toz kalker (LS) bağlayıcı olarak, sodyum hidroksit (NH) ve sodyum silikat (NS) alkali aktivatör olarak içeren geopolimer harçların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla harç numuneleri hazırlanmıştır. Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılarak bağlayıcı miktarı, aktivatör/bağlayıcı oranı, NS/NH oranı ve sodyum hidroksitin molaritesi olmak üzere zeolit bazlı geopolimer harç bileşenlerinin optimum karışım oranları belirlenmiş ve bu oranlar diğer karışımlarda kullanılmıştır. Zeolit bazlı geopolimer harçların optimum karışım oranlarını bulduktan sonra zeolit yerine katkı maddesi olarak uçucu kül, kalker ve uçucu kül-kalker farklı miktarları kullanılmıştır. Geopolimer harç numuneleri önce fırında 24 saat boyunca 80 °C kür edilmiş, sonra test günlerine kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Kür işleminden sonra geopolimer harç numunelerinin özgül ağırlık, birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, kapilarite katsayısı, 7, 28 ve 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları, donma-çözülme, ıslanma-kuruma, sülfat ve asit dirençleri gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Geopolimer harçların mikroyapı özelliklerini SEM ve EDS analizleri ile araştırılmıştır.

Üretilen geopolimer harçlarda uygulanan mekanik deneyler sonucunda, 7., 28., ve 90. günde eğilme ve basınç dayanımlarında tüm karışımlarda en yüksek değerler doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalker birlikte içeren geopolimer harçlarda elde edilmiştir. Zeolit yerine %20 uçucu kül ve %20 toz kalker içeren geopolimer harçlarda en yüksek basınç dayanımı (31.8 MPa) ve eğilme dayanımı (7.5 MPa) olmuştur. Geopolimer harçların fiziksel özellikleri incelendiğinde işlenebilme değeri en iyi olan numunelerin uçucu kül katkı zeolit bazlı geopolimer harç numuneler olduğu görülmüştür. Zeolit bazlı geopolimer harçlarında, toz kalker katkı maddesi olarak kullanıldığında su emme ve boşluk oranı bir miktar artarken, uçucu kül kullanılması durumunda ise, su emme ve boşluk oranı azalmıştır. Ayrıca, toz kalker içeren harçların kapilarite katsayısı değerleri artarken, uçucu kül içeren harçların kapilarite katsayısı değerleri azalarak geopolimer harçlara önemli bir fayda sağladığı görülmüştür. Üretilen geopolimer harçlarda uygulanan dayanıklılık deneyleri sonucunda, 50 donma-çözülme çevrimlerden sonra basınç dayanım değerleri

azalmıştır. Donma-çözülme çevrimlerinden sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlarda en yüksek basınç dayanım kaybı (%24.1) olurken, %30 uçucu kül ve %30 toz kalker içeren harçlarda en düşük basınç dayanım kaybı (%7.3) olmuştur. Geopolimer harçlar 12 ıslanma-kuruma çevrim uygulandıktan sonra, %100 doğal zeolit içeren harçlarda en yüksek basınç dayanım kaybı (%62.7) olurken, %30 uçucu kül ve %30 toz kalker içeren harçlarda ise, en düşük basınç dayanım kaybı (%33.9) olmuştur. Bununla birlikte, uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harçlar 2 ay boyunca %5 magnezyum sülfat çözeltisinin etkisine maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımında artış göstermiştir. %20 uçucu kül ve %20 toz kalker içeren harçları, sülfat etkisinden sonra en yüksek basınç dayanımı (%16) artış sağlamıştır. Son olarak, geopolimer harçlar %2.5 sülfürik asit çözeltisine 6 hafta boyunca tabi tutulduktan sonra basınç dayanımlarının azaldığını görülmüştür. %100 doğal zeolit içeren harçların asit etkisinden sonra en yüksek basınç dayanım kaybı (%50.6) olurken, %30 uçucu kül ve %30 toz kalker içeren harçlarda ise, en düşük basınç dayanım kaybı (%18) olmuştur. SEM görüntüleri de uçucu kül ve toz kalkerin sağladığı katkıyı teyit eder niteliktedir. Mikroyapısal açıdan baktığımızda ise, geopolimer harçların genel olarak iyi olduğu ve yoğun bir matris kompaktlığı ile geopolimerizasyon bağı oluşturduğu görülmüştür. EDS ölçümleri kullanılarak geopolimer harçların üzerinde yapılan elemental analiz, orijinal doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalkerine göre daha yüksek bir Si/Al oranının varlığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Doğal zeolit, geopolimer harç, mekanik ve dayanıklılık özellikleri, sodyum hidroksit, sodyum silikat, toz kalker, uçucu kül.

ABSTRACT

Ph. D THESIS

DESIGN OF ZEOLITE BASED GEOPOLYMER MORTARS WITH FLY ASH AND LIMESTONE ADDITIVES BY TAGUCHI METHOD

Roble Ibrahim LIBAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

2022, 147 Pages

Jury

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN

Prof. Dr. Burak UZAL

Prof. Dr. Ali KÖKEN

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Doç. Dr. Sadık Alper YILDIZEL

Today, one of the most significant and critical factors is a sustainable environmental approach, and practically all industrial sectors encourage the manufacture of environmentally friendly products. Due to their low carbon dioxide (CO₂) emission, strong mechanical, and durability properties, geopolymers, which are regarded as the third generation cement after lime and Portland cement, are considered an environmentally friendly product that can be used as an alternative to Portland cement. Geopolymers have environmental and economic benefits in addition to reducing CO₂ emissions, such as recycling and reusing industrial byproducts like fly ash and blast furnace slag. In this study, samples were prepared in order to determine the properties of geopolymer mortars containing natural zeolite (DZ), C-type fly ash (UK) and powder limestone (LS), sodium hydroxide (NH), and sodium silicate (NS). By using the Taguchi optimization method, the optimum mixing values of zeolite-based geopolymer mortar components, including the binder content, activator/binder ratio, NS/NH ratio, and sodium hydroxide molarity were determined and these values were used in all mixtures. After finding the optimum mixing values of zeolite-based geopolymer mortars, different amounts of fly ash, limestone, and fly ash-limestone were used as additives in the place of zeolite. Geopolymer mortar samples were first cured at 80 °C in the oven for 24 hours and then kept at room temperature until testing days. After the curing process, physical properties of the geopolymer mortar samples like specific gravity, unit weight, water absorption, void ratio, sorptivity, compressive and flexural strengths of 7, 28, and 90 days, freezing-thaw, wetting-drying, sulfate, and acid resistances were determined. The microstructural properties of the geopolymer mortars were investigated by using SEM and EDS analyses.

As a result of the mechanical tests applied on the produced geopolymer mortars, the highest values in the flexural and compressive strengths at the 7th, 28th, and 90th days of all mixtures were obtained in geopolymer mortars containing natural zeolite, fly ash, and powder limestone. Zeolite-based geopolymer mortars with fly ash-limestone additives containing 20% fly ash and 20% powder limestone showed the highest compressive strength (31.8 MPa) and flexural strength (7.5 MPa). When the physical properties of geopolymer mortars were examined, it was observed that the samples with the best workability value were zeolite-based geopolymer mortars with fly ash additives. In zeolite based geopolymer mortars, the use of powder limestone as an additive slightly increased the water absorption and void ratio, while the use of fly ash as an additive decreased the water absorption and void ratio. In addition, it was observed that the sorptivity values of mortars containing powder limestone increased, while samples containing fly ash provided a significant benefit to geopolymer mortars by reducing the sorptivity values. From the result of

the durability tests applied on the produced geopolymer mortars, compressive strength values decreased after 50 freeze-thaw cycles. After freeze-thaw cycles, geopolymer mortars containing 100% natural zeolite showed the highest compressive strength loss (24.1%), while mortars containing 30% fly ash and 30% powder limestone showed the lowest compressive strength loss (7.3%). In addition, after applying 12 wetting-drying cycles, geopolymer mortars containing 100% natural zeolite showed the highest compressive strength loss (62.7%), while the mortars containing 30% fly ash and 30% powder limestone showed the lowest compressive strength loss (33.9%). However, the compressive strength showed an increase after the zeolite based geopolymer mortars with fly ash and powder limestone as additives were exposed to the effect of 5% magnesium sulfate solution for 2 months. Mortars containing 20% fly ash and 20% powder limestone provided the highest increase in compressive strength (16%) after the effect of sulfate. Finally, it was observed that the compressive strength of the geopolymer mortars decreased after being exposed to a 2.5% sulfuric acid solution for 6 weeks. Mortars containing 100% natural zeolite showed the highest compressive strength loss (50.6%) after the acid effect, while mortars containing 30% fly ash and 30% powdered limestone showed the lowest compressive strength loss (18%). SEM images also confirmed the contribution of fly ash and powder limestone. From the microstructural point of view, it was observed that the characterization of geopolymer mortars generally was good, and geopolymerization bonding with dense matrix compactness formed. The elemental analysis of geopolymer mortars using EDS measurements indicated the existence of a higher Si/Al ratio with respect to the original natural zeolite, fly ash, and powder limestone.

Keywords: Fly ash, geopolymer mortar, mechanical and durability properties, natural zeolite, powder limestone, sodium hydroxide, sodium silicate.

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamın başladığı andan itibaren ve tamamlanmasında her daim değerli bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, çok yoğun olduğunda bile vakit ayırarak ilgilenen ve yardımını esirgemeyen doktora tez danışmanım hocam Sayın Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN'a sonsuz şükranlarımı ve saygılarımı sunarım.

Tez süresince değerli bilgi ve tecrübeyle beni yönlendirip gelişmeme katkı sağlayan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Burak UZAL'a ve Sayın Prof. Dr. Ali KÖKEN'e teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı Dr. Murat SAYDAN'a ve Dr. Öğretim Üyesi Oğuzhan ÖZTÜRK'e teşekkür ederim.

Doktora çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen, en başta annem Halima Mumin MAGAN'a, tüm ailem ve arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora programıma başladığım süreçte hayatıma dahil olan kızım Halima'ya ve oğlum Mustafa'ya bana güzel gülümsemeleriyle desteklerinden dolayı ve çalışmalarım boyunca sevgisi, sabrı, anlayışı ve motivasyonu ile her daim yanımda olan, sevgili eşim Nimco Mohamed IBRAHİM'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Roble Ibrahim LIBAN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. Çalışmanın Önemi	2
1.3. Çalışmanın Amacı	3
1.4. Tezin Yapısı	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Doğal Zeolit	5
2.1.1. Doğal zeolitlerin puzolanik aktivitesi	6
2.1.2. Doğal zeolitlerin inşaat sektöründe kullanım alanları	8
2.2. Uçucu Kül	9
2.2.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması	10
2.2.2. Uçucu küllerin kullanım alanları	11
2.3. Kalker	12
2.3.1. Kalkerin yapısı	13
2.3.2. Kalkerin özellikleri	13
2.3.3. Kalkerin inşaat sektöründe kullanımları	14
2.4. Geopolimerler	14
2.4.1. Terimler	15
2.4.2. Geopolimer için genel bilgiler	16
2.4.3. Geopolimer malzemelerin bileşenleri	18
2.4.3.1. Kaynak malzemeler	18
2.4.3.2. Alkali aktivatörler	19
2.4.4. Geopolimer mekanizması	19
2.4.5. Geopolimer betonların faydaları	21
2.4.6. Geopolimer betonların uygulamaları	23
2.5. Geopolimer Betonların Literatür Taraması	25
2.5.1. Geopolimer betonların dayanımı	25
2.5.2. Geopolimer betonların dayanıklılığı	27
2.5.2.1. Geopolimer betonların donma-çözülme direnci	28
2.5.2.2. Geopolimer betonların sülfat etkisi	29
2.5.2.3. Geopolimer betonların asit etkisi	31
2.5.3. Zeolit/uçucu kül/kalker geopolimerleri	34
2.6. Taguchi Yöntemi	38

3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
3.1. Materyal	40
3.1.1. Doğal zeolit.....	40
3.1.2. Uçucu kül.....	42
3.1.3. Kalker.....	43
3.1.4. Standart ince agrega.....	45
3.1.5. Kullanılan su	46
3.1.6. Alkali aktivatörler	46
3.2. Ön Deneyler.....	47
3.2.1. Zeolit bazlı geopolimer harçların Taguchi yöntemi ile tasarlanması	47
3.2.2. Zeolit bazlı geopolimer harçların 28 gün dayanımların değerlendirilmesi... 52	
3.2.3. Optimum karışım oranlarının belirlenmesi ve değerlendirme	55
3.3. Karıştırma, Kalıplama ve Kür İşlemleri	57
3.4. Çalışmada Uygulanacak Deneyler.....	61
3.4.1. Sertleşmiş geopolimer harç numunelere uygulanan deneyler	61
3.4.1.1. Yayılma tablası deneyi.....	61
3.4.1.2. Özgül ağırlık, birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı	62
3.4.1.3. Kapilarite katsayısı (Kılcallık katsayısı).....	63
3.4.1.4. Eğilme dayanımı tayini.....	65
3.4.1.5. Basınç dayanımı tayini.....	66
3.4.2. Durabilite özelliklerinin belirlenmesi	67
3.4.2.1. Donma-çözülme direnci tayini.....	67
3.4.2.2. İslanma-kuruma deneyi.....	68
3.4.2.3. Sülfat etkisi deneyi.....	69
3.4.2.4. Asit etkisi deneyi	70
3.4.3. SEM-EDS ve XRD analizleri	71
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	74
4.1. Taze Harç (Yayılma Tablası ve Priz Alma) Özellikleri	74
4.2. Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı	76
4.3. Kapilarite (Kılcallık Su Emme) Katsayısı	81
4.4. Mekanik Özellikler	84
4.4.1. Eğilme dayanımı deney sonuçları.....	84
4.4.2. Basınç dayanımı deney sonuçları	89
4.4.3. Geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişkisi .. 96	
4.5. Durabilite Deneyleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	98
4.5.1. Donma-çözülme deney sonuçları.....	98
4.5.1.1. Geopolimerlerin donma-çözülme etkisinde ağırlık kaybı değerlendirilmesi	99
4.5.1.2. Geopolimerlerin donma-çözülme etkisinde dayanım kaybı değerlendirilmesi	100
4.5.2. İslanma-kuruma deney sonuçları	104
4.5.2.1. Geopolimerlerin ıslanma-kuruma etkisinde ağırlık kaybı değerlendirilmesi	105
4.5.2.2. Geopolimerlerin ıslanma-kuruma etkisinde dayanım kaybı değerlendirilmesi	107
4.5.3. Sülfat etkisi deney sonuçları	110
4.5.3.1. Geopolimerlerin sülfat etkisinde ağırlık kaybı değerlendirilmesi	110
4.5.3.2. Geopolimerlerin sülfat etkisinde dayanım kaybı değerlendirilmesi	111

4.5.4. Asit etkisi deney sonuçları	113
4.5.4.1. Geopolimerlerin asit etkisinde ağırlık kaybı değerlendirilmesi.....	113
4.5.4.2. Geopolimerlerin asit etkisinde dayanım kaybı değerlendirilmesi	114
4.6. Mikroyapı Analizleri.....	116
4.6.1. SEM ve EDS analizleri	116
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	121
5.1. Sonuçlar	121
5.1.1. Taguchi yöntemi sonuçları.....	121
5.1.2. Yayılma tablası sonuçları.....	122
5.1.3. Birim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı	122
5.1.4. Kapilarite katsayısı sonuçları	123
5.1.5. Eğilme dayanımı sonuçları	123
5.1.6. Basınç dayanımı sonuçları	124
5.1.7. Donma-çözülme sonuçları	124
5.1.8. Islanma-kuruma sonuçları.....	125
5.1.9. Sülfat etkisi sonuçları.....	126
5.1.10. Asit etkisi sonuçları	126
5.1.11. Mikroyapı analizleri.....	127
5.2. Öneriler	128
KAYNAKLAR	129
EKLER	140

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Numunenin suyu maruz kalan yüzey alanı
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum Hidroksit
CaCO ₃	: Kalsitum Karbonat
CaO	: Kalsiyum Oksit
CO ₂	: Karbon Dioksit
d	: Suyun özgül ağırlığı
f	: Eğilme dayanımı
Fe ₂ O ₃	: Demir Oksit
H ₂ O	: Hidrojen Oksit (Su)
H ₂ SO ₄	: Sülfürik Asit
I	: Kapilarite katsayısı
K ₂ SiO ₃	: Potasyum Silikat
KOH	: Potasyum Hidroksit
Mg ₂ SO ₄	: Magnezyum Sülfat
M _o	: Numunenin kuru ağırlığı
M _t	: Numunenin su emdikten sonraki ağırlığı
Na ₂ O	: Sodyum Oksit
Na ₂ SiO ₃	: Sodyum Silikat
NaOH	: Sodyum Hidrosik
P	: Numunenin kırıldığı anda uygulanan yük
R	: Korelasyonel
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
V	: Numune hacmi
W ₁	: Etüv kurusu ağırlık
W ₂	: Doygun kuru yüzey ağırlık
W ₃	: Su içindeki ağırlık
σ	: Basınç dayanımı

Kısaltmalar

A/B	: Aktivatör/Bağlayıcı oranı
BİTAM	: Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulanma Merkezi
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
D-Ç	: Donma-Çözülme
DZ	: Doğal Zeolit
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
kN	: Kilo Newton
LS	: Toz Kalker
M	: Molarite
MPa	: Mega Pascal
NH	: Sodyum Sidroksit
NS	: Sodyum Silikat
s	: Saniye
S/N	: Sinyal-Gürültü Oranı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UK	: Uçucu Kül
XRD	: X-ışınları Difraktometresi
XRF	: X-ışını Floresans Spektrometresi
Y _i	: i deneyin sonucudur

1.GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Portland çimentosu üretiminde kullanılan ham maddelerin yanında, üretimi sırasında açığa çıkan karbon dioksit (CO_2) çevre kirliliğine yol açmaktadır. Portland çimentolu bileşiklerin bir diğer negatif yönü de çevresel etkilere karşı yeterli dayanıklılığa sahip olmamasıdır. Ayrıca, Portland çimentosu kullanımını maliyet açısından ekonomik olmamaktadır. Bahsi geçen teknik, ekonomik ve çevresel sorunlar, Portland çimentosuna alternatif bağlayıcı malzeme üretimini ilgi çekici hale getirmektedir. Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretime yönelik hedeflenen çalışmaların en ilginç, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlerin veya diğer puzolanların alkalilerle aktivasyonudur (Baradan ve ark., 2015). Teorik olarak, silis ve alümina içeren her malzeme alkaliler tarafından aktive edilmektedir. Geopolimerler veya alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, çeşitli puzolanların veya endüstriyel yan ürünlerin aktivasyonu ile üretilen yeni bağlayıcı malzemelerdir. Çevresel, ekonomik ve teknik avantajlar nedeniyle son yıllarda bu bağlayıcı malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar oldukça artmıştır.

Puzolanik malzemeler ile çimento gibi bağlayıcı özellikler taşıyan yeni bir malzeme geliştirilmiştir. Geopolimerizasyon olarak da bilinen alkali aktivasyon olayı, yüksek alkali özellik taşıyan aktivatörlerle silis ve alüminalı malzemelerin çözülmesiyle oluşmaktadır (Görhan ve Kürklü, 2014). Alkali aktivasyon teknolojisinin en belirgin özelliklerinden biri, hem doğal malzemelerin (metakaolin gibi) hem de endüstriyel yan ürünlerin (cüruf ve uçucu kül gibi) ana malzemeler olarak kullanılabilmesidir. Son birkaç on yılda çok çeşitli alkali ile aktive edilmiş çimentolar geliştirilmiştir. Bugüne kadar yapılan araştırmalarda, geopolimer üretmek için kaolinitik killer, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, uçucu kül-cüruf, metakaolin-uçucu kül, metakaolin-cüruf, cüruf-kırmızı çamur karışımları, uçucu kül-kaolin ve bazı zeolit türleri kullanılmıştır. Bu malzemelerin aktivasyonunda, en yaygın olarak kullanılan aktivatörler, sodyum hidroksit ($NaOH$) veya potasyum hidroksit (KOH) ile sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya potasyum silikat (K_2SiO_3) karışımıdır. En uygun aktivatör, hidroksitler ve çözümlenebilen silikat ile üretilmektedir (Baradan ve ark., 2015).

Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcılar, düşük enerji maliyetleri, düşük kirletici gaz emisyonları (CO_2 , SO_2 , NO_x vb.) ve daha az çevresel hasar gibi avantajlar

sunmaktadır. Ayrıca, atık maddelerin ve doğal puzolanların kullanımı, çevreye verilen zararlar ve depolama sorunlarını da azaltmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal Portland Çimentolarından ve betonlarından erken ve daha yüksek dayanım, daha düşük hidratasyon ısı, agresif kimyasallara ve donma-çözülme etkilerine karşı daha iyi dayanıklılık, daha güçlü agrega-matris aderansı gibi birçok önemli teknik avantajlara sahip olduğunu bildirilmiştir (Shi ve ark., 2013). Geopolimer betonun kuruma büzülmesi, çimento betonuna kıyasla çok daha azdır. Bu nedenle, geopolimer betonları kalın ve ağır şekilde kısıtlanmış yapı elemanlarında kullanılmaya uygun hale görülmektedir. Bu, geopolimerin üç boyutlu ağlarının poli-yoğuşma reaksiyonlarına dayanmaktadır (Gharzouni ve ark., 2016). Alüminosilikat ve diğer endüstriyel yan ürünlerin geopolimer üretimi için uygun malzemeler olduğu bulunmuştur. Geopolimer betonların en önemli dezavantajlarından biri, kullanılan toz alüminosilikat malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin her zaman sabit olmaması, bu da kalite kontrol açısından büyük sorunlara neden olmaktadır. Geopolimer betonların diğer dezavantajları, karışımların taze halde işlenebilirliğinin çimentolu betonlarla göre daha düşük olması ve sodyum bazlı aktivatörlerden kaynaklanan çiçeklenmedir (Pacheco-Torgal ve ark., 2015).

1.2. Çalışmanın Önemi

Geopolimer son yirmi yılda önemli araştırma ve ticari ilgi konusu olmuştur. Geopolimerizasyon işlemi, geopolimer malzemeleri değerli bir ürün olarak kullanılmalrı için bir fırsat sağlar, ancak kaynak malzemelerdeki değişkenlik geopolimer ürünlerinin farklı performans seviyeleriyle sonuçlanmaktadır. Bu arada geopolimerizasyonu etkileyen faktörler, mekanik özellikler, sürecin mekanizmaları ve dayanıklılığın bazı kısa yönleri üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Yapılan araştırmada geopolimer betonların inşaat malzemeleri olarak üstün mühendislik özelliklerine sahip olduğu sonuçlarına varılmıştır. Bununla birlikte, daha uzun vadede, deniz suyu gibi şiddetli ortamlarda geopolimer betonların maruz kalması kaçınılmazdır ve dayanıklılığı hakkında daha fazla bilgi edinmek önemlidir. Bazı çalışmalarda geopolimer betonların iyi dayanıklılığa sahip olduğu belirtilmiştir; ancak bunlar, farklı kaynak malzemelerin ve aktivatörlerin, numune türlerinin ve kullanılan test türlerinin kullanımı nedeniyle çok sınırlıdır.

Bu araştırmanın sonuçları, katkı maddesi olarak uçucu kül ve toz kalker içeren doğal zeolit bazlı geopolimer harçların karışım optimizasyonu, dayanım gelişimi ve

dayanıklılığı hakkında bilimsel veri ve bilgi sağlayacaktır. Bu araştırmanın deneysel çalışmaları Konya Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarları'nda yapılmıştır.

Doğal bir puzzolan olan zeolit, dünya çapında doğal, düşük maliyetli ve yaygın oluşumlarından dolayı geopolimer kullanılmak için önemli bir fırsat sağlar. Bununla birlikte, doğal zeolitlerin alkali aktivasyonu ile geopolimer sentezi ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. Doğal zeolit esaslı geopolimerler hakkında yayınlanmış makalelerin çoğu değişkenlerin etkisine odaklanmıştır. Genel olarak, analiz yöntemleri, basınç dayanımı analizinin araştırılmasıyla sınırlı kalmıştır. Bu arada, elde edilen ürünün diğer mekanik, dayanıklılık (durabilite) ve mikroyapısal özellikleri daha az incelenmiştir. Geopolimerik reaksiyon ürünlerini, uçucu kül ve kalker katkılı zeolit esaslı geopolimer malzemelerin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini keşfetmek için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalker kullanılarak hazırlanan uçucu kül ve kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını amaçlamaktadır. Çalışmada doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalker kullanılarak elde edilen geopolimer harçların fiziksel özellikleri (birim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı vb), mekanik özellikleri (basınç dayanımı, eğilme dayanımı, vb), dayanıklılık özellikleri (donma-çözülme, ıslanma-kuruma, sülfat, asit dirençleri ve kapilarite katsayısı, vb) ve mikro yapı özellikleri incelenerek analiz edilmektedir.

1.3. Çalışmanın Amacı

Literatürde, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzzolanik karakteristıklere sahip atık malzemeler ile alkali aktivatörler kullanılarak geopolimer beton ve harçlar üretilmiş ve geopolimer malzeme sentezlemesinde numunelere kür işlemleri uygulanarak nihai dayanımlar üzerinde oldukça etkili sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, geopolimer beton ve harçların üretiminde puzzolanik karakteristik olan doğal malzemelerin pek kullanılmadığı görülmektedir. Bu tez çalışmasının amacı; geopolimer üretiminde, doğal puzzolanik aktiviteye sahip olan ve dünyada bol miktarda bulunan çevreci ve ucuz doğal zeolit kullanmaktır. Doğal zeolit alkalilerle aktive edilerek ve kür sıcaklıklarına tabi tutularak geopolimer harçlar elde edilmiştir. Çalışmanın birinci bölümde zeolit bazlı geopolimer harçların optimum karışım oranlarını belirlemek için Taguchi optimizasyon yöntemini kullanılacaktır. Çalışmanın ikinci bölümde ise, üretilen zeolit bazlı geopolimer harçların içerisine C sınıfı uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkıları

kullanılarak geopolimer harçlar üzerine olumlu etkilerini ortaya çıkarabilmek ve böylelikle bol hammadde kaynaklarına sahip çevreci, düşük CO₂ yayımına, düşük enerji tüketimine, düşük üretim fiyatına ve hızlı dayanım kazanma özelliğine sahip olan geopolimer harçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Üretilen doğal zeolit bazlı geopolimer harçlara katkı maddesi olarak uçucu kül ve toz kalker kullanılarak hem fiziksel ve mekanik özelliklere (birim ve özgül ağırlıkları, su emme, boşluk oranı, basınç ve eğilme dayanımları) hem de dayanıklılık özelliklerine (donma-çözülme, ıslanma-kuruma, sülfat etkisi, asit etkisi ve kapillarite katsayısı) ne gibi etkileri olacağını araştırılmıştır. Son olarak, üretilen uçucu kül ve kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların mikro yapısal özellikleri SEM ve EDS analizleri kullanılarak araştırılmıştır.

Çalışmada temel olarak;

- Türkiye’de bol miktarda bulunan çevreci ve ekonomik doğal zeolit, toz kalker ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların geri dönüşüm miktarlarının artırılarak bu ürünlerin ekonomiye yeniden kazandırılması çevreye etiklerinin azaltılması,
- Alternatif üçüncü nesil bağlayıcılar kullanılarak üretilen uçucu kül ve kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların yaygınlaştırılması ve,
- Farklı karışımların kullanılarak üretilen uçucu kül, kalker ve uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların fiziksel, mekanik, durabilite ve mikro yapı özelliklerine etkilerinin araştırılması ve bu bağlamda Taguchi Yöntemi kullanılarak harçlarının optimum karışım oranlarını belirlenmesi, çalışmanın temel amacıdır.

1.4. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır: birinci bölüm: giriş, önem ve amaç, ikinci bölüm: kaynak araştırması, üçüncü bölüm: uçucu kül, kalker ve uçucu kül-kalker katkılı zeolit esaslı geopolimer harçların fiziksel, mekanik, dayanıklılık ve mikro yapı özellikleri üzerine deneysel çalışma yapılması ve üretilen geopolimer harç numunelerin test edilmesi, dördüncü bölüm: deneysel testlerin sonuçları rapor edilmesi ve tartışılması, beşinci bölüm: sonuçlar ve öneriler.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Doğal Zeolit

Zeolit, bir kelime olarak kaynayan taş anlamına gelir ve İsveçli mineralog Fredrich Cronstedt tarafından 1756 yılında bulunmuştur. Zeolitin mineralojik yapısı silis (SiO₂) ve/veya alümininden (Al₂O₃) oluşmaktadır. Zeolit yapının en önemli özelliği boşluklar ve kanallar içermesi; bu boşluklarda ve kanallarda bulunan suyun yapının bozulmasına neden olmadan yüksek sıcaklıklarda su kaybetmekte ve yapıda gevşek biçimde birbiriyle değiştirilebilen katyonlara sahip olmasıdır. Zeolit mineral grubu şu anda doğal olarak oluşan 40'tan fazla türü içermektedir ve en büyük silikat mineralleri grubudur. Klinoptilolit, heulandit, analcime, chabazite, mordenite ve erionit, en yaygın doğal zeolit mineralleridir (Uzal, 2007). Zeolitin önemli kullanımları arasında; su sertliği azaltması, gaz ve yağ işleme merkezleri, atık su temizleme ve kâğıt endüstrisi sayılabilir. Zeolitin volkanik kökenli ve amorf yüksek silis içeriği yapıyı olması, puzolanik aktivitesini ortaya koymaktadır (Gervais ve Ouki, 2002). Doğal zeolitin yüksek iyon değişim kapasitesi ve ağır metal katyonları belirli bir şekilde çekme özelliği vardır. Zeolitler, radyoaktif atığı muhafaza etmek ve güvenle saklamak için çimento ve cam sistemleri ile kolayca reaksiyona girmektedir. Zeolitler fiziksel olarak sert ve nükleer ayrışmaya karşı dirençlidir. Ayrıca, organik iyon değişim reçinelerinden daha ekonomiktir (Englert ve Rubio, 2005).

Zeolit, beton içerisinde diğer puzolanlar gibi kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) ile reaksiyona girip bağlayıcı özellik göstermektedir. Yapılan çalışmalarda, doğal zeolitin, uçucu kül ile silis dumanı arasında bir puzolanik aktiviteye sahip olduğu ifade edilmiştir (Poon ve ark., 1999).

Doğal zeolit, büyük miktarda reaktif silis ve alümin içeren bir mineral türüdür. Zeolitin genel yapısal formülü aşağıdaki şekilde verilmiştir (Denklem 2.1); buradaki M⁺, Na⁺ veya K⁺ gibi bir monovalent katyon anlamına gelirken, M²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Ba²⁺ gibi iki değerli bir katyona karşılık gelmektedir (Uzal, 2007).



Zeolit bakımından zengin volkanik tüfler, dünyanın hemen hemen her ülkesinde yaygın olarak dağılmaktadır. Düşük, orta veya yüksek dereceli milyon ton mevduatta

bulunmaktadır. Çin, Japonya, ABD, Küba, Yunanistan, Türkiye ve Bulgaristan yıllık mevduat doğal zeolit üretimi bakımından başlıca ülkelerdir. Bu ülkelerin yıllık üretimini yaklaşık miktarı Çizelge 2.1’de verilmiştir. Dünya çapındaki toplam doğal zeolit üretimi yılda yaklaşık 3-3.5 milyon tondur (Uzal, 2007).

Çizelge 2.1. Bazı ülkelerde yıllık doğal zeolit üretimi (Uzal, 2007)

Ülke	Yıllık Üretimi (ton)
Çin	2500
Japonya	450000
ABD	46000
Kuba	38000
Yunanistan	3000

Türkiye çok zengin doğal zeolit yataklarına sahiptir. Türkiye'deki toplam zeolit yataklarının yaklaşık 50 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye’de her yerini kapsayan doğal zeolitler hakkında ayrıntılı ve güvenilir bir rezerv bilgisi yoktur. Bununla birlikte, Manisa-Göğdes bölgesi, yaklaşık 2 milyar ton görünür rezervi ile iyi bilinen bir klinoptilolit zeolit birikim alanıdır. Türkiye'deki bir diğer doğal zeolit yatağı 500 milyon ton rezerv ile Balıkesir-Bigadiç bölgesindedir. Türkiye'nin zengin doğal zeolit yatakları olmasına rağmen, dünya çapındaki değerlere kıyasla üretim sadece 1000 ton ile çok düşük miktardadır (Uzal, 2007).

2.1.1. Doğal zeolitlerin puzolanik aktivitesi

Ortega ve ark. (2000) yaptığı çalışmada, endüstriyel atıkların işlenmesi için alternatif bir katılaştırma bağlayıcı sistemi olarak Ca(OH)_2 -klinoptilolit zeolit karışımları üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Ca(OH)_2 ilavesinin, klinoptilolit parçacık büyüklüğünün, kür süresinin ve kür sıcaklığının sonuçta ortaya çıkan bağlayıcı maddenin basınç dayanımı ve mikro yapısına etkileri üzerinde odaklanmıştır. Bu faktörlerin her birinin optimizasyonunun, ağırlıkça %20 Ca(OH)_2 içeren, 38,7 MPa'lık ortalama basınç dayanımıyla sıkıştırılmış malzemeler ürettiklerini bildirmişlerdir.

Blanco Varela ve ark. (2006) Küba yataklarından iki farklı zeolitik tüfün karakterizasyonu ve puzolanik aktivitesini araştırmışlar. Klinoptilolit ve faujasit tipleri zeolitik tüfler olarak karakterize edilen her iki kayanın da puzolanik aktiviteye sahip olduğunu göstermişlerdir. Ca(OH)_2 ile reaksiyon oranının klinoptilolit tipi zeolitik tüf

için, fajasit tipi tüften çok daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Sonuçları parçacık büyüklüğü dağılımı ve malzemelerin reaktif silis (SiO_2) içeriği ile ilişkilendirmişlerdir.

Martinez Ramirez ve ark. (2006) Küba zeolitlerin puzolanik reaksiyonundan kaynaklanan reaksiyon ürünlerini araştırmışlardır. Çalışmaların zeolit tüflerin puzolanik reaksiyonunun, Kalsiyum-Silikat-Hidrat (C-S-H) jelin oluşmasıyla sonuçlanmıştır. Ancak, XRD (X-ışını difraksiyon), FTIR (Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi) ve NMR (Nükleer manyetik rezonans) analizlerin sonuçları kalsiyum alüminatların oluşumuna dair bir gösterge olmadığını bildirmişlerdir.

Mertens ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada, portlandit ile neredeyse saf doğal zeolitlerin farklı tipleri arasındaki pozolanik reaksiyon incelenmiştir. Klinoptilolit bakımından zengin tüfler portlandit ve su ile karıştırılmış (ağırlıkça 1: 1:2) ve pozolanik reaksiyonun ilerlemesi termogravimetrik analizlerle 3 ila 180 gün arasında nicel olarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarında, dış yüzey alanının sadece kısa süreli reaktiviteyi etkilediğini gösterirken, katyon içeriğinin hem uzun hem de kısa süreli reaktivite üzerinde bir etkisi olduğunu göstermektedir. Uzun süreli reaktivite esas olarak zeolitlerin (Si/Al) oranı ile ilgilidir. Si bakımından zengin zeolitlere sahip numuneler, Al bakımından zengin eşdeğer daha hızlı reaksiyona girmektedir.

Uzal ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, en yaygın doğal zeolit minerali olan klinoptilolit puzolanik aktivitesini silis dumanı ve uçucu kül ile karşılaştırarak araştırmışlardır. Doğal zeolit puzolanik aktivitesini, kireç-puzolan süspansiyonlarının elektriksel iletkenliği ve serbest kireç içeriği, basınç dayanımı ve sertleştirilmiş kireç-puzolan hamurların gözenek boyutu dağılımı gibi farklı test yöntemleri kullanarak değerlendirmişler. Klinoptilolit silis dumanı ile karşılaştırılabilir ama uçucu külden ve zeolit olmayan diğer puzolanlardan daha yüksek olan bir kireç-puzolan aktivitesine sahip olduğunu bulmuşlardır. Klinoptilolit yüksek puzolanik aktivitesi, spesifik yüzey alanına ve reaktif silis (SiO_2) içeriğine bağlanabilir.

Najimi ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, çok reaktif bir doğal puzolan olarak zeolit içeren betonun dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir. Doğal zeolit puzolanik aktivitesini araştırmak için termo-gravimetrik bir analiz yapmışlar. Puzolanik aktivite, puzolanik reaksiyon ve işlenebilirlik için %50 doğal puzolan ve %50 kalsiyum hidroksit tozun yeterli su miktarda ile birleştirilmesiyle ölçülmüştür. Sonuçlar, doğal zeolit, karşılaştırılan diğer popüler İran doğal puzolanları arasında en yüksek puzolanik aktivite kazandığını göstermiştir.

2.1.2. Doğal zeolitlerin inşaat sektöründe kullanım alanları

Doğal zeolit inşaat sektörlerinde başlıca puzolan çimento, hafif agrega ve boyutlandırılmış taş olmak üzere kullanılmaktadır. Ayrıca, sulu alt yapılarda kullanılmak üzere puzolan çimento üretiminde doğal zeolitlerin kullanılması, yüksek silika içeriğinden dolayı betonun katılaşma sürecinde oluşan kirecin nötrleşmesini sağlamaktadır.

İlk puzolan çimento İtalya'da Napoli yakınlarındaki zeolitik tüfler kullanılarak yolların, su geçitlerinin ve kamu binalarının yapılması için üretilmiştir. Zeolitik puzolan çimentoları, sürekli su ile temas içinde olan yapılarda etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Yugoslavya, Bulgaristan ve Almanya'da puzolan çimentosu üretimi için büyük miktarlarda zeolitik tüf kullanılmaktadır. Yapı endüstrisinde doğal zeolitlerin kullanımı gelişmiş ülkelerde görülmektedir. Rusya, Kanada, ABD, Japonya ve Belçika önde gelen ülkelerdir. Özellikle Rus bilim insanları doğal zeolitlerden yapı endüstrisinde, dekoratif süslemelerde kullanılması için birçok çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmaların sonuçlarını patent alarak hayata geçirmişlerdir (Sarıkaya, 2006).

Zeolitik tüf yatakları birçok ülkede puzolonik hammadde olarak kullanılmaktadır. Zeolit puzolanlar, yeraltı suyu seviyesinin altında yerleştirilen betonlarda oluşacak korozyonu azaltmaktadır.

Zeolitik tüfler düşük ağırlığa ve yüksek gözenekliliğe sahip, homojen, sıkı sağlam yapıdadır. Kolayca kesilip işlenebilir ve hafiflikleri ile iyi bir yapı taşı olarak kullanılabilirler. Doğal zeolitlerden elde edilen hafif yapı malzemeleri kullanılarak bina ağırlıklarının azaltılması sonucu deprem güvenliği artırılabilir. Bu malzemelerin hafif olması, deprem yüklerine karşı güvenliği arttırdığı gibi, yapısal sistemlerde de ekonomiyi de arttırmaktadır. Doğal zeolitlerin kullanılmasıyla elde edilen hafif yapı malzemeleri, yüksek ısı yalıtım özelliklerine sahip, ısıtma ve soğutma sistemlerinin hem ilk yatırımında hem de yapıların kullanımı sırasında ortaya çıkan binaların enerji harcamalarında önemli tasarruf sağlayabilmektedir. Bu malzemelerin istenilen ebatlarda üretilmesi, ahşap gibi kolay işlenebilmesi, delme ve oyma işlemlerini çok kolay gerçekleştirebilmesi, milimetre hassaslık boyutlarından dolayı düzgün derzlerin elde edilmesi ve alçı işlemlerinin minimum kalınlığa indirgenmesi mümkündür. Bu malzemelerin üretimi, tüm bunların sonucunda elde edilen pürüzsüz yüzeylerden dolayı, üreticilere çağdaş teknolojinin üstün özelliklerini sunabilmektedir (Akyıldız, 2012).

Doğal zeolitlerden yapılmış hafif yapı malzemelerinin nakliye ve işçilik maliyetlerinde önemli tasarruf sağlayacağı bir gerçektir. Bu malzemelerden yapılmış bloklar pürüzsüz yüzeylere ve pürüzsüz kenarlara sahiptir, duvarlarda sıva olmadan veya sadece ince sıva yeterli olacaktır. Bu malzemelerin yüksek mukavemetli olarak çeşitli tiplerde üretilmesi mümkündür. Bu malzemeler yüksek düzeyde ısı yalıtımına sahiptir. Doğal zeolitlerin özelliklerinden dolayı, iklim ve çevre koşullarından etkilenmez. Dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Bu malzemelerin hafifliği nedeniyle, büyük boyutlar üretmek mümkündür. Pürüzsüz yüzeylere sahip büyük bloklarla bir duvar inşa etmek herhangi bir özel işlem gerektirmez. Ahşap gibi kesilebilir, delinebilir ve kurulum kanalları açılabilir. Bu özelliklerle, inşaatı hızlandırır ve malzeme israfını ortadan kaldırır. Doğal zeolitlerden yapılmış bu yapı malzemelerinin ateşe dayanıklı olması, yangın güvenliğini artırır ve yangın korumalı alanların oluşturulmasını sağlar (Sarıkaya, 2006).

2.2. Uçucu Kül

Birçok gelişmekte olan ülkenin ekonomik büyümesiyle birlikte enerji ihtiyaçları artmaktadır. Bu, artan enerji tüketimine yol açmaktadır. Türkiye'de nüfus artışı ve yaşam standartlarının artmasıyla sanayileşme ve kentleşme enerji ihtiyacını her geçen gün hızla artırmaktadır. Artan ihtiyaçlar karşısında, mevcut potansiyelleri mümkün olduğunca değerlendirmek için hızlı hareket edilmiş, hidroelektrik ve termik santrallerin kurulması bir çözüm haline gelmiştir. Endüstriyel yakıt olarak kullanılması mümkün olmayan, özellikle düşük kalorili kömür yataklarına yakın büyük kapasiteli termik santrallerin kurulması, enerji üretimini artırmak için yapılan çabalar arasında en önemli çalışmalarından biridir. Artan enerji üretimi için tutarlı bir çözüm gibi görünen kömür bazlı termik santrallerin sayısının artırılmasının yanı sıra, kül üretimi de artmaktadır. Bu da önemli çevresel, ekonomik ve teknik problemleri beraberinde getirebilmektedir. Bu küllerin enerji santrallerinden çıkarılması ve depolanması, işletme, enerji üretimi kaybı vb. gibi olası çevre kirliliğinin yanı sıra finansal ve teknik sorunlar yaratabilmektedir (Luga, 2015).

Bu tip kömür, buhar üreten kazanları ısıtmak için termik santrallerde çoğunlukla toz haline getirilmiş halde yakılır. İnce öğütülmüş kömür tozları önceden ısıtılmış hava ile karıştırılır ve yanma için kazan içine üflenir. Bu yanma sonucunda, farklı özelliklere sahip çeşitli gazlar ve bazı atıklar salınır. Genel olarak termik santrallerde yakılan linyit

kömürlerinin %35-40'ı, taş kömürlerinin ise %10-15'i, küldür. Üretilen atıkların birincil %75-80'i yanma odasından çok küçük parçacıklar halinde gazlarla uçar. Bu parçacıklar, gazlarla birlikte, elektrostatik filtreler veya elektromekanik yöntemler kullanılarak bacadan tutulur ve kül toplayıcı silolara kanalizasyon edilir. Daha sonra termik santrallerden uzakta, konveyör bantları veya diğer yöntemlerle silolarda kuru veya ıslak atık olarak saklanır. Modern enerji santrallerinde, bu ince malzemelerin %99'u gaz serbest bırakılmadan önce tutulur. Uçucu kül, yanmanın bir yan ürünü olan toz kömürle çalışan termik santrallerin çok ince kalıntısıdır. İngiltere gibi bazı ülkelerde, bu yan ürüne pulverize uçucu kül denir (Baradan ve ark., 2015).

Uçucu külün yapısı büyük ölçüde silis ve alüminadan oluşmaktadır. Silis ve alümin oksitlerin yanı sıra demir oksit, kalsiyum oksit, magnezyum oksit ve karbon içermektedir. Uçucu kül parçacıkları, 1µm ila 150 µm arasında değişen amorf bir yapıya ve küresel şekle sahiptir. Bu nedenle, uçucu kül puzolanik bir malzemedir ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile kombine edildiğinde, hidrolik bağlayıcı özelliği gösterirler (Erdoğan, 2015).

2.2.1. Uçucu küllerin sınıflandırılması

Birçok ülkenin standartlarında uçucu küllerle ilgili sınıflandırma yoktur, ancak; ASTM C618-94a (1998) ve TS EN 197-1 (2002) standartlarına göre uçucu küller, kimyasal bileşen yüzdesine ve elde edildikleri kömür tipine göre sınıflandırılmaktadır.

ASTM C618 göre uçucu küller F ve C tiplerine ayrılırlar:

- F tipi uçucu kül, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'in üzerindedir. Aynı zamanda bu tür küllerin CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılmaktadır. F tipi uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- C tipi uçucu kül ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilir ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50'nin üzerindedir. Aynı zamanda bu küllerin CaO yüzdesi %10'dan fazla olduğu için yüksek kireçli olarak da adlandırılmaktadırlar. C tipi uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bir miktar bağlayıcı özelliğe de sahiptirler (Erdoğan, 2015).

TS EN 197-1 (2002) göre uçucu küller silisi V ve kalkersi W gruplarına ayrılmaktadır.

- V tipi uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum

dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşmakta, geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu uçucu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan az, reaktif silis miktarının %25'den fazla olması gerekmektedir.

- W tipi küller, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşmakta, geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu uçucu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir. Çizelge 2.2'de TS EN 197- 1 (2002) göre uçucu küller tipleri göstermektedir (Türken ve ark., 2009).

Çizelge 2.2. Uçucu küllerinin kimyasal kompozisyonları (Erdoğan 2015)

Kimyasal içerik	F tipi uçucu kül ($\text{CaO} < \%10$)	C tipi uçucu kül ($\text{CaO} > \%10$)
SiO_2	43.6-64.4	23.1-50.5
Al_2O_3	19.6-30.1	13.3-21.3
Fe_2O_3	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-29.0
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na_2O	0-2.8	0.4-1.9
C (Kızdırma kaybı)	0.4-7.2	0.3-1.9

2.2.2. Uçucu küllerin kullanım alanları

Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan, Yeniköy ve Sugözü termik santralleri uçucu kül üretmekte, bu santrallerle yılda yaklaşık 15 milyon ton, dünyada ise 600 milyon ton civarında uçucu kül elde edilmektedir (Luga2015).

Sonuçta ortaya çıkan uçucu kül ekonomik ve çevresel bir problemdir, bu nedenle, araştırmacılar tarafından uçucu külün kullanımı son zamanlarda ilginç bir şekilde belirgindir. Uçucu külün inşaat sektöründe genel olarak kullanım alanları şunlardır:

- Çimento sistemlerinde ikame, hammadde veya katkı olarak,
- İnce, kaba ve hafif agregalar olarak,
- Betonda mineral katkı olarak,
- Tuğla üretiminde katkı maddesi olarak,
- Blok, panel, duvar, beton boru, gazlı beton, cam, boya veya plastik,

- Barajların, otoyolların ve nükleer santrallerin yapımı ve ayrıca jeoteknik uygulamaları,
- Beton ve harç geopolimerlerinin üretimi (Aruntaş, 2006).

Genel olarak uçucu kül, yukarıda sıralanmış sektörlerde fark ettiğimiz gibi çimento ile beton üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu küller, çimento üretiminde iki şekilde kullanılmaktadır; öncelikle taşlama işlemi yoluyla, klinker ve alçıtaşı ile birlikte bir hammadde olarak veya öğütülmüş çimentoya katkı maddesi olarak. TS EN 197-1 Portland-Uçucu kül çimentolarına göre dört gruba ayrılmaktadır (CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/A-W ve CEM II/B-W) (Karahan, 2006).

Çimento ile katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılması durumunda, üretilen betonların özelliklerini aşağıda listelenebilen olumlu ve olumsuz yönlerde etkileyecektir,

Olumlu etkileri: (Erdoğan, 2015)

- Taze betondaki işlenebilmeyi artırması
- Taze betondaki terlemeyi azaltması
- Betonun hidrasyon ısısını azaltması
- Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini artırması
- Sertleşmiş betonun sülfatlara dayanıklılığını artırması
- Ekonomik hale getirmesi

Olumsuz etkileri:

- Betonun prizini bir miktar geciktirmek; bu durum, soğuk havalarda sorun olabilmektedir
- Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltmak
- Betonun daha uzun süreyle kür edilmesini gerektirmektedir.

2.3. Kalker

Kalker dünya çapında yaygın olarak kullanılan ve kolayca kullanılabilen bir malzemedir; Portland çimentosunun klinker üretimi için ana hammadde olarak kullanılmakta ve ayrıca agrega veya çimento katkı malzemesi olarak da kullanılmaktadır (Perdro ve Ivan, 2020). Dünyada bilenen en eski bağlayıcılardan bir tanesi kalkerdir (kireçtir). Eski Babil, Mısır, Finike, Hitit ve Persler tarafından hava kireci, yapıda bağlayıcı madde olarak kullanılmışlardır. Romalılar devrinde suya karşı dayanıklı bir bağlayıcı arayışı sonucunda su kireci bulunmuş ve su içerisindeki yapılarda kullanılmışlardır.

2.3.1. Kalkerin yapısı

Kalker, kireç taşının $[CaCO_3-CaMg(CO_3)_2]$ çeşitli derecelerde ($850\text{ }^\circ\text{C} - 1400\text{ }^\circ\text{C}$) pişirilmesi sonucunda elde etmektedir. Elde edilen kalker, su ile karıştırıldığında cinsine göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlardan ilki, hava veya suda katılma özelliği göstermektedir ve hava kalker denilmektedir, diğeri ise hem hava da hem de suda katılma özelliği göstermektedir ve su kalker (hidrolik kireç) denilmektedir. Kalker üretiminde iki aşama vardır.

(1) Kalkerin yakılması (Kalsinasyon): kireç, kalkerin fırnlarda $950-1000\text{ }^\circ\text{C}$ civarındaki sıcaklıklarda kalsine edilmesi ile elde edilmektedir. Kalkerin kalsinasyonu aşağıdaki Denklem 2.2’de göstermektedir.



Reaksiyon ürünleri kalsiyum oksit veya diğeri adı ile sönmemiş kireç (CaO) bu hali ile kullanıldığı gibi, su ile reaksiyona girmiş, sönmüş toz kireç ($Ca(OH)_2$) şeklinde de kullanılmaktadır.

(2) Söndürme işlemi: Sönmemiş kirece ağırlığının $1/3$ ’ü kadar su eklenmektedir. Gereğinden fazla su ile söndürülen kirece ‘kaymak kireci’ denilmektedir. Söndürme işlemi Denklem 2.3’te göstermektedir.



2.3.2. Kalkerin özellikleri

Kalker sönerken hacmi artmaktadır. Bu yüzden tamamen sönmeden yapıda kullanılmamalıdır, aksi halde hacim artışı binaya zarar vermektedir. Kireç açık hava ile temas edince sertleşmeye başlamaktadır. Havanın karbondioksitini alarak tekrar kalkerleşmektedir. Bu reaksiyonu Denklem 2.4 göstermektedir.



Kuruma ve sertleşme düzgün yüzeylerde daha hızlı olmaktadır. Sertleşme yüzeyden içeri doğru olmaktadır. Bu yüzden dışı kuru gözükmese de uzun süre nemli kalmaktadır. Kalker, tuğla, taş ve beton gibi yüzeylere kolayca yapışarak işçilikten tasarruf sağlamaktadır. Sertleşme sonrası binada oluşacak deformasyonlara uyum sağlaması kullanım avantajları sağlamaktadır. İçine yanıcı bir katkı maddesi eklenmediği sürece yanmaz, alev almaz, duman ve koku çıkarmaz. Ayrıca, ses yutucu ve geçirimsizdir. Kalkerin bünye yapısı gözenekli olduğundan nem almaktadır. Her mevsim biyoklimatik konfor sağlamaktadır (Ersoy, 2001).

2.3.3. Kalkerin inşaat sektöründe kullanımları

Günümüzde kalker yapı malzemesi olarak en fazla sıva, harç, karayollarında stabilizasyon malzemesi ve bitümlü karışımlarda katkı maddesi olarak, beton, kalker-kum tuğlası üretimi ve badana işlerinde kullanılmaktadır. Kalkerin son 30 yılda sanayisi gelişmiş ülkelerde tuğla harçları ve duvar sıvaları katkı maddesi olarak kullanması %10'un altında inmiştir. Bunun en önemli nedenleri harç veya sıvaya ihtiyaç duyulmadan yeni yapı tekniklerinin geliştirilmesi ve kısmen kalkerin görevlerini dayanan organik bazı kimyasal katkı maddelerinin kullanılması olmuştur. Kalker, harçlara plastisite ve işlenebilirlik kazandırmak amacıyla eklenmektedir. Çoğunlukla melez harç adı verilen bu harçlar 1 kısım çimento, 1-2 kısım kalker ve 5-6 kısım kumdan oluşmaktadır (Baradan ve ark., 2015).

2.4. Geopolimerler

Geopolimer, alüminosilikat bakımından zengindir ve bu nedenle çimento ailesine benzer özelliklere sahiptir (Singh ve ark., 2015; Hardjito ve ark., 2004; Lloyd ve Rangan, 2010). Geopolimer kompozitler, suyun varlığında reaktif değildir, böylece uygun işleyişi için bir alkalın ortamı gerektirmektedir (Wongsa ve ark., 2020; Adak ve Mandal, 2019). Ayrıca, geopolimer alternatif bağlayıcılar, 3 boyutlu bir polimerik yapı oluşturarak yük taşıma yeteneğine sahiptir. Bu durum, geopolimerin alüminosilikat içeriği ile yüksek amorf yapısından kaynaklanmaktadır. Çimento bileşeni güçlü doğal alkalın içeriğine sahiptir, bu nedenle suyla verimli bir şekilde reaksiyona girmektedir (Van Doa ve ark., 2019). Bununla birlikte, alkali bir bağlayıcı aktivasyonunun bitişik matrisle bir bağ oluşturması için alkali bir ortam gerektirmektedir (Singh ve ark., 2015). Geopolimer,

alçıtaşı çimentosu ile normal Portland çimentosu arasındaki en yeni çimento trendidir. Gelecekte, dünyanın en yaygın kullanılan inşaat malzemelerinden biri gibi görünmektedir (Amran ve ark., 2020). 1970'li yıllarda Prof. Joseph Davidovits ve Fransız araştırmacılar tarafından 'geopolimer' terimi adlandırılmış ve alkali çözeltinin alüminosilikat toz malzemelerle birleştirilmesiyle üretilen bir grup bağlayıcı malzeme olarak tanıtılmışlardır (Davidovits, 1999).

2.4.1. Terimler

Geopolimer, ısı veya ortam kürlenme koşullarında farklı formülasyonlarla üretilen çok çeşitli alüminosilikat ürünleri için yaygın olarak kullanılan genel bir terimdir. Geopolimer teknolojisi kozmetik, farmakoloji, tarım, seramik, yalıtım ve beton altyapılarından oluşan çeşitli uygulamalarda gelişen bir teknolojidir (Shayan, 2013). Beton teknolojisinde, geopolimer, önemli çevresel avantajlar sağlamak için normal Portland çimentosuna karşı çıkan çimentosuz ve sürdürülebilir alternatif bir bağlayıcı olarak kabul edilmektedir. Geopolimer, farklı kür koşullarında silika ve alümina bakımından zengin çok çeşitli kaynak malzemelerden (öncüller) sentezlenen büyük ölçüde amorf alüminosilikat bağlayıcı malzemeler sınıfı olarak ifade edilmektedir. Uçucu kül ve cüruf gibi endüstriyel yan ürünler veya kalsineli killer gibi jeolojik malzemeler alüminosilikat kaynak malzemelere örneklerdir. Geopolimer beton, sürdürülebilirlik ve çevresel etkilere yönelik endişelerin günümüzde inşaat sektöründe önemli hususlar haline gelmesinden bu yana son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Bu nedenle, geopolimer betonun geleneksel normal Portland çimento betonlarına kıyasla önemli ölçüde daha az çevresel etkiye, potansiyel olarak faydalı mühendislik özelliklerine ve ekonomik özelliklere sahip olduğuna inanılmaktadır (Shayan, 2013).

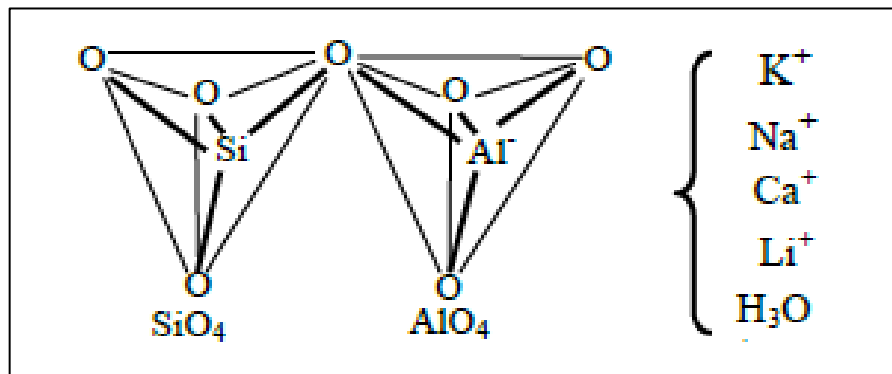
Normal Portland çimentosu üretimi için büyük miktarda enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerji, kil ve kalker karışımlarının yakılması için gerekli olan çok yüksek sıcaklığa ulaşmak için tüketilmektedir. Genel bir kural olarak, bir ton normal Portland çimentosu üretimi nedeniyle neredeyse bir ton CO₂ yayılmaktadır. Bu CO₂ emisyonunun yarısı 1800 °C'de kalkerin yakılması için gereken enerjiye, geri kalanı ise CaO yapmak için kalkerden CO₂'nin kimyasal salınımı ile ilişkilendirilir (Davidovits, 1994). Buna karşılık, uçucu kül bazlı geopolimer üretiminin, normal Portland çimentosunun üretimi için neredeyse %60 daha az enerji tükettiği bildirilmiş, bu da atmosfere daha az CO₂ emisyonu ile sonuçlanmaktadır (Li, 2004a). Duxdon ve ark (2007) yaptıkları çalışmada, normal

Portland çimentosunun üretimine kıyasla uçucu kül bazlı geopolimer üretiminden %80 daha az CO₂ emisyonu elde edilmektedir. Geopolimer çimento ve betonun çevresel avantajları esas olarak kireç taşının yakılmasının üretim sürecinde yer almamasından ve bu nedenle geopolimerlerin üretimi için çok daha az enerjiye ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır.

Buna ek olarak, geopolimer malzemelerin genellikle uçucu kül ve cüruf gibi mevcut atık ürünlerden (yan ürünler) sentezlenmesi, bu atık ürünlerin bertaraf edilmesine olan ihtiyacın azalması nedeniyle doğal kaynakların daha iyi kullanılmasına ve çevresel faydalara olanak sağlamaktadır (Shayan, 2013).

2.4.2. Geopolimer için genel bilgiler

Geopolimer, Davidovits tarafından yarı kristal üç boyutlu alüminasiliklere amorf olarak tanımlanmıştır. Geopolimerin kimyasal yapısı, tüm oksijen atomlarını birbirine bağlayan ve paylaşan bir dörtyüzeral SiO₄ ve AlO₄ ile oluşur. Ağın IV-kat koordinasyonunda Al³⁺'ün negatif yükünü dengelemek için sistemde Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca²⁺ gibi pozitif iyonlar gereklidir. NaOH ve KOH tarafından aktive edilen metakaolinden yapılan erken geopolimer bu çerçevenin modeli olmuştur. Ağ yapılandırması Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Olivia, 2011).



Şekil 2.1. Sialat, iyonik kavramın tetrahedral konfigürasyonu (Olivia, 2011)

Polisyalat (PS), polisyalat-siloxo (PSS) ve polisallat-disiloxo (PSDS) olmak üzere üç tür polisyalat vardır. Polisyalatın ampirik formülü aşağıda gösterilen Denklem 2.5 ile belirlenmiştir:



Denkleimde:

Mn = Alkalın Elemanı (örnek: K veya Na)

n = polimerizasyon derecesi

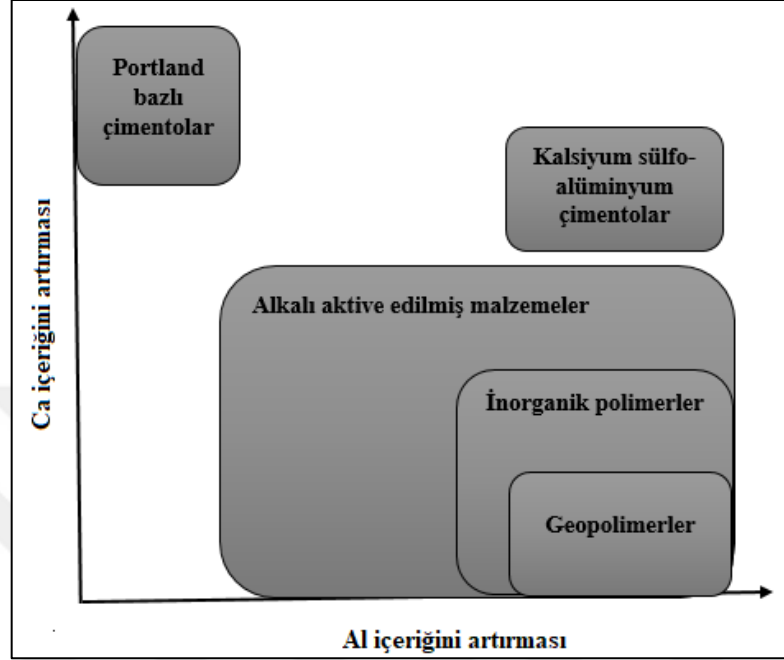
z = 1,2,3

Geopolimer malzemenin gelişimi temel olarak kaynak malzemenin mevcudiyetine bağlıdır. Metakaolin daha çok çeşitli araştırmacılar tarafından geopolimerin erken gelişiminde kullanılmıştır (Alonso ve Palomo, 2001; Van Jaarsved ve ark., 2002). Metakaolin geopolimer, iyi mekanik özellikler, yangına dayanıklılık ve deniz suyu ortamlarında iyi dayanıklılık göstermiştir (Kong ve ark., 2007; Cioffi ve ark., 2003). Metakaolin malzemesi sadece pahalı değil, aynı zamanda işlenebilir hale getirmek için çok miktarda sıvıya ihtiyaç duyduğundan araştırma amacıyla sınırlıdır.

Alümina-silikat bakımından zengin olan cüruf ve uçucu kül gibi alkali aktivatörlerle aktive edilebilen diğer kaynak malzemelerin geliştirilmesi daha fazla potansiyeldir (Swanepoel ve Strydom, 2002; Roy, 1999). Her iki malzeme de atık olarak bol miktarda bulunan yan ürünlerdendir bu nedenle geopolimer üretmenin ilk maliyeti azaltılabilir. Cüruf ve uçucu kül geopolimer sırasıyla kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve alumunosilikat olmak üzere farklı nihai ürünler üretmektedir. Şimdiye kadar, her iki malzeme için de çalışmalar, cüruf ve uçucu kül geopolimer uygulamalarını daha uygun hale getirmek için hala devam etmektedir.

Gelişiminde, birçok araştırmacı tarafından Geopolimer için kullanılan terminolojinin karışıklığa neden olabileceğini gözlemlemek ilginçtir. Terminolojinin şematik bir ayrımı Şekil 2.2'de verilmiştir. Metakaolin, cüruf, uçucu kül, atık çamur (Pacheco-Torgal, 2007) ve pirinç kabuğuna (Detphan ve Chindapasirt, 2009) kadar çeşitli malzemeler, birçok aktivatör türüyle aktive edilen orijinal terminolojiyi biraz değiştirmiştir. Van Deventer ve ark (2010) yaptıkları çalışmada, kaynak malzemeye, alkali aktivatöre ve nihai ürüne dayanarak alkali aktive edilmiş malzemelerin, inorganik polimerlerin ve geopolimerlerin tanımını ayırt etmişlerdir. Geopolimerler, son ürünleri olarak alumunosilikat üreten inorganik polimerlerin ve alkali aktive edilmiş malzemelerin bir bölümü olarak tanımlanmaktadır. Kaynak malzeme genellikle alkali metal hidroksit veya silikattan alkali aktivatörler ile düşük kalsiyum uçucu kül ve kalsineli killerdir. İnorganik polimerler, nihai ürün olarak silikat ağını bozmuş alkali ile aktive edilen malzemelerin bir parçasıdır. C-S-H adı verilen nihai bir ürüne sahip alkali ile aktive

edilmiş cüruf, inorganik polimerlere dâhildir. Daha geniş tip, alkali aktive edilen malzemeler olarak bilinen katı bir silikat tozu ile alkali tuzun reaksiyonundan kaynaklanan herhangi bir bağlayıcı sistemidir.



Şekil 2.2. Alkali aktive edilmiş malzemelerin farklı alt kümelerinin normal Portland çimentoları ve kalsiyum sülföalüminat bağlayıcı kimyası ile karşılaştırılması (Van Deventer ve ark., 2010)

2.4.3. Geopolimer malzemelerin bileşenleri

Geopolimer üretimi için kullanılan iki ana bileşen vardır. Bunlar kaynak malzemeler ve alkali aktivatörlerdir. Kaynak malzemeler hammadde veya öncül olarak da bilinmektedir. Alkali aktivatörler, suda çözülmesi gereken çözelti veya toz şeklinde olabilmektedir.

2.4.3.1. Kaynak malzemeler

Xu ve Van Deventer (2002) yaptıkları çalışmada, kaynak malzemeler amorf formda yüksek miktarda silikon (Si) ve alüminyum (Al) içermelidir. Kaynak malzemeler kaolinit ve kalsine kaolinit (metakaolin) gibi jeolojik kökenlere (doğal mineraller) sahip olabilir veya uçucu kül ve cüruf gibi endüstriyel yan ürün olabilir (Davidovits, 1984). Geopolimer

üretimi için kaynak malzemelerin seçimini etkileyen kullanılabilirlik, maliyet, uygulama türü ve son ürünlerin özel talebi gibi çeşitli faktörler vardır (Hardjito ve Rangan, 2005).

Literatürde doğal zeolit kaynak malzeme kullanılarak yapılan geopolimer malzemelerin özelliklerini ve uygulamalarını araştıran çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Mingyu ve ark., 2009; Villa ve ark., 2010; Bakara ve Cornejo, 2017). Benzer şekilde, uçucu kül kullanılarak yapılan geopolimer malzemelerin uygulanması ve özellikleri üzerine kapsamlı araştırma çalışmaları vardır (Fernandez-Jimenez, 2006; Rangan, 2008; Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2003; vb). Son olarak, toz kalkerin geopolimer üretimi için kaynak malzeme olarak uygulanmasıyla ilgili sınırlı araştırmalar vardır (Pedro ve Ivan, 2020; Crirzen ve ark., 2014; Morsy, 2019).

2.4.3.2. Alkali aktivatörler

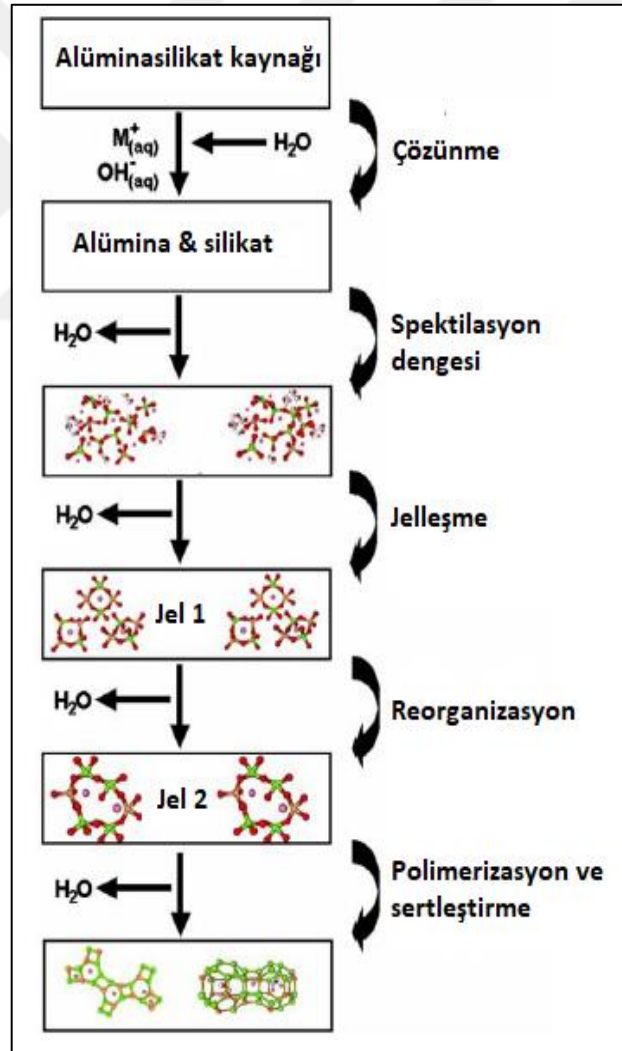
Rowles (2006) yaptığı çalışmada, alkali aktivatörler açısından, herhangi bir güçlü alkali çözelti geopolimer malzemelerin üretimi için kullanılabilirliğini bildirmiştir. Davidovits (1987) yaptığı çalışmada, eski çağlarda piramitlerin yapımında alkali aktivatör olarak kireç (Ca(OH)_2) çözeltisi ve kaynak malzeme olarak volkanik kül kullandığını bildirmektedir. Alonso ve Palomo (2001), ayrıca kireç (Ca(OH)_2)'nin geopolimer malzemelerin üretimi için alkali aktivatör olarak kullanılmasını incelemiştir. Günümüzde ise, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikat (K_2SiO_3) çözeltilerinin bir kombinasyonu, geopolimer beton ve harçların üretimi için alkali aktivatörler olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4.4. Geopolimer mekanizması

Geopolimerizasyon mekanizmasını açıklamak için çeşitli araştırmacılar tarafından bazı teoriler üretilmiştir (Fernandez-Jimenez ve ark., 2005; Duxson ve ark., 2007; Jo ve ark., 2007). Geopolimerizasyon mekanizması, sistemde yüksek pH, konsantre alkali, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık gerektiren zeolite benzer olarak tanımlanmıştır (Davidovits, 1991). Başlangıçta, silika ve alümina içeren alkali ile aktive edilmiş çimento için bir reaksiyon mekanizması Glukhovsky tarafından 1967'de önerilmiştir (Duxson ve ark., 2007). Bu modelin üç aşaması vardır: yıkım-pıhtılaşma, pıhtılaşma-yoğuşma ve yoğuşma-kristalizasyon. Bu teori, zeolit oluşumu hakkındaki mevcut bilgilere dayanarak

alkali aktive edilmiş çimento mekanizmasını inceleyen birçok araştırmacı tarafından detaylandırılmıştır.

Duxson ve ark (2007), Şekil 2.3'teki beş büyük adımdan oluşan geopolimer reaksiyonunun başka bir mekanizmasını önermişlerdir. İlk olarak, kaynak malzemenin yüksek alkali iyonlarla çözünmesi alüminyum ve silikat türleri üretir. İkinci olarak, silikat ve alüminat türleri, alüminosilikat çözeltisi oluşturmak için spektilasyon dengesi aşamasında birbirine karıştırılır. Çözünme işleminden sonra sistemden su salındığı görülür. Üçüncü aşamada, yüksek pH'da yüksek konsantrasyonlu bir çözelti oluştuğunda, jelleşme işlemi geopolimer jel üretimi gerçekleşir. Dördüncü aşama, bir sonraki süreç, geopolimerin gözenek ve mikro yapısının geliştirildiği jel ağının yeniden düzenlenmesidir. Son adımda, üç boyutlu bir geopolimer üretilir.



Şekil 2.3. Geopolimerizasyon için kavramsal model (Duxson, 2007)

Geopolimerizasyonun reaksiyon basamakları çeşitli faktörlerden etkilenir (Olivia, 2011). İlk faktör, malzemedeki amorf silika ve alümina miktarını, silika ve alüminanın çözünme oranını, hammaddenin ve safsızlıkların fiziksel özelliklerini içeren alüminosilikat bileşimi ve mineralojidir. İkinci faktör silikat konsantrasyonu ($\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ oranı), alkali metal katyonlarının türü, alkali çözelti konsantrasyonu ($\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$ oranı, burada M, Na ve K'ye eşittir) ve su içeriği (su/bağlayıcı oranı) ile ilgili aktive edici çözümlerdir. Son etkili faktör, sıcaklığın, kür süresinin ve sıcaklık düzeninin ve nemin etkisini içeren kür koşullarıdır.

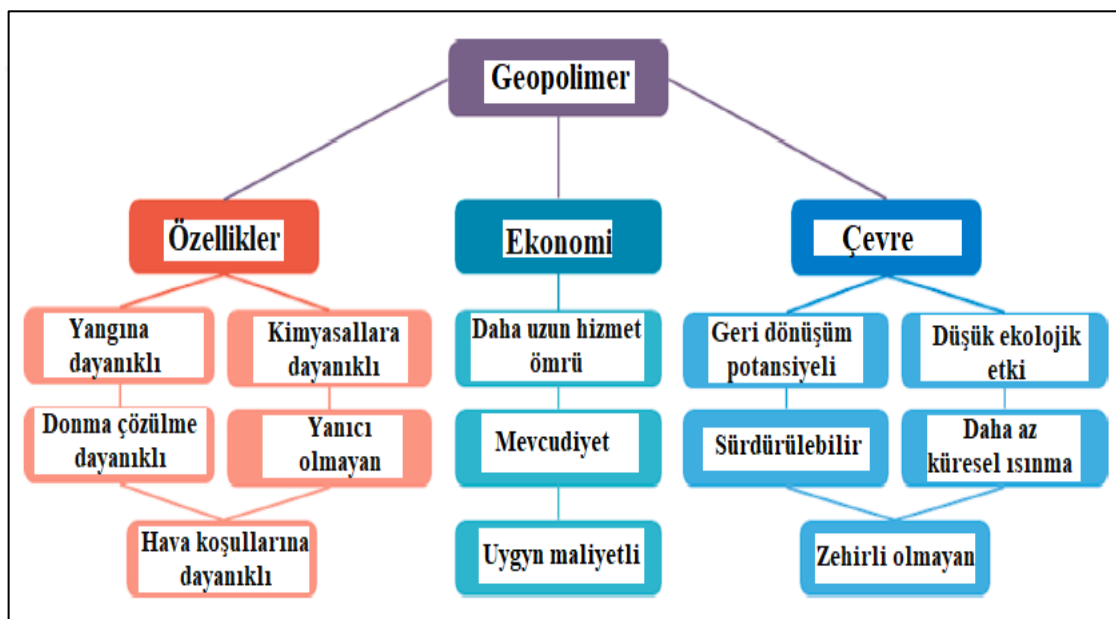
2.4.5. Geopolimer betonların faydaları

Sürdürülebilirliğin temel amacı, çevre dengesini kesintiye uğratmadan gelecek nesillerin ihtiyaçlarını göz önünde tutarken, mevcut ihtiyaçları karşılamaktır (Mastrucci ve ark., 2017). Sürdürülebilirliğin temel direkleri ekonomi, toplum, çevredir ve çevreyi korumak için bu direkler korunmalıdır. Sanayi devrimi döneminde, mimarlar ve mühendisler, çevre üzerindeki genel olumsuz etkiyi hafifletmek için sürdürülebilirlik ilkesini yaratıcı bir şekilde kullanmışlardır. Bu nedenle, inşaat malzemelerinde 'sürdürülebilirlik' terimi yeşil bir çevre açısından uygun görünmektedir (Bilodeau ve ark., 2000).

Dünya genelinde her yıl milyonlarca tonda endüstriyel atık üretilerek güvenli bertaraf ve depolamadaki yetersizlik nedeniyle çevresel bir yükümlülük haline gelmektedir. Daha sonra, bu tür atıklar (seramik atık tozu, uçucu kül ve cüruf vb.) çevreyi (su ve arazi) kirletmektedir (Musci ve ark., 2014). Son zamanlarda, çeşitli çalışmalar (Musci ve ark., 2014; Hardjito ve Rangan, 2005) bu atık malzemeleri geri dönüştürmenin en iyi yolunun çimento içermeyen geopolimerler üretmek olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, seramik ve beton dâhil olmak üzere atık malzemelerin geopolimer endüstrilerinde agrega olarak yeniden kullanımını mümkündür (Akbarnezhad ve ark., 2015; Ariffin ve ark., 2015).

Geopolimerin kapsamlı üretiminin süreç boyunca kullanılan enerjiyi korumayacağı, aynı zamanda kirliliğin özellikle CO_2 emisyonlarının etkisini en aza indireceği açıktır (Musci ve ark., 2014). Bondar (2013) yaptığı çalışmada, alkali aktive alümina silikat ile yapılan harcın karbon ayak izi ve maliyeti ile ilgili diğer bağlayıcılara göre avantajlarını bildirmiştir. Bu faktörlerin beton endüstrisinde sürdürülebilirliği artırmak için dikkate alınması önemlidir. CO_2 ayak izi ve geopolimer harçların maliyeti ile Portland bazlı çimento ile karşılaştırıldığında bileşimleri arasındaki ilişki kabaca

ölçülmektedir. Geopolimer, normal Portland çimentosu ve diğer ticari onarım malzemelerine kıyasla yüksek dayanıklılık göstermekte hem asit hem de tuz ortamlarında mükemmel özellikler göstermektedir (Hussin ve ark., 2015). Benzer şekilde, geopolimer harcı diğer malzemelere göre yüksek erken mekanik özellikler ortaya koymaktadır (Provis and Van Deventer, 2009; Phoo-Ngernkham ve ark., 2015; Hussien ve ark., 2018). Ayrıca, geopolimer kaynak malzemeleri atıkları kaynaklara dönüştürmek için umut verici yollar sağlar, böylece daha temiz bir çevreye katkıda bulunmak ve düşük karbon ayak izi beton üretmektedir (Nayaka ve ark., 2018; Kanadasan ve Rasak, 2015; Karim ve ark., 2017). Geopolimer betonun önemli başlı özellikleri Şekil 2.4'te belirtilmiştir.



Şekil 2.4. Geopolimer matris seçimini yöneten arzu edilen özellikler

Literatür taraması, geopolimerlerin müthiş mekanik özelliklere sahip ve uzun ömürlü sahip olduğunu göstermiştir. Bu ayırt edici özellikler yüksek sıcaklıklara karşı direnç, asit ve sülfat ortamında yüksek performans, yüksek erken mukavemet, düşük gözeneklilik içermektedir (Şekil 2.5). Tüm bu yönler geopolimer kompozitleri inşaat mühendisliği, otomotiv ve uçak endüstrisi, zemin iyileştirme, prekast yapılar ve beton yapıların güçlendirilmesi alanlarda kullanılmakta olan potansiyel ve elmas bir aday haline getirmektedir.



Şekil 2.5. Geopolimer kompozitlerin özellikleri

2.4.6. Geopolimer betonların uygulamaları

Geopolimer gelişimi, Ukraynalı bilim adamı Gluskovsky'nin alüminosilikatlar (killer, kayalar, cüruf gibi) ve alkali metal çözeltileri kullanarak sentezlenmiş bağlayıcılar üretme olasılığını ilk keşfettiği 1950'lerin sonlarında Ukrayna'da başlamıştır. Gluskovsky, bu bağlayıcılara "toprak çimentosu" ve ilgili betona "toprak silikatları" adını vermiştir. Bu malzeme Mariupol, Ukrayna'da 1960'larda iki adet 9 katlı konut inşa etmek için kullanılmıştır. 50 yıldan fazla bir süreden sonra bu binalar hala ayaktadır (Almutairi ve ark., 2021). Geopolimer teknolojisinin kullanılmasıyla yapılan birkaç bina daha vardır. Bununla birlikte, Portland çimentosu kullanılmadan alkali aktive edilmiş betondan yapılmış 20 katlı konut binası 1989 yılında Rusya Federasyonu'nun Lieptsk kentinde inşa edilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Alkali ile aktive edilmiş betondan yapılmış 20 katlı konut binası (Almutairi ve ark., 2021).

Geopolimer terimi, ilk olarak 1979'da Joseph Davidovits tarafından, bir alüminosilikat tozun (örneğin uçucu kül, cüruf) ve alkinin çözeltisi (sodyum hidroksit ve sodyum silikat) reaksiyonu ile sentezlenen bir bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Davidovits tarafından üretilen uçucu kül bazlı geopolimer beton da agrega (kütleye göre %70-80) ve plastikleştiriciler içermiştir. Genel olarak bu geopolimer betonun üretimi normal beton teknolojisi yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. O zamandan beri araştırmacılar geopolimer betonun mukavemeti ve dayanıklılığı konusunda kapsamlı çalışmalar yürütmektedir (Dawczynski ve ark., 2017).

Geopolimer teknolojisi, geopolimerlere faydalı olan kontrollü yüksek sıcaklık kür ortamına ek olarak hassas malzemelerin işlenmesinde kontrollü gereksinimlerin nispeten kolaylığı nedeniyle prekast uygulamalarda daha gelişmiştir. Bunun bir sonucu olarak, geopolimer betonun daha önceki uygulamaları demiryolu yataklı ve kanalizasyon borularının üretimindeydi. Bununla birlikte, kolonlar, kirişler ve hatta tünel segmentleri gibi yapısal elemanlar da geopolimer betondan yapılabilir. Kanalizasyon borularının üretiminde, geopolimer betonun tipik özelliği olan agresif çevreye karşı yüksek dayanıklılık ve direnç son derece gereklidir.

Birçok toprak agresif asitler içermektedir. Bu asitler, korozyona neden olarak yeraltına yerleştirilen beton ve çelik üyelerini etkiliyor. Dawczynski ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, geopolimer betonun, çelik takviyelerin kullanıldığı uygulamalarda bile Portland çimento beton için iyi bir alternatif olduğundan bildirmişlerdir. Geopolimer betonun sülfat toprakları gibi zorlu ortamlarda beton ihtiyacını karşılaması bildirilmiştir. Böylece, geopolimer beton dayanıklı yapıların üretiminde ve ayrıca çeşitli onarım uygulamalarında sürdürülebilir bir alternatif olarak kullanılabilir.

Geopolimer beton, buz örtüsünü eritmek için tuz kullanıldığında kış mevsimlerinde daha az hasara neden olan klorüre karşı yüksek bir dirence sahiptir. Klorür korozyona karşı yüksek direnci nedeniyle, iskeleler, kıyı köprüleri gibi beton yapılar ve tuzlu suların sürekli saldırısı altında kalacak su altı beton destekleri için geopolimer beton kullanılabilir.

2.5. Geopolimer Betonların Literatür Taraması

2.5.1. Geopolimer betonların dayanımı

ASTMC109 / C109M standarda göre betonun basınç dayanımı, inşaat malzemeleri için daha yüksek başlangıç mukavemetinin çok önemli olduğu en önemli fiziksel özelliktir. Eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modüllerini içeren diğer özellikler öncelikle basınç dayanımına bağlıdır. Geopolimer betonun dayanımını kalsiyum içeriği, sodyum hidroksitin molaritesi, bağlayıcı/agrega, çözelti/bağlayıcı, sodyum silikat/sodyum hidroksit, silikat/Na₂O ve silika/alümina oranları gibi faktörlerden etkilenmektedir. Ayrıca, geopolimer betonun basınç dayanımının gelişimi de kaynak malzemedен, uygulanan kür koşullarından ve parçacık boyutu dağılımından etkilenmektedir (Assi ve ark., 2018). Isı kürlenmiş uçucu kül bazlı geopolimer beton, 1 gün sonra yüksek basınç dayanımı sağlar. Geopolimer, 80 ila 90 °C arasında değişen bir sıcaklıkta kürlenirse, sınırlı saatlerde, dayanımın yaklaşık %90'ı elde edilebilir. Bununla birlikte, ortam koşullarında kür edilen geopolimer beton, normal Portland çimento betonunda olduğu gibi zamanla dayanım elde etmektedir. Tüm kür koşulları uzun süreli dayanımla sonuçlanır (Rangan ve Hardjito, 2005), ve kür sıcaklığı sadece incelenen belirli bir karışımın nihai basınç dayanımını elde etmek için zamanda bir değişikliği tetiklemektedir. Geopolimer betonun mekanik özellikleri, geopolimer betonun oranlama ve üretimi için kullanılan kaynak malzemelerden önemli ölçüde etkilenmektedir.

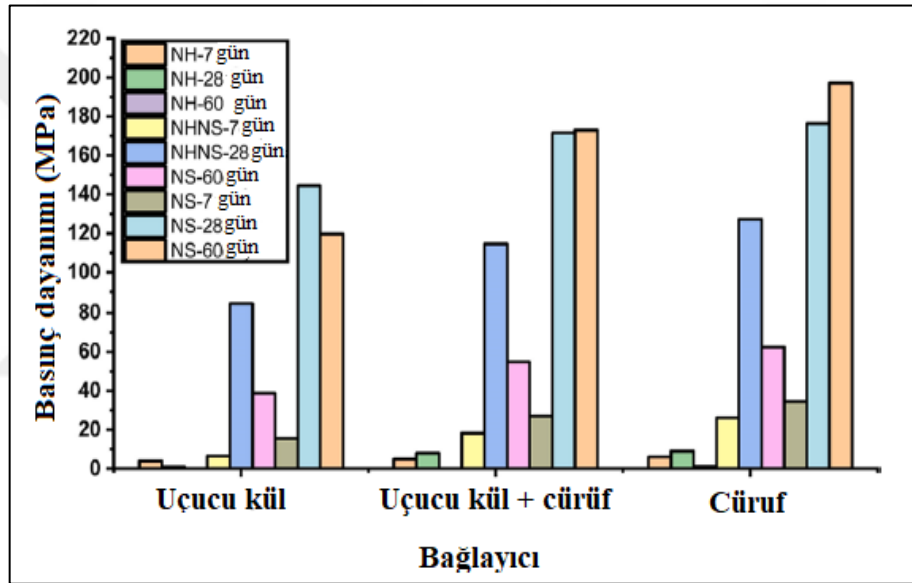
İsmail ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada, geopolimer betonun başlangıç basınç dayanımını değerlendirmek için farklı sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi oranlarına sahip geopolimer betonun üretiminde hammadde olarak metakaolin ve uçucu kül kullanmışlardır. Geopolimer betonun basınç dayanımı, sırasıyla uçucu kül bileşim, yüzey alanı ve parçacık şekillerinden önemli ölçüde etkilenmiştir. Bu çalışmaların sonuçları, Al/Si oranının 2'den büyük artırılmasının geopolimerizasyon işlemini geciktirmesi ve geopolimer betonun başlangıç basınç dayanımını azaltması sonucuna varılmıştır (Al-mashhadani ve ark., 2018).

Hussein ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, granül fırın cürufun yerine metakaolin ile değiştirilerek %0 ila %15 seviyeleri arasında değişen dozajlarla geopolimer harçlar üretmişlerdir. Cüruf yerine kullanılan metakaolin miktarı %10-15'ten artırıldığında, 28 günlük kür edildikten sonra ortaya çıkan geopolimer harçların basınç dayanımı 42'den 63.1 MPa'ya yükselmiştir.

Çeşitli bilim adamları %50 ve %100 geri dönüştürülmüş beton agrega içeriğine sahip geri dönüştürülmüş beton agrega bazlı geopolimer betonun mekanik özelliklerini incelemişlerdir ve geopolimer betonun basınç dayanımının 7 ila 28 gün arasında yaklaşık %10 arttığını gözlemlemişlerdir (Nuaklong ve ark., 2016; Brake ve ark., 2016; Shi ve ark., 2012). Petermann ve Saeed (2012) yaptıkları çalışmada, geopolimer üretiminde uygun oranlarda metakaolin ile cüruf ve uçucu kül kullanılarak uygun bir basınç dayanımı elde edilebileceğini gözlemlediler. Palomo ve ark. (1999) yaptıkları çalışmada, 85 °C'de 1 günlük kürlenmiş çeşitli uçucu kül örneklerini aktifleştirmek için 8-12 M sodyum hidroksit kullanmanın, 35 ila 40 MPa arasında değişen basınç dayanımına sahip bir geopolimer malzemeye sonuçlandığını ortaya çıkarmışlardır. Bununla birlikte, sodyum hidroksit ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=1.23$) için sodyum silikat eklenirse, 90 MPa'ya kadar mukavemet elde edilebilmektedir. Ayrıca, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ sadece önemli bir faktör değildir, aynı zamanda bu gibi durumlarda su/bağlayıcı oranı da göz önünde bulundurulmalıdır (Fernandez-Jimenez ve Palomo, 2005; Xie ve Xi, 2001). Songpiriyakij ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer betonda maksimum basınç dayanımı elde etmek için 15.9 olarak en uygun $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranını önermişlerdir.

Naskar ve Chakraborty (2016) yaptıkları çalışmada, geopolimer betonun yüksek basınç dayanımının gelişimini incelemek için bir dizi deney yapmışlardır. %70 cüruf ve %30 uçucu kül karışımı oranı kullanmış ve 66 MPa bir basınç dayanımını elde edilmişlerdir.

Birkaç geopolimer hamurların basınç dayanımı aşağıdaki Şekil 2.7'de gösterildiği gibi bağlayıcının yapısına bağlıdır. Artan cüruf içeriğinin sodyum silikat (NS), sodyum hidroksit (NH) ve sodyum hidroksit artı sodyum silikat çözeltisi (NHNS) serisi için basınç dayanımında bir artışı tetikleyeceği gözlenmiştir. Bu artış, Alümina ve silika ile reaksiyona gelerek C-A-S-H jeli oluşturan ve geopolimer jellerle aynı anda bulunan kolayca kullanılabilen serbest Ca^{2+} iyonlarından kaynaklanmaktadır (Haneefa ve ark., 2013; Kumar ve ark., 2010). Buna ek olarak, alkali çözeltilerin ve cüruf reaksiyonu, geopolimerizasyon işleme yardımcı olan ısının üretildiği ekzotermik bir reaksiyondur. Bu nedenle, cüruf içeriğindeki bir artış geopolimer hamurların basınç dayanımını artırmaktadır (Phoo-Ngernkham ve ark., 2015).



Şekil 2.7. Atık malzemeler ve aktivatörlerin ile basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Phoo-Ngernkham ve ark., 2015)

2.5.2. Geopolimer betonların dayanıklılığı

Herhangi bir yapısal elemanın dayanıklılığı, yıpranma, bozulma, kimyasal saldırı ve aşınmaya karşı direncidir. Dayanıklılık, yapısal bütünlük için olumsuz bir ortamda önemli bir bileşendir. Kılcal su emme, su emme, gözenekli boşluk miktarı, klorür emme, sülfat veya diğer asit saldırıları gibi özellikler geopolimer betonun dayanıklılığına karar verebilmektedir. Ayrıca, geopolimer betonun genellikle normal portland çimento betondan çok daha dayanıklılığa sahip olduğu bildirilmiştir. Geopolimerlerin kullanım avantajlarından biri onlardan meydana gelen nihayi bağlayıcı malzemelerin dış etkilere

karşı performansdır. Aşağıdaki bölümler, geopolimer betonun ana dayanıklılık özelliklerinden bazıları tartışılacaktır.

2.5.2.1. Geopolimer betonların donma-çözülme direnci

Duan ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, cüruf, uçucu kül ve metakaolin içeren geopolimerin 100 donma-çözülme çevrimine karşı etkisini incelediler ve kalan son kütle için henüz %80'den büyük olduğunu fark etmişlerdir. Başlangıçta, ilk 25 donma-çözme çevrim için numune yüzeyinde hamur ve agrega ayrımı ile küçük bir kayıp meydana gelmiştir. Ayrıca, 50 donma-çözülme çevrim tamamlandıktan sonra, parçacıkların etrafındaki hamur kaplamasının bozulduğu ve zayıf temaslı agregaların bir kısmının karışımdan salındığı gözlenmiştir. Son olarak, 100 çevrim tamamlanmasından sonra, çok sayıda parçacığın gevşetildiği, geopolimer betonun kaplamasının bozulduğu ve iç hasarlar gözlemlendiği fark edilmiştir. Artan donma-çözülme çevrimleri, numune kütlelerinin azalmasına neden olarak ortaya gelmektedir.

Topçu ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, SiO_2 ve Na_2O oranını dalgalandırarak alkali aktive edilmiş kömür alt kül bazlı geopolimer betonun dayanıklılığını ve mikroyapısal özelliklerini incelediler. Donma-çözülme çevrimleri basınç dayanımında azalma olduğunu göstermektedir. SiO_2 /kömür alt külü oranı arttıkça donma-çözülme karşı direncin arttığı sonucuna varmışlardır. Zhao ve ark. (2019a) yaptıkları çalışmada, cüruf içeriğini değiştirerek F sınıfı uçucu kül bazlı geopolimer betonun donma-çözülme karşı direncini incelediler. Sonuçlar, %10 kalsiyum miktarı içeren uçucu kül bazlı geopolimer betonun donma-çözülme direncinin yetersiz olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, kalsiyum içeriğinin %10'dan %50'ye yükseltilmesi, donma-çözülme direncinin 5'ten 225 çevrime artmasına neden olacaktır, bu da önemli bir iyileşme göstermektedir. 50 çevrim uygulandıktan sonra geopolimer beton numuneleri mühendislik gereksinimini karşılamaktadır. Bu örnekler 50 çevrinden sonra donma-çözülme karşı direnci göstermiştir, ancak 225 döngüden sonra ağ şeklinde bir çatlak deseni de görülmüştür.

Shahrajabian ve Behfarnia (2018) yaptıkları çalışmada, alkali ile aktive edilmiş cüruf betonun donma-çözülme çevrimlerine karşı direnci üzerinde nano-silika, nano-alümina ve nano-kil içeren nanopartiküllerin etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, nano-silika ve nano-kilin, donma ve çözülme çevrimlerine maruz kalan alkali ile aktive edilmiş cüruf betonun mukavemetini ve dayanıklılığını arttırmada nano-alüminadan daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir.

Zhao ve ark. (2019b) yaptıkları çalışmada, sırasıyla kür sıcaklığını ve kür süresini değiştirerek kırmızı çamur bulamacı-F sınıfı uçucu külü üzerindeki donma-çözülme çevrimlerin tepkisini incelemişlerdir. Hem mekanik mukavemet hem de mikroyapısal karakterizasyonun sonuçları, kürlenme koşulların, mukavemet gelişimlerini etkileyerek geopolimer numunelerin donma-çözülme direncini etkilediğini göstermektedir. 50 °C'de 14 günlük kürlenmiş numuneler, donma-çözülmenin erken aşamasında daha fazla geopolimerizasyon göstermiş, ancak donma-çözülmenin sonraki aşamasında geopolimer jelin kısmi çözünmüştür. 50 °C'de 28 günlük kürlenmiş numuneler, donma-çözülme sırasında sadece geopolimer jelin kısmi çözünmesinin meydana gelmesi muhtemeldi, çünkü mukavemet gelişiminin donma-çözülmeden önce tamamlanması muhtemeldi.

Nazarpour ve Jamali (2020) yaptıkları çalışmada, numunelerin donma-çözülme direncini incelemek için geri dönüştürülmüş agregalı cüruf kullandılar ve donma-çözülme çevrimlerine karşı uzun süreli bir dirençleri olduğu sonucuna vardılar. Donma-çözülme çevrimlerin sonuçları, geopolimer betonun basınç dayanımında önemli bir kayıp olmadığını ve bu durumlarda iyi direnç gösterdiğini görülmüştür. Numunelerin dayanım ve ağırlığında 100, 200 ve 300 donma-çözülme çevrimden sonra ölçülen kayıplar sırasıyla %7, %11, %14 ve %2,1, %4-5,5 ve %7,6 çıkmıştır. Ekinci ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, donma-çözülmenin volkanik tüf bazlı geopolimer üzerindeki etkisini Nano-medya ve stiren-bütadien lateks kullanarak incelediler. Yazarlar, sodyum silikat ve sodyum hidroksit alkali bir çözeltisi kullanılırken donmaya karşı önemli bir direnç fark etmiştir. Stiren-büladien lateksli numuneler donma-çözülmeğe karşı aşırı direnç göstermektedir. Geopolimer betonda nano-silika kullanması matrisi daha yoğun hale getirir, boşluğu doldurur ve dayanıklılık yaklaşımlarında olduğu gibi kararlı tarafını gösteren geopolimerizasyona yardımcı olmaktadır.

2.5.2.2. Geopolimer betonların sülfat etkisi

Bakharev, (2005a) yaptığı çalışmada, alkaliler ile aktive edilmiş F sınıfı uçucu kül geopolimer malzemelerin sülfatlı ortama maruz kaldığında dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Geopolimer malzemelerin durabilitesini belirlemek için üç farklı deney hazırlamıştır. Deneylerinde ürettiği numuneleri 5 ay boyunca, %5 sodyum sülfat, %5 magnezyum sülfat ve %5 sodyum sülfat + %5 magnezyum sülfat çözeltilerin bekletmiştir. Üretilmiş numunelerin: ağırlık değişimi, basınç dayanımı gelişimlerinin, bozulma ürünlerini ve mikro-yapısal değişimlerini incelenmiştir. Sodyum sülfat çözeltisi içinde

sodyum silikat ile aktive edilmiş uçucu kül %18, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit karışımı ile aktive edilmiş numuneleri ise %65 dayanım azalmaları gösterilmiştir. Aynı çözeltide sodyum hidroksit ile aktive edilmiş olan test numunelerinde %4 bir dayanım artışı görülmüştür. Magnezyum sülfat çözeltisi içinde, sodyum hidroksit için %12, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit karışımı için %35 dayanım artışları, sodyum silikat için ise %24 bir dayanım azalma gözlemlenmiştir. En düşük mukavemet değişikliği, %5 sodyum sülfat + %5 magnezyum sülfat çözeltisi içinde bulunmuştur.

Skvara ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer numuneleri hazırlanmış ve daha uzun süre magnezyum ve sodyum sülfat çözeltilerinde tabi tutulmuştur. Geopolimerlerin numune bozulması belirtisi olmadığı için sülfatlara direndiğini belirtmişlerdir. Geopolimer numuneleri Portland çimento numuneleri ile karşılaştırıldığında, geopolimer numunelerinde yaklaşık 2 yıl boyunca sürekli olarak çözeltide tutulduklarında net bir hasar gözlenmemiştir.

Topçu ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada, alkaliler ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların sülfat etkisini belirlemek için çimento yerine %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Aktivatör olarak, sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikat kullanmışlardır. 25x25x285 mm prizma ve 5x5x5 mm küp numuneleri, sodyum sülfat çözeltisinde bekleterek, boy değişimleri ve dayanım kayıpları incelemişlerdir. Mikroyapı incelemek için numuneler keserek 1 cm boyutlarında küpler elde ederek taramalı elektron mikroskopunda yüzeylerin fotoğrafları çekilmiş ve içerdiği elementler belirlenmiştir. Sülfat etkisi ile alkaliler ile aktive edilmiş cürufu harçlarda etrenjit oluşumuna rastlamamışlar, fakat kısa mikro-çatlak oluşumlarını gözlemişlerdir. Yüksek fırın cürufu kullanılmayan harçlarında ise bağlayıcı fazda gözenekli yapı meydana gelmiş ve bu yapıda sülfat etkisi ile iğne şeklindeki etrenjit kristalleri oluştuğu gözlemlendiği bildirilmiştir.

Thokchom ve ark. (2010), yaptıkları çalışmada, magnezyum sülfat çözeltisindeki uçucu kül bazlı geopolimer harçların performansını incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Örnekler 24 haftaya kadar bekletilmek için ağırlıkça %10 magnezyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Örneklerin performansı, görsel görünüm, çözeltinin pH'ının değişmesi, ağırlıktaki değişim ve maruz kalma süresi boyunca basınç dayanımı değişikliği açısından değerlendirilmiştir. Örneklerin yüzeyinde başlangıçta yumuşak olan ancak daha sonra sert kristallere dönüştürülen beyaz tortular oluşmuştur. Solüsyonun pH'ı, ilk haftalarda harç örneklerinden göçünü gösteren belirgin bir şekilde artmıştır. 24 hafta sonunda örnekler az ağırlık kazanmış ve basınç dayanımı %56'ya kadar düşmüştür.

Bascarevic ve ark. (2015), tarafından yapılan çalışmada, iki farklı uçucu kül örneğine dayanan geopolimerler, 365 günlük bir süre boyunca sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisine (50 g/l) maruz bırakılmıştır. Sülfat çözeltisi saldırısının geopolimer harçların dayanımında küçük bir azalmaya neden olduğu bulunmuştur. Na_2SO_4 çözeltilerinin optik emisyon spektroskopisi ile analizi, geopolimer numunelerinin Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılmasının alüminosilikat jel, silikonun elemanlarından birinin sızmasına neden olmuştur. Numunelerin mineralojik analizleri, sülfat iyonları ile reaksiyona bağlı olarak herhangi bir yeni fazın oluşumunu göstermemiştir. Sülfat atağına bağlı olarak alüminosilikat geopolimer jelindeki değişiklikler, elektron mikroskopisi ve nükleer manyetik rezonans ile araştırılmıştır. Numunelerin sülfat çözeltisi ile işlenmesinin, alüminosilikat jel yapısında $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ bağlarının kırılmasına neden olduğu bulunmuştur. $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ bağlarının kırılması ve Si'nin ayrıştırılması, test sırasında sülfat çözeltisinin pH değerindeki artışın bir sonucudur.

Rajamane ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada, %5 MgSO_4 ve Na_2SO_4 çözeltilerinde 90 gün boyunca uçucu kül bazlı geopolimer betonun sülfat direncini gözlemlenmiştir ve kütle kaybının %2.4 olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, uçucu kül bazlı geopolimer beton, Portland çimento betonunda %9-38'e kıyasla daha az olan %2-29 basınç dayanım kaybı göstermiştir. Portland çimento betonun bozulması öncelikle betonun parçalanma, genişleme ve çatlaması ile sonuçlanan etrenjit ve fazla alçı oluşumundan kaynaklanmaktadır. Aksine, geopolimer beton genellikle genişlemeye neden olmak için karışımda mono-sulphoaluminat ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içermemektedir.

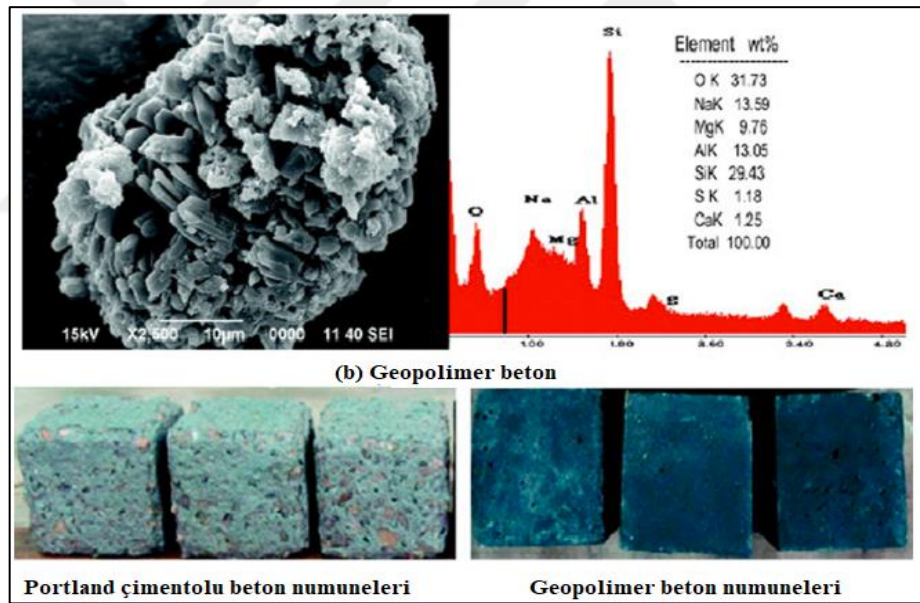
2.5.2.3. Geopolimer betonların asit etkisi

Bakharev, (2005b) yaptığı çalışmada, geopolimer betonların asitlere ve sülfatlara karşı üstün direnç gösterdiğini belirtmiştir. İsmail ve ark (2013b) yaptıkları çalışmada, sülfürik asidin iyonlaşmasından elde edilen H^+ iyonlarının geopolimerdeki alüminosilikat ağa zarar verebileceğini gözlemlemişler ve jel polimerden Al^{3+} iyonları ve silisik asit $\text{H}_4\text{O}_4\text{Si}$ üretmişlerdir.

Peterman ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada, sülfat atağı, etrenjit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) ve fazla alçı oluşumu nedeniyle Portland çimento betonun zayıflamasına neden olduğunu ve bunun betonda parçalanma ve çatlama ile sonuçlandığını belirtmişlerdir. Asitlere maruz kaldığında geopolimer malzemeler, kaynak malzemelerin düşük kalsiyum içeriği nedeniyle daha iyi performans gösterir. Ettringit ve

alçı taşı geopolimer çimentodan üretilmediği için düşük kalsiyumlu, ısı kür edilmiş uçucu kül bazlı geopolimer çimentoda sülfat atak mekanizması gözlenmediğini belirtmişlerdir.

Arriffin ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada, sülfürik asidin karışımı kül geopolimer örnekleri üzerindeki etkisini incelemişler ve kontrol örnekleriyle karşılaştırmışlardır. Geopolimer beton, 365 günden fazla bir süre boyunca %2 sülfürik aside maruz kalmış, geopolimer betonda sabit çapraz bağlı alüminat silikat yapısının oluşumu nedeniyle normal Portland çimento betonuna kıyasla daha iyi performans göstermiştir. Karışımı kül geopolimer numunesi için kütle ve basınç dayanımındaki kayıplar %8 ve %35 olarak gözlenirken, normal Portland çimento betonu için sırasıyla %20 ve %68 idi. Sülfürik aside maruz kaldığında karışımı kül geopolimer örneğinin SEM görüntüleri (Şekil 2.8) yeni farklı fazlarda kayda değer bir gelişme göstermezken, normal Portland çimento beton için yüzeyde yumuşak beyaz çökeltiler gözlenmiş ve 1.5 yıla kadar sülfürik aside maruz kaldığında çok gözenekli hale gelmiştir.



Şekil 2.8. Geopolimer ve Portland çimento betonların aside karşı tepkisi (Arriffin ve ark., 2013)

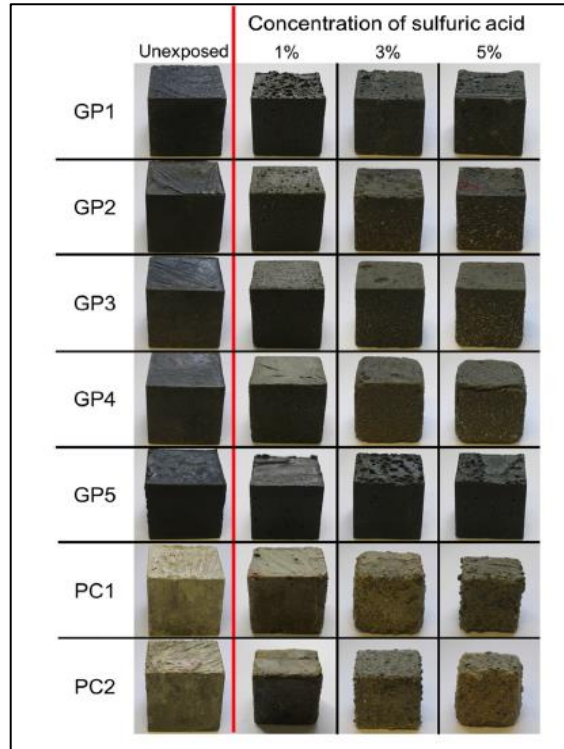
Deb ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, Nano-silika ile geopolimer beton içeren numunelerin sülfürik aside maruz kaldığında direnç gösterdiğini fark ettiler. Sonuç, maruz kalma süresi arttıkça, numunenin kütlelerinin yavaş yavaş azaldığını göstermektedir. Nano-silika içermeyen uçucu kül içeren geopolimer beton numunesinde kütle kaybının %5.41 olduğu, %2 Nano-silika içeren karışım için ise 90 günlük aside maruz kaldıktan sonra kütle kaybının %1.9 olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, Nano-silika içermeyen Portland

çimento betonunun kütle kaybı %6 olurken, %2 Nano-silika içeren karışım için 90 günlük maruz kaldıktan sonra sırasıyla %2.3 olduğu gözlenmiştir.

Okoye ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, silika dumanının varlığında geopolimer betonun dayanıklılığını incelemek için sodyum klorür ve sülfürik asit kullanmışlardır. Geopolimer betonun mukavemet ve kütlelerindeki kayıpların Portland çimento betonlarından daha az olduğunu bildirmişlerdir. Geopolimer beton asitlere maruz kaldığında kararlı direnci göstermektedir.

Aiken ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimerlerin cürufun içeriğindeki artışla birlikte gözenekliliğin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, elde edilen reaksiyon ürünleri sülfürik asit saldırısına karşı daha savunmasızdır. Ayrıca, alkali aktivatörün dozajının artırılmasının sülfürik aside karşı dirençte hafif bir etkiye neden olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak, geopolimer bağlayıcılar, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi Portland çimento betonlarına kıyasla sülfürik asit saldırısına karşı daha fazla direnç göstermiştir.

Rostami ve Brendley (2003) yaptıkları çalışmada, sülfürik asit direnci uçucu kül bazlı betonu ve Portland çimento betonunu incelemek için silika dumanı kullanmışlardır. Uçucu kül betonda %4'lük bir kütle kaybı gözlemlemişlerdir. Portland çimento beton için ise 90 gün boyunca %20 sülfürik aside maruz kaldığında kütle kaybı %25 çıkmıştır.



Şekil 2.9. Geopolimer ve Portland çimento betonlarına asit etkisi (Aiken ve ark., 2018)

2.5.3. Zeolit/uçucu kül/kalker geopolimerleri

Hardjito ve ark. (2008), düşük kalsiyum uçucu kül bazlı geopolimer harçların dayanım ve priz alma süreleri özelliklerini üzerinde bir çalışma gerçekleştirmiştir. 50x50x50 mm³ küp geopolimer harç numuneleri hazırlamışlardır. Test sonuçları, alkali aktivatörün yoğunluğu arttıkça, geopolimer harçların basınç dayanımlarını da arttığını ortaya koymuştur. 1 gün 65 °C sıcaklıkta kür edilen numuneler, en yüksek 28 gün basınç dayanımı göstermiştir. Aktivatör/uçucu kül kütle oranı 0.4 olan numuneleri en yüksek 28 günlük basınç dayanımı sağlamıştır. Elde edilen basınç dayanımı 1.6-20MPa aralığındadır.

Mingyu ve ark. (2009), katkı maddesi olarak zeolit veya bentonit içeren alkali aktive edilmiş uçucu kül bazlı geopolimer üzerinde araştırma yapmışlardır. Geopolimerler, ana başlangıç materyali olarak uçucu kül, ilave materyaller olarak zeolit veya bentonit ve aktivatör olarak NaOH ve CaO karışım kullanılarak sentezlenmiştir. Geopolimerlerin özellikleri üzerindeki karışım oranının etkisini analiz etmek için ortogonal bir dizi test protokolü kullanılmıştır. Sonuçlar, NaOH derişimin ve CaO içeriğinin, malzemelerin mekanik mukavemetinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle, katkı maddesi zeolit içeren uçucu kül bazlı geopolimer en yüksek mukavemeti ve en iyi sülfat direncini göstermiştir. Kızılötesi spektroskopisi, X-ışını ve SEM-EDX, zeolitin stabil bir zeolitik yapı oluşturmak ve geopolimerin özelliklerini geliştirmek için geopolimerizasyon işlemini içerebileceğini göstermiştir. Bentonit basitçe geopolimeri daha kompakt hale getirmek için bir dolgu maddesi görevi görür, ancak geopolimerin bileşimlerinde ve mikro yapılarında bir gelişme göstermez.

Villa ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada, alkali aktive edilmiş doğal zeolit kullanarak geopolimer üretimi üzerinde inceleme yapılmıştır. Aktivatör oranı, kür süresi ve sıcaklığının doğal zeolit üretilen geopolimerlerin mekanik dayanımına etkisi, silikat çözeltileri ve sodyum hidroksit kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, doğal zeolitin geopolimer oluşumuna yol açmak için aktivatör çözeltisi ilavesi ile reaksiyona girdiğini gösterilmiştir. Üretilen malzemelerin basınç dayanımların Portland çimentosuna benzer değerlere yükseldiği görülmüştür. 40 °C'lik bir kür sıcaklığında üretilen malzemeler en yüksek basınç dayanımını sağlamıştır. Basınç dayanımı artması için kullanılan hammaddelerin termal aktivasyona ihtiyacı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kısa kür sürelerine sahip yüksek sıcaklıklarda (60 ve 80 °C) da basınç dayanımı artırılmıştır.

Düşük sıcaklıklarda (25 ve 40 °C) ise dayanımda önemli bir artış sağlamak için uzun kür süreleri gerektirmiştir.

Hardjito ve Fung. (2010), taban küllü içeren geopolimer harç özellikleri üzerinde parametrik bir çalışma yürütmüşlerdir. Çeşitli parametriklerin kum yerine kısmı veya tam olarak taban küllü değiştirerek uçucu kül bazlı geopolimer harçların mekanik özellikleri üzerinde araştırma yapmışlardır. Çalışmada sonuçlar: taban kül içeriğinin artması, geopolimer harçların basınç dayanımlarını azaltmıştır. %10 taban kül içeren harçların basınç dayanımı, taban kül içermeyen harçlarla karşılaştırılabilir. Kür sıcaklığın artması, harçların basınç dayanımı artmıştır. Potasyum hidroksit yoğunluğundaki artış, aynı zamanda harçların basınç dayanımı artmıştır. Taban kül içeriğinin arttırılması, taze harçların işlenebilirliğini artmıştır, ancak taban kül %75 fazla kullanılması azaltmıştır.

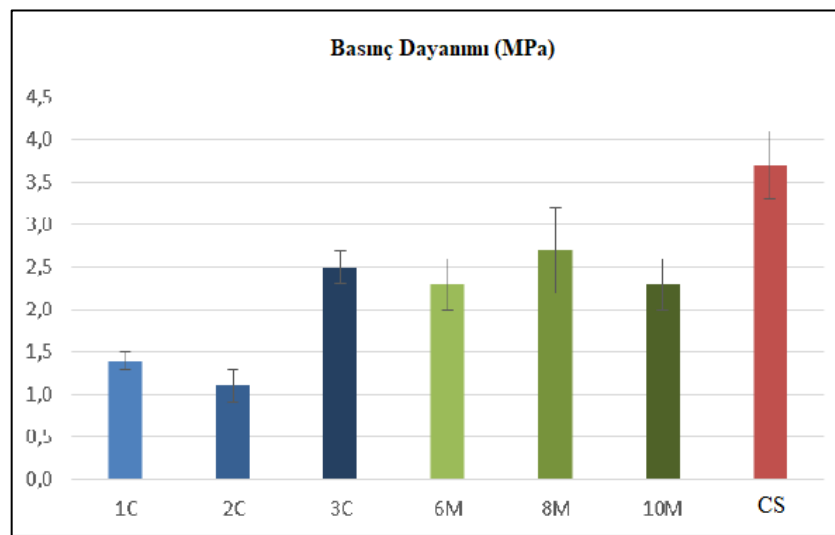
Görhan ve Kürklü (2014) yaptıkları çalışmada, farklı NaOH konsantrasyonları, farklı kür süreleri ve farklı kür sıcaklıklar kullanarak F sınıfı uçucu kül kullanarak geopolimer harçlar üretmişlerdir. Sonuçlar, kür sıcaklığının ve kür süresinin geopolimer harçların fiziksel özellikleri üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. NaOH konsantrasyonunun 85 °C'de kür edilen harcın özellikleri üzerinde net bir etkisi olduğu gözlenmiştir. 24 saat boyunca sırasıyla 65 °C ve 85 °C'de kür edilen 6M konsantrasyondaki harçtan 21.3 MPa ve 22 MPa basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

Cwirzen ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada, metakaolin ve kalker harmanlanmış ve sodyum hidroksit kullanılarak aktive edilmiştir. Nispeten düşük mukavemet gösteren ancak daha karmaşık sistemlerin reaksiyon süreçlerinin daha iyi anlaşılacağı bir model sistem olarak potansiyel sunan katı geopolimer bağlayıcılar oluşturmuşlardır. Kütleme prosedürünün etkileri, kalker içeriği ve aktivatörün alkalinitesi, sertleştirilmiş hamurların mineralojisi, mekanik özellikleri ve mikroyapısı ile ilişkilendirilebilir. Sonuçlar, metakaolin-kalker karışımlarının NaOH ile Alkali aktivasyonunun, alkali alüminosilikat fazlarından ve tabakalı kalsiyum karboalüminatlardan oluşan sertleştirilmiş bağlayıcı ürünlerin oluşumuna yol açtığını göstermiştir.

Assi ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada, uçucu kül bazlı geopolimer betonun ortaya çıkan basınç dayanımı ile ilgili olarak aktivatör tipinin, kür prosedürünün ve uçucu kül kaynağının etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, elde edilen betonun yüksek basınç dayanımı potansiyeline sahip olduğunu ve basınç dayanımının uçucu kül kaynağından doğrudan etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca, sodyum silikat kullanımına kıyasla aktive edici çözeltilde silis dumanı kullanıldığında basınç dayanımının kür durumundan önemli ölçüde etkilenmediğini göstermiştir.

Baykara ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, mordenit (zeolit) bakımından zengin tüflerden türetilen geopolimerlerin geliştirilmesi amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Mordenit bazlı geopolimer üretmek için üç aktivatör karışım tasarımı: sodyum hidroksit, sodyum silikat ve kalsiyum hidroksit ve kür sıcaklıkları değiştirilerek kullanılmıştır. 24 saat sonra elde edilen en yüksek basınç dayanımı (10 MPa) ile en iyi karışım tasarımı ve kür sıcaklığı şudur: sodyum hidroksit 10 M, sodyum silikat sodyum hidroksit oranı 0.5. %3 kalsiyum hidroksit ve 60 °C kür sıcaklığı. Daha sonra Avrami-Erofi'ev modeli kullanılarak erken yaş eraksiyon kinetiği kurulmuştur. Reaktif bileşenin yan etkisi olarak karbonatlaşma deney sırasında geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerinde herhangi bir etkiye neden olmadığını da gözlenmiştir.

Nikolov ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, üç farklı alkali aktivatörler: sodyum hidroksit, sodyum silikat ve sodyum karbonat kullanılarak zeolit bazlı geopolimer harçları üretmişlerdir. Geopolimerin geleneksel yöntemlerle mekanik özelliklerin belirlenmesi için test edilmiştir. Geopolimerin 28 günlük basınç dayanımı sonuçlar şekilde 2.10'da göstermektedir. Sonuçlar, camı suyu ile aktive edilen zeolit en yüksek dayanım (3.7 MPa) gösterirken, sodyum hidroksit aktive edilen numuneler 8M derişimde en yüksek dayanım (2.7 MPa) göstermiş ve sodyum karbonat aktive edilen numuneler, soda/zeolit=0.32 oranında en yüksek dayanımı (2.5 MPa) (3C) göstermiştir. Doğal zeolit, normal kür sıcaklıklarında (20°C) yavaş dayanım kazanma özelliği göstermektedir.



Şekil 2.10. Geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımı Nikolov ve ark. (2017)

Auqui ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, Ekvador doğal zeolit bazlı geopolimerlerin göç tipi korozyon önleyici ve kür sürelerinin termal stabilite ve mekanik

özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Üretilmiş geopolimer numuneleri 24 saat 40 °C'de kür edilmiş, sonra 6 gün boyunca oda sıcaklığında uygulanmıştır. 3-5.5 MPa aralığında basınç dayanımı bulunmuştur. Elde edilen basınç dayanımı değerleri, doğal zeolitlerin alkali aktivasyonunun kullanılmasının, geopolimerlerin üretimi için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Geopolimerlerin mekanik özellikleri, göçmen korozyon önleyici MCI-2005 NS ilavesinden hafifçe etkilenmiş fakat olumsuz yönde etkilenmemiştir. Bu sonuçlar, gerçekte çelik takviyeli geopolimer beton araştırmalarında kullanılacaktır.

Özen ve Alam. (2018) yaptıkları çalışmada, doğal zeolit geopolimer çimentoların mekanik, mineralojik ve mikro-yapısal özelliklerini incelemişlerdir. Basınç dayanım analizini, doğal zeolitlerin geopolimer çimento malzemeleri olarak kullanılabilirliğini göstermek için yapmışlardır. Bu nedenle alkaliler ile aktive edilmiş doğal zeolit hamurları hazırlanmıştır. Geopolimer hamurların sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı mekanik dayanımların gelişmesinde önemli rol oynayarak, en iyi basınç dayanım performansı doğru malzeme oranlarının ve yeterli kür sıcaklığının kombinasyonuna bağlıdır. Sonuç olarak, doğal zeolit içeren tüfler çevreye duyarlı ve ekonomik geopolimer çimento üretimi için uygun bir malzeme olduğu bildirilmiştir.

Ulloa ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, MCI-2005 NS göç tipi korozyon önleyicinin eklenmesinin etkisinin de basınç dayanımı ile değerlendirildiği doğal zeolitler kullanarak geopolimer harç numuneleri hazırlamışlardır. Zeolit geopolimer harçlar üretmek için sodyum silikat ve sodyum hidroksit olmak üzere iki aktivatör kullanılmıştır. Aktivatör/zeolit oranı 0.5, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 3 ve 60 °C'ye karşılık gelen karışım ve kür sıcaklığı, 28 gün sonra en yüksek basınç dayanım (17 MPa) sağlanmıştır. Üretilen zeolit geopolimer harçlar, elde edilen kabul edilebilir basınç dayanımı nedeniyle gerçek hayattaki uygulamalarda kullanılabilir.

Morsy ve ark. (2019) yaptıkları çalışmalarda, metakaolin, kalker tozu ve fosforik asit kullanılarak sentezlenen yalıtım malzemesi üretmeyi amaçlamıştır. Geopolimer hamuru üretmek için fosforik asit aktivatör olarak kullanılarak metakaolin aktive edilmiştir. Daha sonra metakaolin kısmen kalker tozu ile %1'den %5'e değiştirilmiştir. Çalışmaların sonuçlarını, kabul edilen bir basınç dayanımına sahip tüm karışımların iyi bir ısı yalıtımını göstermişlerdir. Isı yalıtımı, daha yüksek toplam gözeneklilik ve daha düşük basınç dayanımı ile birlikte artan kalker tozu içeriği ile artmıştır.

Pedro ve ark. (2020) yaptıkları çalışmalarda, yüksek kalker içeriğine sahip metakaolin kompozit öncülleri ile sürdürülebilir alkali aktive çimento tasarlamak için

yenilikçi bir yaklaşım sunmuşlardır. Sonuçlar, optimum çimento formülasyonlarının %80 kalker ve %20 metakaolin olduğunu ve 50MPa'nın üzerinde 28 günlük bir mukavemete ulaşmak için sadece %4.7 Na₂O gerektirdiğini göstermiştir. Ayrıca, optimal alkali ile aktive edilmiş kalker-metakaolin çimentosunun mikro yapısı, elde edilen mukavemetle anlaşarak yoğun ve homojendir. Kalkerin kimyasal reaksiyonlarda aktif olarak karıştığı gözlenmiştir, kısmen reaksiyona giren kalker parçacıkları, çimentolu matris boyunca dağıtıldığını göstermiştir. X-ışını kırınımı, gismondine'in yanı sıra amorf reaksiyon ürünlerinin oluşumunu göstermiştir.

Nikolov ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada, metazeolit bulmak için doğal zeolit kalsine etmişler ve daha sonra silikat ve alüminat aktivatörleri ile metazeolit aktive ederek metazeolit bazlı geopolimer üretmişlerdir. Potasyum silikat çözeltisi ile aktive edilen metazeolit bazlı geopolimer en yüksek basınç dayanımı (43 PMA ± 4 MPa) sağlanmıştır. Ayrıca, silikat ve hidroksit aktive edilen geopolimerler yüksek büzülme göstermiştir. Öte yandan, alüminyum aktivatör kullanılarak geopolimerlerin büzülmesi azaltılmıştır.

Özen ve Uzal. (2021) yaptıkları çalışmada, bir geopolimer bağlayıcıda klinoptilolit reaktivitesini etkileyen paramaterleri göz önünde bulundurarak klinoptilolit bazlı geopolimerleri araştırmışlardır. İnceleme sonuçları, Bayburt'tan klinoptilolit taşıyan tüften yapılan geopolimerlerin en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Hammaddenin kimyasal ve mineralojik özellikleri, geopolimerik reaksiyonu potansiyel olarak kontrol eden önemli paramterlerdir, fiziksel özellikler (parçacık boyutu ve BET'e özgül yüzey alanı) esas olarak geopolimerizasyonun erken aşamalarında etkilidir.

2.6. Taguchi Yöntemi

Tan ve ark. (2005) çimento esaslı harçların kanamasında bentonit, uçucu kül ve silis dumanın etkilerini araştırmak için Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Üç faktörlü ve dört seviyeli standart L16 (43) ortogonal dizi uygulanmışlardır. Kullanılan faktörler şunlardır: bentonit (%0-0.5-1-3), uçucu kül (%10-20-30-40) ve silis dumanı (%0-5-10-20). Su/katı oranı 0.75 ve 1.0 olan her iki harç için %3 bentonit, %10 uçucu kül ve %20 silis dumanında minimum kanama için optimum koşullar elde edilirken, su/katı oranı 1.25 için %3 bentonit, %20 uçucu kül ve %20 silis dumanı elde edilmiştir. Taguchi yönteminin, bu tür çalışmalar için en uygun koşulları elde etmek için umut verici bir araç olduğu bulunmuştur.

Türkmen ve ark. (2008) silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ile hazırlanan yüksek dayanımlı beton karışımlarına kimyasal saldırının neden olduğu hasarı değerlendirmek için laboratuvar testleri gerçekleştirmiştir. Taguchi yöntemi, en dayanıklı beton karışımlarını verecek fiziksel özellikleri elde etmek için gereken optimum koşulları belirlemek için kullanılmıştır. Beş faktörlü ve dört seviyeli standart L16 ortogonal diziyi uygulanmışlardır. Analiz sonuçları, en dayanıklı karışımların %10 silis dumanı ve %5 yüksek fırın cürufu ile hazırlanan karışım olduğunu göstermiştir. Bu karışımın su/bağlayıcı oranı 0.30 olup, 120 gün süreyle kireçli suda kürlenmiştir.

Olivia ve Nikraz (2011) uçucu kül geopolimer karışımlarının Taguchi yöntemiyle optimizasyonunu tasarlanmışlar ve sonra optimum karışımlardan üretilen betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını incelemişlerdir. Taguchi standardı L9 (3^4) ortogonal dizisine göre, agrega içeriği ($1800-1848-1896 \text{ kg/m}^3$), alkali çözelti/uçucu kül oranı (0.3-0.35-0.40), sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı (1.5-2-2.5) ve kürlenme yöntemi (24 saat $60 \text{ }^\circ\text{C}$ -12 saat $70 \text{ }^\circ\text{C}$ -24 saat $75 \text{ }^\circ\text{C}$) araştırılmıştır. Sonuçlar, 28 günde 55 MPa basınç dayanımına sahip geopolimer betonun Taguchi yöntemi yardımıyla üretildiğini göstermiştir.

Riahi ve ark. (2012) Taguchi yöntemi ile 2 ve 7 günlük su küründe kül bazlı geopolimerlerin basınç dayanımını tasarlanmışlardır. L9 Taguchi dizisi kullanılarak fırın kürlenme sıcaklığı ($25-70-90 \text{ }^\circ\text{C}$), fırın kürlenme süresi (2-4-8 saat) ve sodyum hidroksit konsantrasyonu (5-8-12 M) olmak üzere üç faktör incelenmiştir. Üretilen tüm numunelerde, en yüksek basınç dayanımını elde etmek için optimum fırın kürlenme sıcaklığı her zaman $90 \text{ }^\circ\text{C}$ olmuştur. Ayrıca, yaklaşık olarak tüm numunelerde hafif ve orta konsantrasyonda sodyum hidroksit uygulanarak optimum dayanım elde edilmiştir.

Hadi ve ark. (2017), ortam kürlenme koşulunda alüminosilikat kaynağı olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren geopolimer beton için optimum karışım oranlarını tasarlamak için Taguchi yöntemini kullanmıştır. Bağlayıcı içeriğinin, alkali aktivatörün bağlayıcı içeriğine (Al/Bi) oranının, sodyum silikatın sodyum hidroksit (SS/SH) oranına ve sodyum hidroksit (SH) konsantrasyonunun geopolimer beton üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Toplam dokuz karışım tasarımı değerlendirilmiştir. Bağlayıcı içeriği 450 kg/m^3 , Al/Bi oranı 0.35, SS/SH oranı 2.5 ve SH konsantrasyonu 14 M olan numunelerin en yüksek 7 günlük basınç dayanımını (60.4 MPa) ürettiği bulunmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölüm, deneysel çalışmada kullanılan malzemeler (Bölüm 3.1), optimum karışım belirtmek için yapılan ön deneyler (Bölüm 3.2) ve üretilen geopolimer numuneleri ve uygulanan deneyler (Bölüm 3.3) olmak üzere üç ayrı bölümden oluşmaktadır.

3.1. Materyal

Yapılan deneysel tez çalışmasında; geopolimer harçları üretmek için doğal zeolit (DZ), uçucu kül (UK), toz kalker (LS), standart ince agrega, sodyum silikat (NS), sodyum hidroksit (NH) ve su kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıdaki bölümlerde ayrı ayrı tanımlanmıştır.

3.1.1. Doğal zeolit

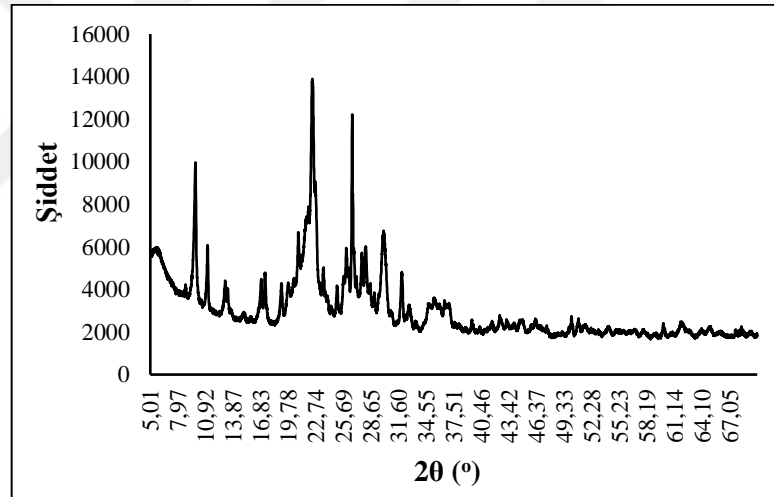
Bu çalışmada ana malzeme olarak kullanılan doğal zeolit (DZ), Manisa Gördes Zeolit Fabrikadan temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan doğal zeolit Şekil 3.1'de göstermektedir. Necmettin Erbakan Üniversitesi 'den Rigaku-NEX-CG X-ışını floresan (XRF) aparatı kullanılarak belirlenen doğal zeolit kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir. Ana iki oksit (SiO_3 ve Al_2O_3) içeriği açısından %72.44'ten fazla olduğunu bulunmuştur. Doğal zeolit mineral fazları, PANalytical EMPYREAN XRD aparatı kullanılarak X-ışını kırınımı (XRD) desenini Şekil 3.2'de göstermektedir. Şekil 3.3'te doğal zeolit tozun mikro yapısı ve morfolojisini görüntüleri gösterilmektedir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntülerinden görüldüğü gibi, doğal zeolit, bazıları tabut şeklindeki kristallere sahip olan tablo plakalarının ve çıtaların karakteristik morfolojisine sahiptir. Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) kullanılarak doğal zeolit kantitatif kimyasal analizi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 3.2'de sunulmuştur. EDS ölçümüne göre, doğal zeolit Si/Al oranı 4.90 olarak bulunmuştur.



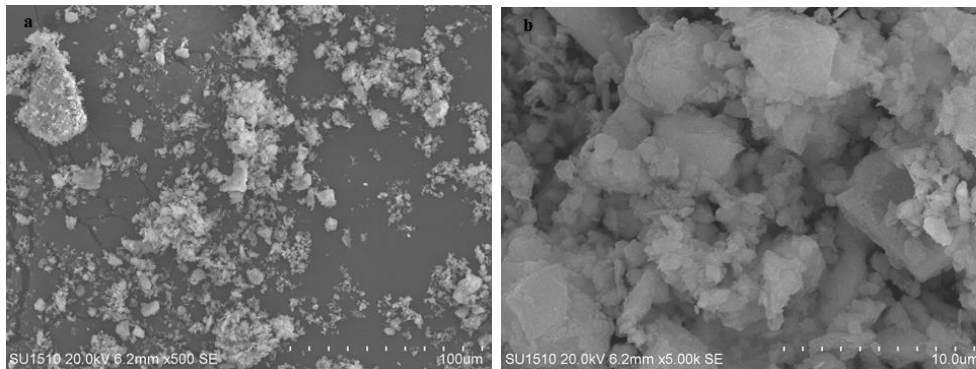
Şekil 3.1. Doğal zeolitin numunesi

Çizelge 3.1. Doğal zeolitin kimyasal bileşimi

Kimyasal Analiz	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	ZrO ₂	TiO ₂	Kızdırma kaybı
Ağırlık (%)	63.6	10.84	3.24	2.55	1.55	0.8	0.5	0.2	0.15	16.5



Şekil 3.2. Doğal zeolitin XRD deseni



Şekil 3.3. (a) 500x ve (b) 5000x kez büyütülmüş doğal zeolitin SEM mikrografi

Çizelge 3.2. Doğal zeolitin EDS eleman analizi

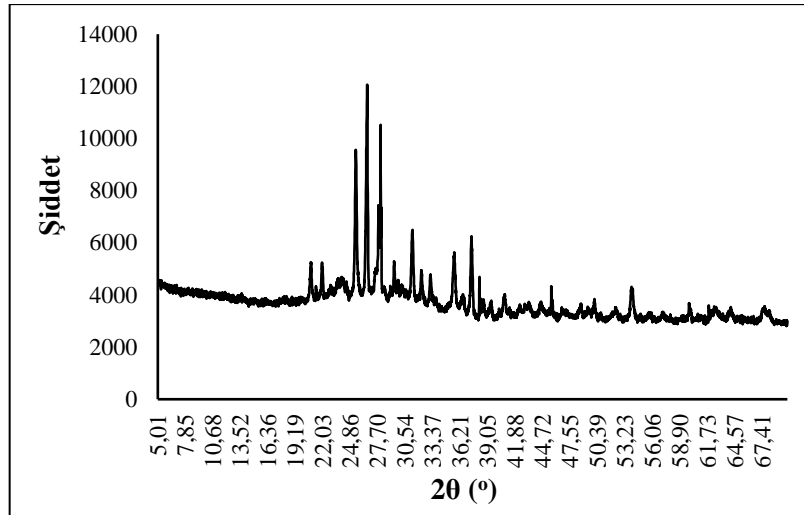
Eleman	O	Al	Si	K	Ca	Fe	Mg	Si/Al	Total
Ağırlık (%)	61.28	5.52	27.07	1.9	1.82	1.58	0.74	4.90	100

3.1.2. Uçucu kül

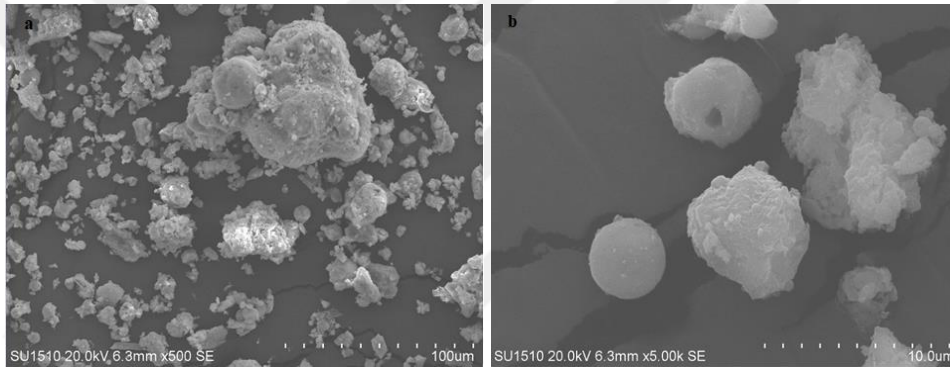
Araştırmada Sivas Kangal Termik Santrali uçucu kül tesisinden temin edilen C sınıfı uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan uçucu kül Şekil 3.4'te görülmektedir. Necmettin Erbakan Üniversitesi 'den Rigaku-NEX-CG X-ışını floresan (XRF) aparatı kullanılarak belirlenen uçucu külün kimyasal bileşimi Çizelge 3.3'te verilmiştir. Ana üç oksit (SiO_3 , CaO ve Al_2O_3) içeriği açısından %62.4'ten fazla olduğunu bulunmuştur. Uçucu külün mineral fazları, PANalytical EMPYREAN XRD aparatı kullanılarak X-ışını kırınımı (XRD) deseni Şekil 3.5'te görülmektedir. Orijinal uçucu külün karakteristik morfolojisi Şekil 3.6'da SEM görüntülerinde gösterilmiştir. Uçucu külün farklı boyutlarda küresel parçacıklardan oluştuğu görülebilmektedir. EDS kullanılarak uçucu külün kantitatif kimyasal analizi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 3.4'de sunulmuştur. EDS ölçümüne göre, uçucu külün Si/Al oranı 1.93 olarak bulunmuştur.

**Şekil 3.4.** Uçucu külün numunesi**Çizelge 3.3.** Uçucu külün kimyasal bileşimi

Kimyasal Analiz	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	ZrO_2	TiO_2	MnO	SO_3	Kızdırma kaybı
Ağırlık (%)	33.1	10.4	18.9	7.48	2.94	1.5	0.4	0.84	0.05	7.58	14.4



Şekil 3.5. Uçucu külün XRD deseni



Şekil 3.6. (a) 500x ve (b) 5000x kez büyütülmüş uçucu külün SEM mikrografi

Çizelge 3.4. Uçucu külün EDS eleman analizi

Eleman	O	Al	Si	K	Na	Ca	Fe	Mg	S	Toplam
Ağırlık (%)	71.23	6.11	11.79	0.66	0.3	4.49	1.66	2.31	1.42	100

3.1.3. Kalker

Çalışmada kullanılan toz kalker Nuh Yapı Firmasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan toz kalker Şekil 3.7’de göstermektedir. Necmettin Erbakan Üniversitesi’den Rigaku-NEX-CG X-ışını floresan (XRF) aparatı kullanılarak belirlenen kalkerin kimyasal bileşimi Çizelge 3.5’te verilmiştir. Toplam ana oksitleri (CaO, SiO₃ ve Al₂O₃) %85.23’ten fazla olduğunu bulunmuştur. Kalkerin mineral fazları, PANalytical EMPYREAN XRD aparatı kullanılarak X-ışını kırınımı (XRD) deseni Şekil 3.8’de görülmektedir. Orijinal toz kalkerin karakteristik morfolojisi SEM analizi kullanılarak

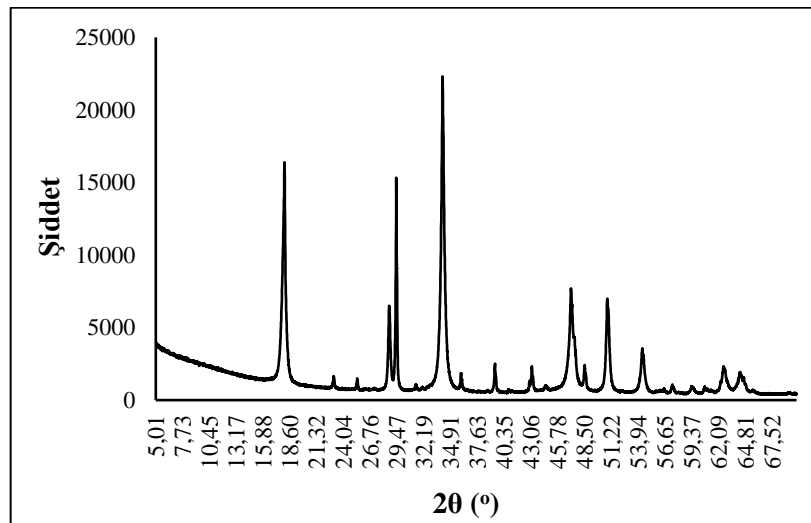
yapılmış ve sonuçlar Şekil 3.9'da gösterilmiştir. SEM görüntülerinden de görülebileceği gibi toz kalker parçacıkları ne küresel ne de tablo şeklindedir, ancak toz kireçtaşının mikro yapısında kristal faz gözlenmektedir. EDS kullanılarak kalkerin kantitatif kimyasal analizi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.



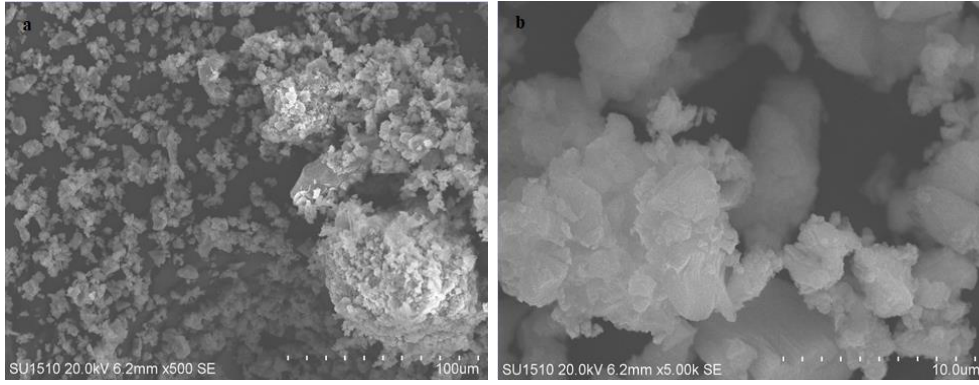
Şekil 3.7. Kalker tozun numunesi

Çizelge 3.5. Toz kalkerin kimyasal bileşimi

Kimyasal Analiz	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	ZrO ₂	TiO ₂	SO ₃	Kızdırma kaybı
Ağırlık (%)	6.58	3.65	75	0.1	1.2	0.1	0.42	0.1	0.65	11.2



Şekil 3.8. Kalkerin XRD deseni



Şekil 3.9. (a) 100x ve (b) 5000x kez büyütülmüş toz kalkerin SEM mikrografi

Çizelge 3.6. Toz kalkerin EDS eleman analizi

Eleman	O	Ca	Mg	C	Toplam
Ağırlık (%)	41.34	20.8	0.39	38	100

3.1.4. Standart ince agrega

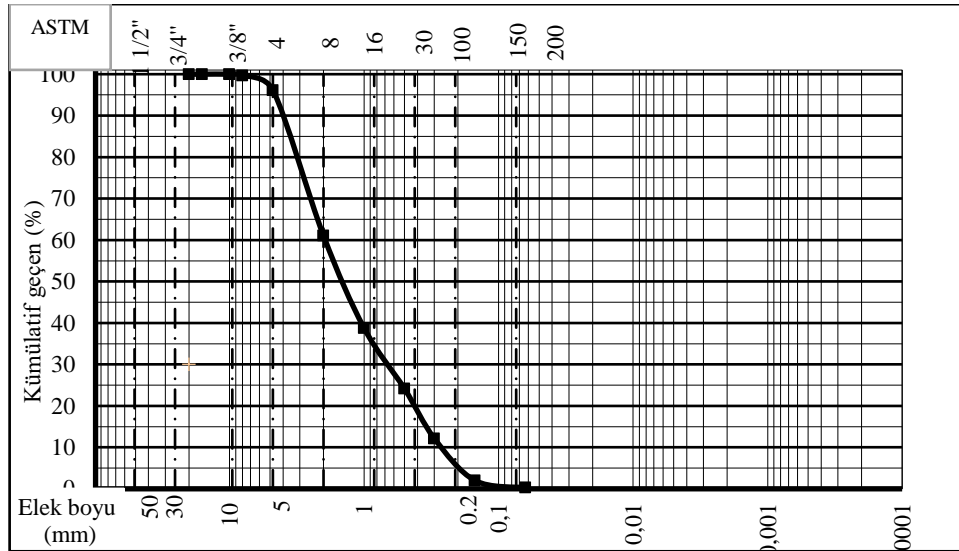
Bu deneysel çalışmada, ince agrega olarak maksimum agrega boyutu 2 mm olan temiz ve kuru nehir kumu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan ince agrega Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Karışımlarda kullanılan ince agreganın elek analizi sonucunda belirlenen tane büyüklüğü dağılımı ve gradasyonu sırasıyla Çizelge 3.7'de ve Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.10. İnce agreganın numunesi

Çizelge 3.7. Bu çalışmada kullanılan ince agrega gradasyonu

Elek Boyutu (mm)	31.5	20	16	11.2	8	4.75	2	1	0.5	0.3	0	0.06	Pan
Geçen Miktarı (%)	100	100	100	100	100	96.14	61	39	24.1	12.13	2	0.03	0



Şekil 3.11. İnce agrega elek analizi

3.1.5. Kullanılan su

Geopolimer harçların hazırlanmasında karışım suyu olarak şehir şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır.

3.1.6. Alkali aktivatörler

Geopolimer harçların aktive edilmesi için sodyum silikat ve sodyum hidroksit alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Sodyum hidroksit granüle formda ve %98 saflık değerindedir. Firma verilerine göre sodyum silikatın özgül ağırlığı 1.35 g/cm^3 ve alkaline modülü 2 değerindedir ($\text{Na}_2\text{O} = \%13$, $\text{SiO}_3 = \%27$ ve su = %60). Sodyum hidroksit çözeltisi 24 saat önce hazırlanmış ve laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Kullanılan sodyum hidroksit ve sodyum silikat sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Sodyum hidroksit peletleri



Şekil 3.13. Sodyum silikat çözeltisi

3.2. Ön Deneyler

3.2.1. Zeolit bazlı geopolimer harçların Taguchi yöntemi ile tasarlanması

Taguchi yöntemi, son yıllardaki bilgisayar teknolojisindeki hızlı ilerlemelerin sonucunda, çeşitli bilimsel araştırmalarda, endüstri ürünleri tasarımlarında ve deney tasarımlarında kullanılmaktadır. Parametre sayısının ve seviyelerinin az olduğu deneylerde Tam Faktöriyel deney tasarımı kullanılmaktadır: Örneğin, 3 parametrelili ve 2 seviyeli bir deneysel çalışma için $2^3 = 8$ adet deney yapılması gerekmektedir. Diğer yandan, parametre sayısının ve seviyelerinin fazla olduğu deneylerde Tam Faktöriyel deney tasarımı kullanılması çok zordur. Örneğin, 7 parametrelili ve 3 seviyeli bir deneysel çalışma için ise $3^7 = 2187$ adet deney yapılması gerekmektedir. Bu deney sayısı zaman, maliyet ve değerlendirme açısından uygulanması oldukça zordur (Tan ve Zaimoglu, 2003). Taguchi Yöntemi deney sayısı çok fazla olan çalışmalarda büyük kolaylıklar sağlamakta ve Tam Faktöriyel tasarıma alternatif olarak kullanılabilir. Çizelge 3.8’de, Taguchi ortogonal dizi tasarımında gerekli deney sayısının tam faktöriyel tasarımdan daha az olduğunu göstermektedir. Taguchi yöntemi, ortogonal dizileri kullanılarak kontrol edilmeyen faktörlerin etkilerini minimize etmeye çalışan bir deneysel tekniğidir. Farklı faktör seviyeleri için Taguchi yöntemi ile geliştirilen çeşitli ortogonal dizi tabloları vardır (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8. Farklı faktör seviyeleri için ortogonal diziler tablosu

Taguchi Ortogonal dizi	Parametreler	Seviyeler	Taguchi Yöntemi Deney sayısı	Tam Faktöriyel Deney sayısı
L4 (2 ³)	3	2	4	8
L8 (2 ⁷)	7	2	8	128
L9 (3 ⁴)	4	3	9	81
L16 (4 ⁵)	5	4	16	1024
L16 (2 ¹⁵)	15	2	16	32768

Taguchi yönteminde optimizasyon kriteri olarak performans-istatistiği (Signal-noise; S/N: sinyal-gürültü oranını) kullanılmaktadır. S/N oranı, standart sapma yerine ölçülebilir bir değer olarak kullanılmaktadır. En basit hali ile S/N oranı, ortalamanın (sinyal) standart sapmaya (gürültü) oranıdır. Üç çeşit S/N oranı var, bunlar şu şekilde sıralanmaktadır: en büyük-en iyi, normal-en iyi ve en küçük-en iyidir.

- En küçük en iyi olduğu durumda: Bu tür problemlerde, Y'nin hedef değeri sıfırdır. En küçük değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranını ifade eder. Örneğin gürültü, zararlı maddeler, kirlenme, yüzey pürüzlülüğü, lastik aşınması ve proses arızası vb. En küçük en iyi S/N için kullanan Denklem 3.1'de verilmektedir.

$$S/N_L = -10 \text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_1^n Y_i^2 \right] \quad (3.1)$$

- En büyük (yüksek) en iyi olduğu durumda: Bu durumda ise, Y'nin değeri sonsuzluk olarak ideal bir hedefi olan negatif olmayan ölçülebilir bir özelliktir. En büyük değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranını ifade eder. Örneğin güç, beton dayanımı ve verim vb. En büyük en iyi S/N için kullanan Denklem 3.2'de verilmektedir.

$$S/N_L = -10 \text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_1^n \frac{1}{Y_i^2} \right] \quad (3.2)$$

S/N_L: sinyal-gürültü oranı, n: Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı ve Y_i: i deneyin sonucudur

- Nominal en iyi olduğu durumda: Bu durumda ise, ikili toleransı olan bir karakteristiğimiz olduğunda nominal değer hedefdir. Yani bütün parçalar bu değere getirilirse, varyasyon sıfır olur ve en iyisidir. Hedef değer en iyi durumu için sinyal/gürültü oranını ifade eder. Örneğin: ürün boyutları gibidir. Normal en iyi S/N için kullanan Denklem 3.3'te verilmektedir.

$$S/N_L = -10 \text{Log} \left[\frac{1}{n} \sum_1^n \frac{\bar{y}}{S_i^2} \right] \quad (3.3)$$

Kalite karakteristik kategorisinden bağımsız olarak, daha yüksek bir S/N oranı daha iyi kalite özelliklerine karşılık gelir. Bu nedenle, proses parametrelerinin optimal seviyesi en yüksek S/N oranına sahip seviyedir.

Bu çalışmada yapılan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak S/N oranları, en büyük-en iyi (the bigger the better) sinyal-gürültü (S/N) baz alınarak yukarıdaki Denklem 3.2'e göre hesaplanmıştır. S/N oranları hesaplandıktan sonra grafik olarak şekilde çizilecektir ve S/N'yi maksimum yapan parametre seviyesi bu parametreyi optimum seviyesi olacaktır (Tan ve Zaimoglu, 2003).

Bu çalışmada da kullanılan L9(3⁴) 4 parametrelili ve 3 seviyeli ortogonal dizisi Çizelge 3.9'da verilmiştir. Çizelge 3.9'daki P1, P2, P3 ve P4: çalışmada seçilen parametreleri, her deney numarası satırındaki rakamlar ise, çalışmadaki parametrelerin seviyelerini göstermektedir.

Çizelge 3.9. Ortogonal Dizin L9(3⁴)

Deney No	Parametreler ve parametre seviyeleri			
	P1	P2	P3	P4
L1	1	1	1	1
L2	1	2	2	2
L3	1	3	3	3
L4	2	1	2	3
L5	2	2	3	1
L6	2	3	1	2
L7	3	1	3	2
L8	3	2	1	3
L9	3	3	2	1

Bu bölümde, zeolit bazlı geopolimer harçların optimum karışım oranını elde etmek için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Zeolit bazlı geopolimerlerin optimal karışım oranını bulunmak için, L9(3⁴) ortogonal dizisine göre 4 parametrelili ve 3 seviyeli bir deney tasarımı kurulmuştur. İncelenecek 4 parametreleri ve seviyeleri şunlardır: Bağlayıcı miktarı (450, 500 ve 550), aktivatör/bağlayıcı (A/B) oranı (0.8, 0.9 ve 1), sodyum silikat/sodyum hidroksit (NS/NH) oranı (1, 1.5 ve 2), ve sodyum hidroksit (NH) molariteleri (8M, 10M ve 12M) (Çizelge 3.10). Taguchi deney tasarımı kullanılarak kurulan L9(3⁴) ortogonal dizisine göre toplam 9 karışım hazırlanmıştır. Bileşen parametreleri ve karışım oranları (L1-L9) Çizelge 3.11 ve 3.12'de verilmiştir. Zeolit bazlı

geopolimer harçların işlenebilirliğine göre ilave su eklenmiştir. İlave su eklenmesi için, su/bağlayıcı oranı 0.65 sabit tutulmuştur.

Çizelge 3.10. Taguchi deney tasarımında parametreler ve seviyeler

Parametre	Seviye		
	1	2	3
Bağlayıcı miktarı (gr/dm ³)	450	500	550
A/B oranı	0.8	0.9	1,0
NS/NH oranı	1	1.5	2
NH (M)	8	10	12

Çizelge 3.11. Geopolimer harçlarda kullanılan parametreler ve değerler

Deneysel seriler	Bağlayıcı	A/B	NS/NH	NH (M)
L1	450	0.8	1	8
L2	450	0.9	1.5	10
L3	450	1	2	12
L4	500	0.8	1.5	12
L5	500	0.9	2	8
L6	500	1	1	10
L7	550	0.8	2	10
L8	550	0.9	1	12
L9	550	1	1.5	8

Çizelge 3.12. Karışım oranları

Materyal	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9
Zeolit (gr)	450	450	450	500	500	500	550	550	550
A/B	0.8	0.9	1	0.8	0.9	1	0.8	0.9	1
NS/NH	1	1.5	2	1.5	2	1	2	1	1.5
Aktivatör (gr)	360	405	450	400	450	500	440	495	550
NS (gr)	180	243	300	240	300	250	293.3	247.5	330
NH çözültisi (gr)	180	162	150	160	150	250	146.7	247.5	220
NH (M)	8	10	12	12	8	10	10	12	8
NH (gr)	57.6	64.8	72	76.8	48	100	58.7	118.8	70.4
Su (gr)	184.5	146.7	112.5	181	145	175	181.5	207	159.6
Kum (gr)	1125	1125	1125	1125	1125	1125	1125	1125	1125

*A: alkali aktivatör, B: bağlayıcı, NS: sodyum silikat, NH: sodyum hidroksit

Karıştırma işlemi sırasında, önce zeolit karıştırıcıya kuru halde ilave edilmiş, sodyum silikat ve sodyum hidroksit ayrı ayrı ilave edilmiştir ardından 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra kumu yavaş yavaş ilave edilmiş ve karışım homojen hale gelene kadar yaklaşık 2 dakika daha karıştırılmıştır. Hammaddelerin karıştırılması için toplam süre 4 dakika olmuştur. Geopolimer harçların karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, 40x40x160 mm³ boyutundaki kalıplara dökülmüş ve bir dakika vibratör uygulanmıştır. Numuneleri 2 saat boyunca fırına bırakılmıştır sonra fırından çıkarılmıştır. Numuneleri fırından alındıktan sonra kalıplardan çıkarılmış, ardından yanmaz fırın

torbalarına konulmuş ve 24 saat boyunca 80 °C'de fırına tekrar yerleştirilmiştir. 24 saat sonra numuneler fırından çıkarılmış ve test gününe kadar kapalı bir kaptaki laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Tüm bu aşamalar aşağıdaki Şekil 3.14-3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Geopolimer harçların karıştırılması



Şekil 3.15. Geopolimer harçların kalıplarda yerleştirilmesi



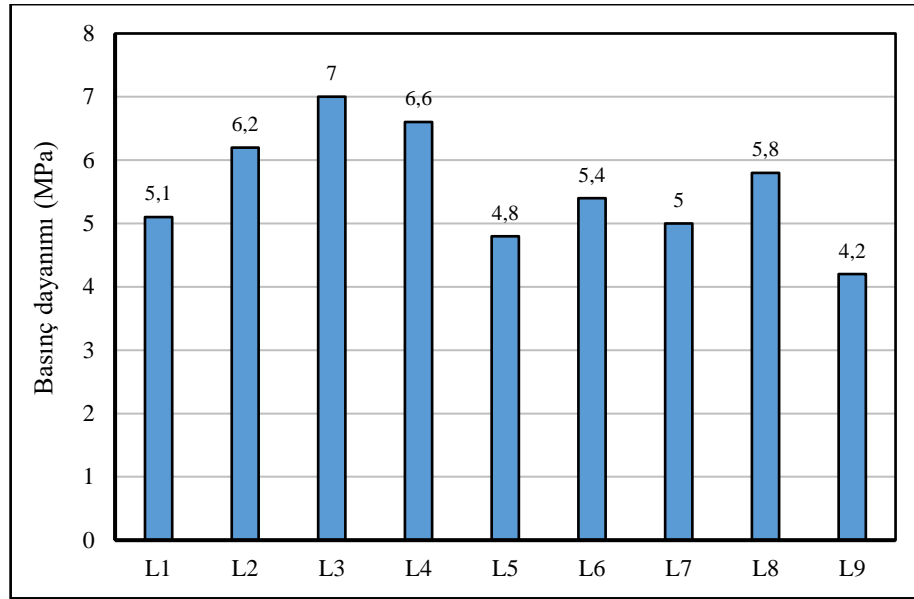
Şekil 3.16. Geopolimer harçların fırından çıkarılması



Şekil 3.17. Geopolimer harçların yanmaz fırın poşetlerin çıkarılması ve kür uygulanması

3.2.2. Zeolit bazlı geopolimer harçların 28 gün dayanımların değerlendirilmesi

Çizelge 3.12'de verilen karışım oranları kullanılarak üretilen zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının sonuçları Şekil 3.18'de ve Çizelge 3.13'te verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda deney sonuçları için hesaplanan S/N değerleri Çizelge 3.13'te ve ortalama S/N değerleri Çizelge 3.14'te verilmiştir. Ortalama S/N değeri, verilen parametrenin S/N değeri eklenerek ve daha sonra 3'e bölünerek hesaplanmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçları (28 günlük basınç dayanımlar) kullanılarak S/N değerleri, en büyük-en iyi (the bigger the better) performans-istatistiği (S/N) baz alınmış Denklem 3.2'e göre hesaplanmıştır.



Şekil 3.18. Zeolit bazlı geopolimer harçların 28 günlük basınç dayanımları

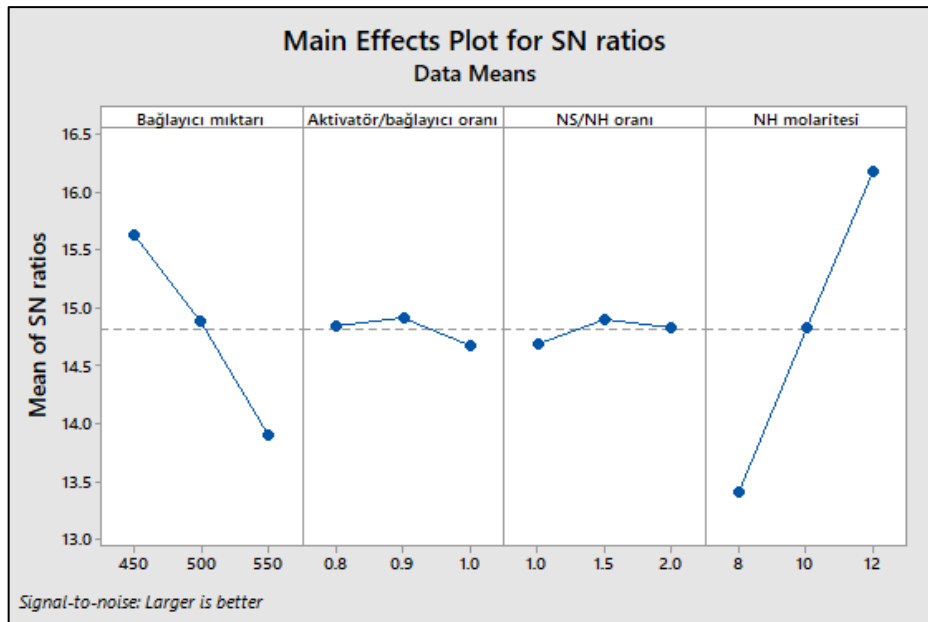
Çizelge 3.13. 28 gün basınç dayanımları ve S/N değerleri sonuçlarını

Deney No	Bağlayıcı	A/B	NS/NH	NH (M)	BD	S/N
L1	450	0.8	1	8	5.1	14.15
L2	450	0.9	1.5	10	6.2	15.85
L3	450	1	2	12	7.0	16.9
L4	500	0.8	1.5	12	6.6	16.39
L5	500	0.9	2	8	4.8	13.63
L6	500	1	1	10	5.4	14.65
L7	550	0.8	2	10	5.0	13.98
L8	550	0.9	1	12	5.8	15.27
L9	550	1	1.5	8	4.2	12.47

Çizelge 3.14. Ortalama S/N değerleri (28 günlük)

	Bağlayıcı miktarı	A/B oranı	NS/NH oranı	NH (M)
Seviye 1	15.63	14.84	14.69	13.41
Seviye 2	14.89	14.91	14.90	14.83
Seviye 3	13.90	14.67	14.84	16.19

Ortalama S/N değeri maksimum yapan parametre seviyeleri optimum seviyeleridir. Sonuçlar incelendiğinde, ortalama S/N değerleri şunu ifade etmekte; bağlayıcı miktarı 1. seviyesinde, aktivatör/bağlayıcı oranı 2. seviyesinde, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2. seviyesinde ve sodyum hidroksit molaritesi 3. seviyesinde optimum olduğu görülmektedir. Zeolit bazlı geopolimer harçların üretmek için kullanan parametrelerin ortalama S/N değerleri üzerindeki etkileri Şekil 3.19'da göstermektedir. Şekil 3.19 Minitab programı kullanılarak elde edilen sonuçları göstermektedir.



Şekil 3.19. Ortalama S/N değerleri için ana etki grafiği

Bağlayıcı miktarı arttıkça ortalama S/N değeri azalmıştır. Sonuçlarda görüldüğü gibi, bağlayıcı miktarının 1. seviyesi olan 450 gr kullanıldığı durumda ortalama S/N değeri en yüksek değeri sağlamış, bu miktarın üzerine çıkıldığında ise, S/N değeri bir azalma göstermiştir. Maksimum ortalama S/N değeri aktivatör/bağlayıcı oranının 2. seviyesi olan 0.9 oranında kullanılması ile elde edilmiştir. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1.5'e yükseldikçe, ortalama S/N değeri maksimum değere ulaşmıştır. Sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2'ye yükseltildiğinde, ortalama S/N değeri tekrar azalmıştır. Yani maksimum ortalama S/N değeri sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının 2. seviyesi olan 1.5 oranında kullanılması ile elde edilmiştir. Maksimum ortalama S/N değeri sodyum hidroksit molaritesinin 3. seviyesi olan 12M ile elde edilmiştir. 8M sodyum hidroksit kullanıldığında, S/N değeri en düşük çıkmıştır. Sodyum hidroksit molaritesi açısından ortalama S/N değeri için en etkili faktör 12M kullanılmasıdır.

Her parametrenin S/N değeri katkısının yüzdesi ve her parametrenin optimum seviyesi Çizelge 3.15'te verilmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi, sodyum hidroksit molaritesi ana faktördür, sodyum hidroksit molarite katkısı %51.2 bulunmuştur. Bağlayıcı içeriği, %28.1'lik katkı ile en önemli ikinci faktör olmuştur. Bu nedenle üretilen geopolimer harçların dayanımları çok düşük çıkmıştır, çünkü kullanılan bağlayıcı doğal zeolittir. Aktivatör/bağlayıcı oranı ve sodyum silikat/sodyum hidroksit gibi diğer parametrelerin yüzde katkıları sırasıyla %12.2 ve %8.5 olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.15. Dikkate alınan parametrelerin S/N değeri katkısının yüzdesi

Parametreleri	Bağlayıcı Miktarı	Aktivatör/ Bağlayıcı oranı	NS/NH Oranı	NH (M)
Katkı Yüzdesi	28.1	12.2	8.5	51.2
Yanıtın faktör önemi	2	3	4	1
Optimum seviye	450 gr/dm ³	0.9	1.5	12

3.2.3. Optimum karışım oranlarının belirlenmesi ve değerlendirme

Bağlayıcı miktarı 450 gr, aktivatör/bağlayıcı oranı 0.9, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 1.5 ve sodyum hidroksit molaritesi 12 oranlarında 28 günlük sonuçları optimum değerleri Taguchi yöntemi ile belirlenmiştir. Taguchi yönteminden elde edilen karışım tasarımı Çizelge 3.16'da verilmiştir. Toplam aktivatör miktarı, bağlayıcı içeriği ve aktivatör/bağlayıcı (0.9) oranı kullanılarak hesaplanmıştır. Her bir karışım sodyum silikat ve sodyum hidroksit miktarları, NS/NH oranı (1.5) kullanılarak kolayca belirlenmiştir. Sodyum hidroksit içeriği elde edildikten sonra, kullanılan su miktarı, Denklem 3.4'te kullanılarak bulunabilmektedir.

$$\text{Molarite (M)} = \frac{\text{NaOH katı ağırlığı} \times 1000 \text{ ml}}{\text{NaOH çözeltisi ağırlığı} \times 40 \text{ g}} \quad (3.4)$$

Çizelge 3.16. Optimum karışım oranları

Bağlayıcı Miktarı (gr)	Aktivatör/ Bağlayıcı oranı	NS/NH Oranı	Aktivatör Miktarı (gr)	Sodyum Silikat (gr)	Sodyum Hidroksit (gr)	Su Miktarı (gr)	Kum (gr)
450	0.9	1.5	405	243	77.76	141.7	1125

Optimum karışım bulunduktan sonra, doğal zeolit yerini, Çizelge 3.17'de gösterildiği gibi farklı C sınıfı uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker yüzdeleri ile değiştirilerek 16 karışım üretilmiştir. Ön deneme karışımlarında, her parametre için en uygun değeri belirlemek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Bağlayıcı içeriğinin (zeolit) optimum değeri 450 gr olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine uçucu kül, kalker ve uçucu kül-kalker farklı yüzdelerde katkı maddeleri olarak kullanılmıştır. Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

İdeal karışım elde edildikten sonra, geopolimer harç numuneleri için zamanın dayanım üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu nedenle hem basınç dayanımı hem de eğilme

dayanımı 7, 28 ve 90 günde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, basınç dayanımının zamanla arttığı, ancak 28 günden fazla kürlenmenin dayanımı önemli ölçüde etkilemediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, geopolimer harçların dayanıklılık özellikleri 28 gün kür edildikten sonra test edilmiştir.

Tez çalışmada doğal zeolit, uçucu kül ve kalker bileşenlerinden oluşan puzolanik katkılarla oluşturulan geopolimer harçların özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 40x40x160 mm³ boyutlarında harç numuneler hazırlanmıştır. Numune kodları, karışımlarda kullanılan malzemeler ve her numunenin bileşimini oluşturan tüm malzemelerin miktarları Çizelge 3.17’de verilmiştir. Üretilen numunelerin boyutları, adetleri ve tabii tutulduğu deneyleri Çizelge 3.18’de verilmiştir. Bu deneysel çalışma sırasında üretilen tüm farklı geopolimer karışımları için kum bağlayıcı oranı 2.5 alınmıştır. Toplam su bağlayıcı oranı ise, 0.64 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen geopolimer karışımların işlenebilirliğini geliştirmek için ilave su kullanılmıştır. Alkali aktivasyonun daha fazla gerçekleşmesi ve üretilen geopolimer betonun işlenebilirliğini artırmak için, geopolimer üretiminde ilave su kullanılması Soutsos ve ark. (2016) tarafından bildirilmiştir.

Çizelge 3.17. Bu çalışmada kullanılan karışımlar

Karışım kodu	Doğal zeolit değiştirme (%)	Doğal zeolit (gr)	Uçucu kül (gr)	Toz kalker (gr)	NS (gr)	NH (gr)	Su (gr)	Kum (gr)
UK0LS0DZ100	0	450	-	-	243	77.76	141.7	1125
UK10DZ90	10	405	45	-	243	77.76	141.7	1125
UK20DZ80	20	360	90	-	243	77.76	141.7	1125
UK30DZ70	30	315	135	-	243	77.76	141.7	1125
UK40DZ60	40	270	180	-	243	77.76	141.7	1125
UK50DZ50	50	225	225	-	243	77.76	141.7	1125
LS10DZ90	10	405	-	45	243	77.76	141.7	1125
LS20DZ80	20	360	-	90	243	77.76	141.7	1125
LS30DZ70	30	315	-	135	243	77.76	141.7	1125
LS40DZ60	40	270	-	180	243	77.76	141.7	1125
LS50DZ50	50	225	-	225	243	77.76	141.7	1125
UK10LS10DZ80	20	360	45	45	243	77.76	141.7	1125
UK15LS15DZ70	30	315	67.5	67.5	243	77.76	141.7	1125
UK20LS20DZ60	40	270	90	90	243	77.76	141.7	1125
UK25LS25DZ50	50	225	112.5	112.5	243	77.76	141.7	1125
UK30LS30DZ40	60	180	135	135	243	77.76	141.7	1125

*UK: Uçucu Kül, LS: Toz Kalker, DZ: Doğal Zeolit

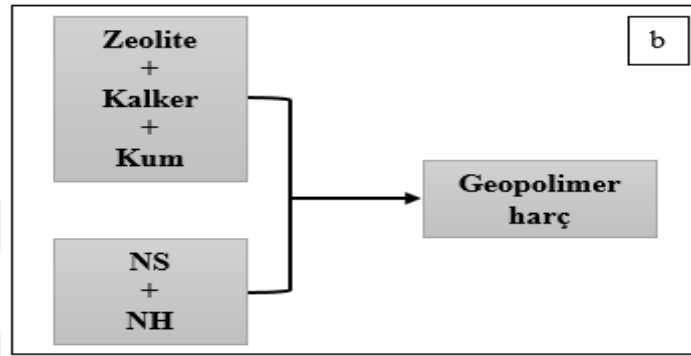
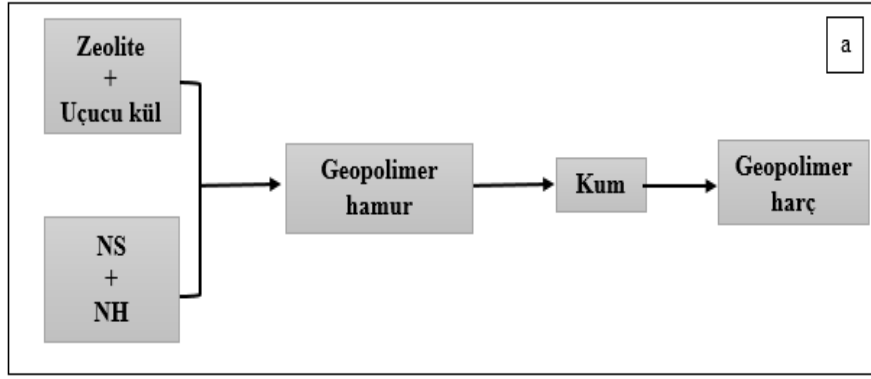
*Örnek; UK10LS10DZ80: %10 uçucu kül+%10 toz kalker+%80 doğal zeolit

Çizelge 3.18. Numune boyutları, adetleri ve yapılan deneyleri

Deneyler	Numune boyutları (mm ³)	Adet
Fisiksel özellikler	40x40x160	32
Kapilarite katsayısı	40x40x160	32
Basınç ve eğilme dayanımları	40x40x160	144
Donma-çözülme	40x40x160	32
Islanma-kuruma	40x40x160	32
Sülfat etkisi	40x40x160	32
Asit etkisi	40x40x160	32
Toplam		336

3.3. Karıştırma, Kalıplama ve Kür İşlemleri

Karıştırma işlemleri, Şekil 3.20 a ve 3.20 b'de gösterilen akış çizelgelerine göre yapılmıştır. Şekil 3.20 a'da gösterildiği gibi, zeolit ve uçucu kül öncelikle karıştırıcıya eklenmiş ve birlikte karıştırılmıştır. Sonra kimyasal aktivatörler geopolimer hamuru oluşturmak için aynı anda ayrıca olarak eklenmiştir. Elde edilen hamur daha sonra uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harçları üretmek için kumla karıştırılmıştır. Şekil 3.20 b'den gösterdiği gibi homojen karışım elde edilene kadar önce zeolit, kalker ve kum karıştırılmış ve daha sonra kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlar üretmek için kimyasal aktivatörler eklenmiştir. Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer hamuru üretmek için zeolit, kalker ve aktivatörleri bir araya getirmeye çalışığımızda kalker geopolimerazasyon reaksiyonunu hemen başlatmış ve çok hızlı bir şekilde priz almıştır. Böylece işlenebilir geopolimer harçları üretmek çok zor hale gelmiştir. Bu nedenle, kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlar ve uçucu kül katkılı bazlı zeolit geopolimer harçlar üretmek için farklı karışım yöntemleri kullanılmıştır. Sodyum hidroksit, bir gün önce hazırlanmıştır. Karışım gününde sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri, bağlayıcı ve kum aynı anda ilave edilmiştir.



Şekil 3.20. a) Uçucu kül katkılı zeolit geopolimer karışım yöntemi b) Kalker katkılı zeolit geopolimer karışımı yöntemi

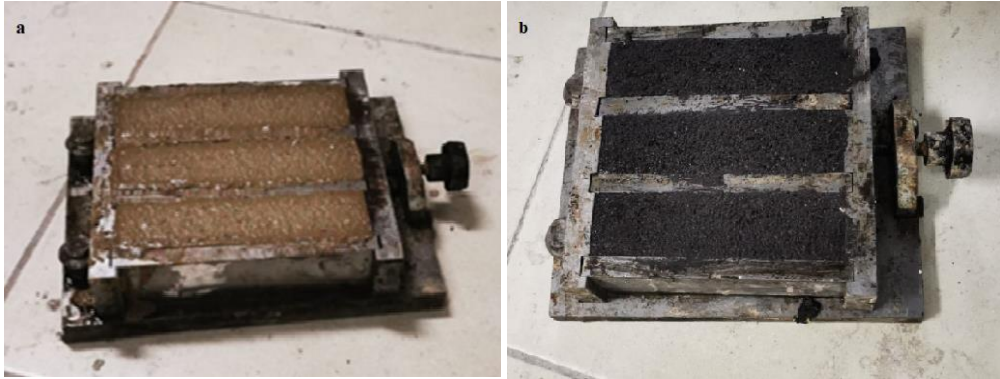
Karışım prosedürü bittikten sonra, kalıplar hazırlanmış ve numunelerin kolayca kalıplarından sökülmesini garanti etmek için kalıplar iyice yağlanmıştır. Döküm iki katmanda yapılmış ve sonra karıştırma işlemi sırasında oluşan boşlukları çıkarmak için her bir katmana bir dakika boyunca vibratör uygulanmıştır. Her bir karışım hazırlanırken, üretilen geopolimer harçların işlenebilirliğini bulmak için küçük bir parça karışımdan alınarak yayılma tablası testi yapılmıştır. Gerekli tüm özellikleri test etmek için bu çalışmada $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ boyutlarında prizmalar kullanılmıştır. Numuneleri önce $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ile 2 saat boyunca fırına yerleştirilmiş ve 2 saat sonra yeterince sertleştikten sonra fırından çıkarılmış ve kalıplardan çıkarılmıştır. Daha sonra numuneleri yanmaz fırın torbalarına koyulmuş ve tekrar 24 saat daha $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de fırına yerleştirilmiştir. Şekil 3.21-3.27, karıştırma işlemi, vibratör uygulanması, kalıplama işlemi, numunelerin kalıplardan çıkarılması ve kür işlemi uygulanması göstermektedir.



Şekil 3.21. a) Hammaddelerin mikserde yerleştirilmesi b) Karıştırma işlemi



Şekil 3.22. Geopolimer harçların vibratör uygulanması



Şekil 3.23. Geopolimer harçların kalıplarda yerleştirilmesi a) zeolit bazlı geopolimer b) uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer



Şekil 3.24. Üretilmiş geopolimer harçları



Şekil 3.25. Geopolimer harçların kalıplardan çıkarılması



Şekil 3.26. Geopolimer harçların yanmaz fırın torbalarının konulması



Şekil 3.27. Geopolimer harçların kür için fırında yerleştirilmesi

3.4. Çalışmada Uygulanacak Deneyler

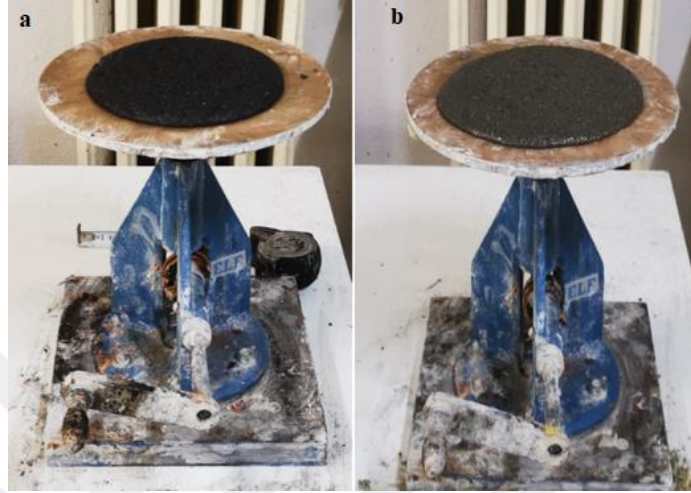
3.4.1. Sertleşmiş geopolimer harç numunelere uygulanan deneyler

En sağlıklı ve en gerçekçi modele ulaşmak için deneysel çalışmada çok dikkatli olmak gerekmektedir. Bu yüzden laboratuvar çalışmaları sırasındaki: karışım oranlarının oluşturulması, karıştırılması, yayılma deneyinin yapımı, harçların kalıplara yerleştirilmesi, kürün uygulanması, kalıplardan çıkarılması, mekanik ve durabilite deneylerin yapılması gibi bütün aşamalar büyük bir hassasiyetle yerine getirilmesi için çaba gösterilmiştir. Farklı boyutlarda üretilen geopolimer harç numunelerin özgül ağırlık, birim ağırlık, su emme, kapilarite katsayısı deneyi, basınç ve eğilme dayanımları, donma-çözülme dayanımı, ıslanma-kuruma deneyi ve sülfat ve asit dirençleri testleri uygulanmıştır.

3.4.1.1. Yayılma tablası deneyi

Üretilen taze geopolimer harçların işlenebilirliği TS EN 1015-3'e göre ölçülmüştür. Yayılma tablası deneyi için 300 mm çaplı tablanın üzerinde taban çapı 10 cm, üst çapı 7 cm ve yüksekliği 6 cm olan kesik koni şeklindeki kalıp yerleştirilerek uygulanmıştır. Karıştırma kabından tepsiyeye alınan geopolimer harçların, yayılma tablası üzerindeki kesik koni kalıba doldurularak yerleştirilmiştir ve tokmak için 25 vuruş uygulanmıştır. Kalıbın üst yüzeyi mala ile düzeltilerek temizlendikten sonra, koni kalıp çekilerek

alınmıştır. Sonra deney aletinin kolu 3 saniyede 1 kez çevrilerek, yayılan harç numunenin çapı 2 farklı ekseninde cetvel yardımı ile santimetre olarak ölçülmüş ve okunan yayılma tablası değerlerin ortalaması kaydedilmiştir. Şekil 3.28’de yayılma tablası testi gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Yayılma tablası deneyi (a) Uçucu kül içeren geopolimer harçları (b) Uçucu kül-toz kalker içeren geopolimer harçları

3.4.1.2. Özgül ağırlık, birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı

Bu deneyler, geopolimer harç numuneleri 28 gün boyunca oda sıcaklığında kür edildikten sonra TS EN 1015-10’e göre yapılmıştır. Geopolimer harçların özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve su emme özelliklerinin saptanmasında 40x40x160 mm³ lik prizmatik numuneler kullanılmıştır. İlk olarak, numunelerin etüv kuru ağırlığı belirlenmiştir. Numuneler 100-110 °C sıcaklık aralığında 24 saat etüvde bekletilmiştir. Numuneler daha sonra etüvden çıkarılmış, 20 ila 25 °C ortam sıcaklığında kuru havada soğumaya bırakılmış ve daha sonra etüv kuru ağırlığı (W_1) bulunmuştur. Sonra suya doymuş kuru (W_2) yüzey ağırlığı için numuneleri 48 saat su içerisinde bekletildikten sonra yüzeyleri bir havlu yardımıyla kurularak hesaplanmıştır. Son olarak, Arşimed Terazisi kullanılarak numunelerin su içindeki ağırlığı (W_3) belirlenmiştir (Şekil 3.29). Denklem 3.5-3.8 kullanılarak yukarıda belirtilen fiziksel özellikleri tanımlanmıştır.

$$\text{Birim hacim ağırlık} = W_1/V \text{ (gr/cm}^3\text{)} \quad (3.5)$$

$$\text{Özgül ağırlık} = W_1/(W_2-W_3) \quad (3.6)$$

$$\text{Su emme} = [(W_2 - W_1) / W_1] \times 100 (\%) \quad (3.7)$$

$$\text{Boşluk Oranı} = (W_2 - W_1) / (W_2 - W_3) \times 100 (\%) \quad (3.8)$$

W_1 : Etüv kurusu ağırlık (gr)

W_2 : Doygun kuru yüzey ağırlık (gr)

W_3 : Su içindeki ağırlık (gr)

V : Numune hacmi (cm^3)



Şekil 3.29. Kullanılan Arşimed Terazisi

3.4.1.3. Kapilarite katsayısı (Kılcallık katsayısı)

Kapilarite katsayısı deneyi (kılcal su emme deneyi) sadece bir yüzü suya maruz bırakılan numunelerin kılcal boşluklarından suyun kapiler bir şekilde emilimi olarak tanımlanmaktadır. Geopolimer harçların kapilarite katsayısının saptanmasında $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ 'lik küp numuneler kullanılmıştır. Kapilarite katsayısı (kılcallık katsayısı) ASTM C1585 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Geopolimer harç numuneler önce $60 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ etüvde sabit ağırlığa gelene kadar kurutulmuş ve numunelerin yan yüzeylerine su yalıtım malzemesi (parafin) sürülerek yalıtılmıştır (Şekil 3.30). Şekil 3.31'de kapilarite katsayısı deneyi yapılması göstermektedir.

Daha sonra numuneler Ø8 mm lik çelik çubukların üstüne 5 mm suyla temas edecek şekilde yerleştirilip 1, 5, 10, 20, 30, 44, 60, 120, 180, 240, 360 ve 1440 dakika süreyle numunelerin su emme miktarları belirlenmiştir. Kapilarite katsayısı Denklem 3.9 ile hesaplanmıştır. Geopolimer harç numunelerinden elde edilen kapilarite katsayısı değerleri, zamanın kareköküne (\sqrt{t} dakika) karşı kapilarite katsayısı (I mm) eğrileri çizmek için kullanılmıştır.

$$I = \frac{(M_t - M_o)}{A * d} \quad (3.9)$$

Denklemdede:

I = Kapilarite katsayısı (Kılcal su emme) (mm)

M_o = Numunenin kuru ağırlığı t = 0 (gr)

M_t = Numunenin su emdikten sonraki ağırlığı t (gr)

A = numunenin suya maruz kalan yüzey alanı (mm^2)

d = Suyun özgül ağırlığı (gr/mm^3)



Şekil 3.30. Numunelerin parafin kaplanması



Şekil 3.31. Kapilarite katsayısı deneyi

3.4.1.4. Eğilme dayanımı tayini

Çalışma kapsamında hazırlanan geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı belirlenmesi için TS EN 1015-11 2000'e uygun olarak çimento presinde eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Üretilen geopolimer harçların eğilme dayanımının tespit edilebilmesi için 40x 40x160 mm³ boyutlarında numuneler kullanılmış, her bir deney için üçer adet hazırlanan deney numunelerine kür sonrasında otomatik test cihazında tek noktadan yükleme uygulanmıştır. Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulacak her numune yükleme tablası üzerindeki mesnetlere uygun olarak yerleştirilmiştir. Yükleme sırasında, cihazın yükleme başlığı numunenin orta noktasına etki ederken, mesnetler arası mesafe 10 cm ve yükleme hızı 0.50 kN/s sabit tutulmuştur. Eğilme dayanımı deney yöntemi, Denklem 3.10 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.10)$$

Denklemden:

f = Eğilme dayanımı (N/mm²)

b = Numune kesitinin eni (mm)

d = Numune kesitinin yüksekliği (mm)

P = Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük (N)

L = Mesnet açıklığı (mm)'dir.

Her deneyde kür edilerek hazırlanan prizmatik geopolimer harç numuneler eğilmede çekme deneyine tabi tutularak eğilmede çekme dayanımı değerleri bulunmuştur (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Eğilme Dayanımı testi

3.4.1.5. Basınç dayanımı tayini

Geopolimer harçların basınç dayanımı tayini TS EN 1015-11'e uygun olarak yapılmıştır. Geopolimer harç numuneler 40x40x160 mm³ boyutlarında üretilmiştir. Eğilme dayanımı belirlendikten sonra numuneler iki parçaya bölünmüştür. Kalan 40x40 mm² prizmalar otomatik test cihazında yükleme hızı 1.50 kN/s olacak şekilde basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.33). Harç numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları aşağıdaki verilen Denklem 3.11 yardımıyla belirlenmiştir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.11)$$

Denklemden:

σ = Basınç dayanımı (N/mm²)

P = Kırılma yükü (N)

A = Numune kesit alanı (mm²)



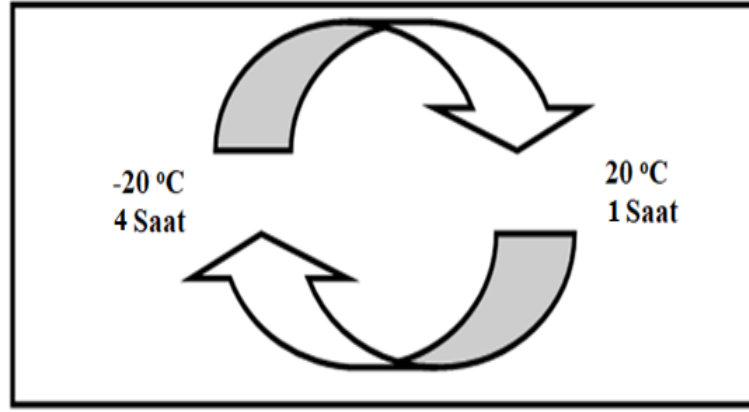
Şekil 3.33. Basınç Dayanımı testi

3.4.2. Durabilite özelliklerinin belirlenmesi

Çalışmanın ikinci aşamasında, çalışmanın ilk bölümünde belirlenen optimum karışım değerlere göre üretilen geopolimer harçların durabilite özelliklerini tespit etmek için bir seri durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bunlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır:

3.4.2.1. Donma-çözülme direnci tayini

Bu deneyin amacı, üretilen geopolimer harçların donma-çözülme direnci hakkında bilgi edinmektir. 28 gün kür ortamında bekletilen 40x40x160 mm³ boyutlarındaki geopolimer harç numunelere ASTM C666 standardına uygun olarak donma-çözülme deneyine tabi tutulmuştur. Numunelere toplam 50 çevrim donma-çözülme uygulanmıştır. Her çevrimde, donma süresi 4 saat, çözülme süresi 1 saat olacak, ayrıca testin sıcaklığı 20 °C ila -20 °C arasında değişmiştir. Çevrimler bittikten sonra, numuneler, donma-çözülme öncesi ve sonrası olarak analiz edilerek fiziksel ve mekanik değişimler dikkate alınmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ağırlık kaybı oranlarındaki fark hesaplanmış ve referans numunelerle karşılaştırılmıştır. Donma çözülme deneyinde toplam 32 numune kullanılmıştır. Donma-çözülme çevrimleri için kullanılan sıcaklık ve süreler Şekil 3.34'te verilmiştir.



Şekil 3.34. Donma-çözülme çevrimi

3.4.2.2. Islanma-kuruma deneyi

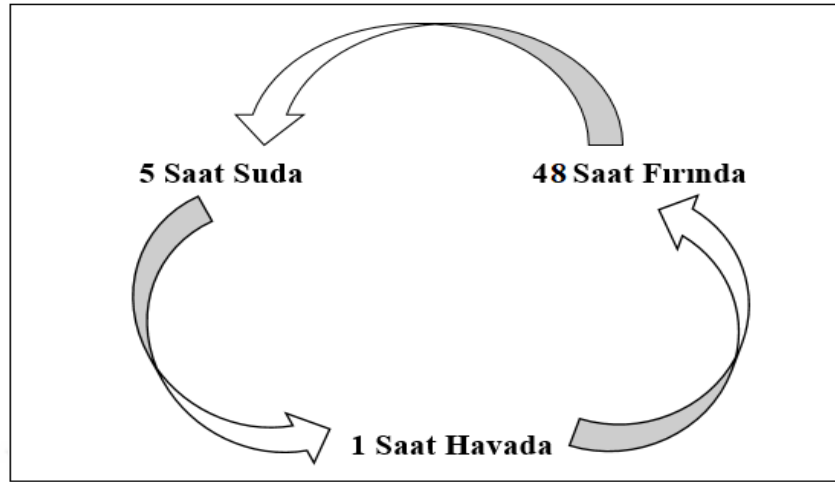
Islanma-kuruma testi, geopolimer harçlar 28 gün kür edildikten sonra uygulanmıştır. Islanma-kuruma testi ASTM D559-96 tarafından açıklanan prosedüre göre gerçekleştirilmiştir. İlk olarak numuneler fırında 110 ± 5 °C'de kurutulmuş ve kütleleri kaydedilmiştir. İkinci olarak, ıslanma işlemi, numuneler bir kap içerisinde standarda uygun içme suyuna yerleştirilerek başlatılmış, böylece numuneler su içine tamamen daldırılmış ve oda sıcaklığında en az 5 saat bekletilmiştir. Sonra numuneler 1 saat havada kurutulmuştur. Son olarak, kuruma işlemi için numuneler fırında 48 saat boyunca 70 ± 3 °C sıcaklıkta tutulmuştur. Bu bir tam ıslanma-kuruma döngüsü olmuştur. Islanma-kuruma döngüleri için kullanılan sıcaklıklar ve süreleri Şekil 3.36'da verilmiştir. Numunelerin ıslanma işlemi için suya yerleştirilmesi ve kuruma işlemi için fırına yerleştirilmesi Şekil 3.35'de görülmektedir. Kuruma işleminden sonra numuneler ortam sıcaklığında soğutulularak tekrar ıslanma işlemine tabi tutulmuştur. Toplam 12 ıslanma-kuruma döngüsü yapılmıştır. 12 döngüyü tamamladıktan sonra, numuneler sabit bir kütle elde etmek için bir fırında kurutulmuş ve numunelerin kütleleri kaydedilmiştir. Islanma-kuruma testinden kaynaklanan dayanımda azalma tespit edilmiş ve ıslanma-kuruma işleminden önceki dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. Islanma-kuruma testi nedeniyle kütle kaybı, Denklem 3.12 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Ağırlık kaybı} = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (3.12)$$

Denklemden:

A: Islanma kuruma testinden önce numunelerin fırın kurutulmuş kütlesi

B: Islanma kuruma testinden sonra numunelerin fırın kurutulmuş kütlesi



Şekil 3.35. Islanma-kuruma döngüleri için kullanılan süreleri



Şekil 3.36. Islanma kuruma deneyi a) Islanma için numunelerin suyu yerleştirilmesi b) Kuruma için numunelerin fırını yerleştirilmesi

3.4.2.3. Sülfat etkisi deneyi

Sülfat etkisi deneyi için önceden üretilen geopolimer numuneler (%5) magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltileri ile kür edilmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisi hazırlanırken şebeke suyu kullanılmıştır. %5 magnezyum sülfat için 1 litre su ve 50 gr magnezyum

sülfat tuzu karıştırılarak hazırlanmıştır. Kür koşullarında 28 gün boyunca bekletilen numunelerin ağırlıkları 0.01 hassasiyetteki hassas terazide tartılarak belirlenmiştir. Sonra numuneleri çözelti içerisine 2 ay süreyle 20 °C ortam sıcaklığında bekletilmiştir. Çözeltiler her ay değiştirilerek yenilenmiştir. Belirlenen sürelerin sonunda numuneler etüvde kurutularak ağırlıkları tekrar ölçülmüş ve numunelerin ağırlık ve basınç dayanımlarındaki değişimler belirlenmiştir. Sülfat etkisi deneylerinde toplam 32 numune kullanılmıştır. Şekil 3.37’de, magnezyum sülfat çözeltilerinin içerisindeki numuneler görülmektedir.



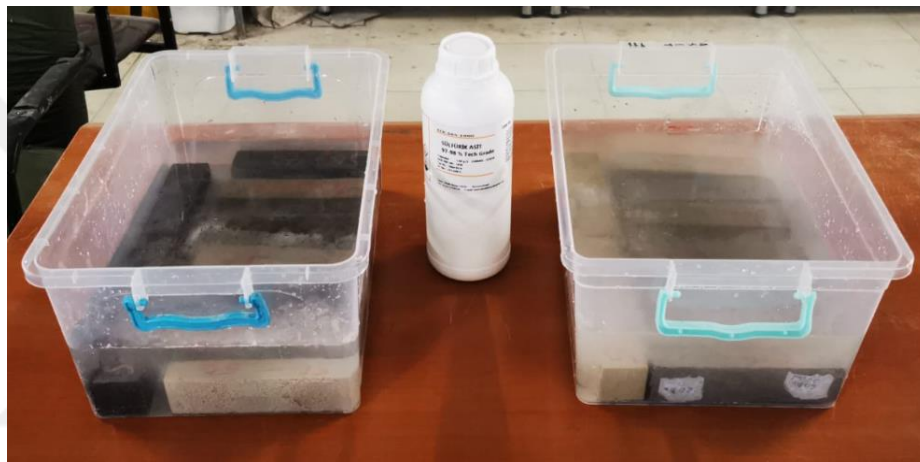
Şekil 3.37. Sülfat etkisi deneyi

3.4.2.4. Asit etkisi deneyi

Asit etkisi deneyi için önceden üretilen geopolimer harç numuneler (%2.5) %98 saflıkta bir sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltisi ile kür edilmiştir. Sülfürik asit çözeltisinin hazırlanırken şebeke suyu kullanılmıştır. Karışımda %2.5 sülfürik asit için 1 litre su ve 25 gr sülfürik asit karıştırılarak hazırlanmıştır. 28 gün kür süresi biten $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki numuneleri 6 hafta oda sıcaklığında asit çözeltisinde bekletilmiştir. Daha sonra numuneleri çözeltilerden çıkartılarak, ağırlıkları ve dayanımlarındaki değişimler belirlenmiştir. Asit etkisi deneylerinde toplam 32 numune kullanılmıştır. Şekil 3.38 ve Şekil 3.39’da sırasıyla sülfürik asit çözeltilerinin hazırlanması ve numunelerin çözeltilerin içerisine yerleştirilmesi gösterilmektedir.



Şekil 3.38. Asit çözeltisi hazırlanması



Şekil 3.39. Geopolimer numunelerin sülfürik asit çözelti içerisinde koyulması

3.4.3. SEM-EDS ve XRD analizleri

Uçucu kül ve kalker katkılı zeolit bazlı geopolimerlerin mikroyapı analizleri için hamur üretilmiştir. Geopolimer hamurlar laboratuvarında hassas kesme cihazı ile kesilen 1x1x1 cm boyutlarında küp numune şeklindeki parçaların SEM ve EDS görüntüleri alınarak mikroyapı incelemesi için hazırlanmıştır. Numuneler kesme işleminden sonra 3 gün 45 °C etüvde kurutulmuş ve nemden korunacak bir şekilde saklanmışlardır. Mikroyapı görüntülerinin çekilmesi amacı ile mikroyapı laboratuvarına götürülen numuneler iletkenliğin sağlanması için altın ile kaplanmışlardır.

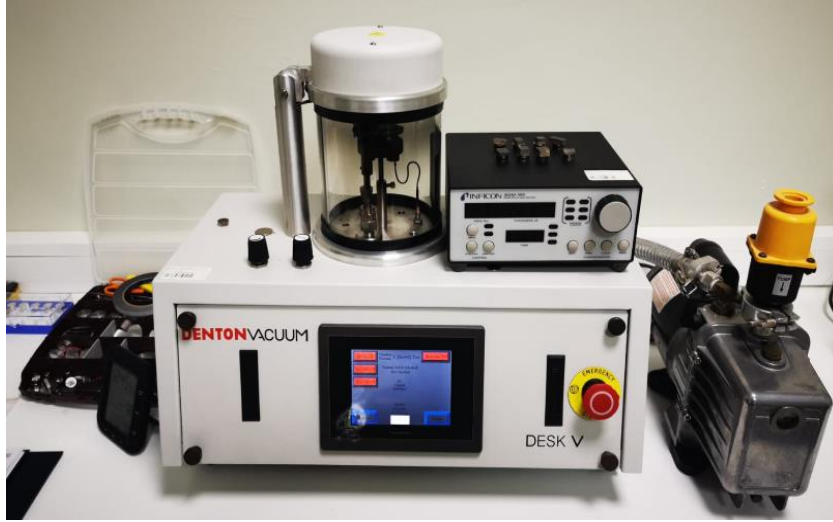
Tarayıcı elektron mikroskopunda (SEM) geopolimer harç numunelerin yüzeylerinin görüntüleri çekilmiş ve atomik yapıları incelenmek için SEM-EDS kullanılmıştır. SEM-EDS çalışmaları Hitachi-SU 1510 SEM cihazı (Şekil 3.40) ile Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi

(BİTAM) Laboratuvarında yürütülmüştür. Mikroyapı analizleri; %100 doğal zeolit içeren geopolimer, en yüksek dayanım ve en düşük dayanım sağlayan uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimerler, sülfat ve asit etkilerine maruz kalan geopolimer harç numunelerin üzerinde yapılmıştır.



Şekil 3.40. Çalışmada kullanılan SEM-EDS cihazı

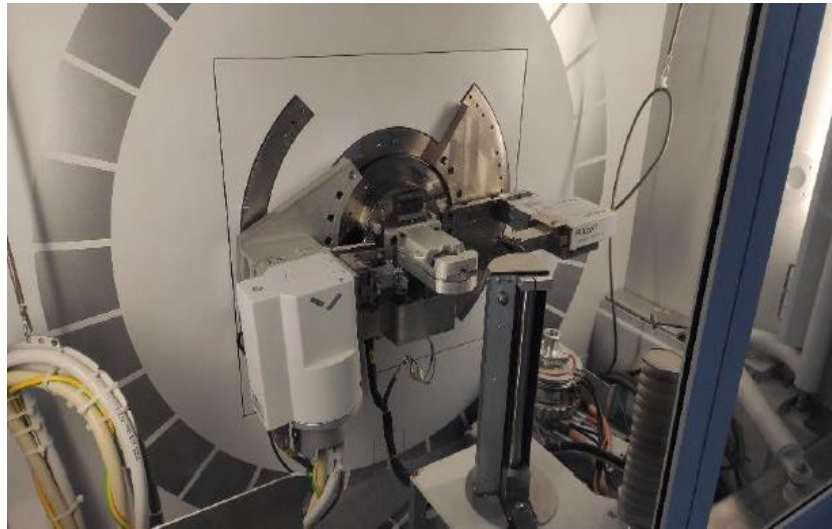
Analizi yapılacak numuneler nemli olmayacak şekilde, SEM cihazında incelemeye alınmadan önce vakumlu ortamda metal kaplama yapılarak hazırlanmıştır (Şekil 3.41). Hazırlanan numuneler silindirik bir mil üzerinde yapıştırılmak suretiyle konulmuştur. Milin üzerinde sıra numaraları bulunmakta olup en fazla 8 adet numune yerleştirilebilmektedir. Bu tez çalışmasında DZ100, UK10DZ90, UK50DZ50, LS10DZ90, LS50DZ50, UK10LS10DZ80, UK20LS20DZ60, UK30LS30DZ40, sülfat etkisinde tabi tutulan UK20LS20DZ40 ve UK30LS30DZ40, asit etkisinde maruz kalan UK20LS20DZ40 ve UK30LS30DZ40 geopolimer harç numunelerinin SEM-EDS analizleri yapılmıştır. SEM-EDS analizi yapılacak zeolit bazlı geopolimer harçlara ait parça numunelerinin kaplaması yapılmıştır. İletkenliği sağlamak için altın-paladyum karışımı kullanılmıştır. Kaplama işlemi, Denton Vacuum marka Desk V modeli, döndürerek kaplama özellikli cihazla yapılmıştır. Ayrıca, bu cihaz ile vakumlama işlemleri yapılmıştır. Bu işlem bittikten sonra numunelerin SEM-EDS cihazına yerleştirilmiştir. SEM görüntüleri alınmadan önce SEM cihazın içinde terkar vakum yapılarak, böylece ortam içindeki gazların numune ile etkileşime girmeden görüntüleri alınmıştır.



Şekil 3.41. Vakum ortamı altın-paladyum kaplama makinesi

XRD analiz PANalytical EMPYREAN XRD cihazı ile Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM) Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. XRD cihazı, X-ışınları toz kırınım ölçümü yöntemi kullanılarak kristal tanelerinin sahip olduğu mineralojik bileşimlerinin bulunması prensibine göre çalışmaktadır.

Geopolimer harç numunelerin üretilmek için kullanılan doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalker üzerinde XRD analizleri yapılmıştır. Doğal zeolit, uçucu kül ve kalker XRD cihazın tablasına yerleştirildikten sonra tabla cihazın iç kısmına konulmuştur. XRD cihazına toz numunelerinin yerleştirilmiş hali Şekil 3.42’de görülmektedir. Gerekli ayarlamaları bilgisayar üzerinden 2 teta (θ) açısıyla 0 - 70° derece arası olarak yapılmıştır.



Şekil 3.42. XRD cihazı numune alımı yapmadan önceki görüntüsü

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölüm, taze geopolimer harçların özellikleri, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme, boşluk oranı, basınç ve eğilme dayanımları, kapilarite (kılcal su emme) katsayısı, donma-çözülme dayanıklılığı, ıslanma-kuruma dayanıklılığı, sülfat ve asit dayanıklılıkları gibi deney sonuçları verilmiştir. Deneysel olarak yürütülmüş olan bu araştırmada numuneleri oda sıcaklığında kür koşulu uygulanmıştır. Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkileri aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

4.1. Taze Harç (Yayılma Tablası ve Priz Alma) Özellikleri

Geopolimer harç numuneleri döküm işlemi bittikten kısa bir süre sonra fırına yerleştirildiği için, kür koşullarının doğası gereği priz alma sürelerinin test edilmesi zor olmuştur. Genel olarak, kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri en kısa priz alma sürelerine sahip olduğunu gözlenmiştir. Doğal zeolit yerine toz kalker içeren numuneleri hızlı bir şekilde priz almış ve fırına ısı kürleme için yerleştirmeden önce bile birkaç dakika içinde hem sertleşmiştir. Toz kalker kullanılarak üretilen geopolimer harçların priz alma süresini azalttığı bulunmuştur. Karışımda kullanılan kalker miktarı arttıkça, priz alma süresi azalttığı görülmüştür.

Öte yandan, zeolit yerine uçucu kül içeren geopolimer harçlar toz kalker içeren geopolimer harçlardan daha uzun priz alma süresine sahip olduğu görülmüştür. Uçucu kül miktarının artması, numunelerin priz alması için gereken süreyi artmıştır, daha spesifik olmak gerekirse, ne kadar çok uçucu kül miktarı kullanılırsa, priz alma süresi o kadar uzun olmuştur. Son olarak, uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri priz alma sürelerini kalker katkılı ve uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin arasında olduğunu gözlenmiştir.

Zeolit ana malzeme, uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkı maddeleri olarak kullanılarak üretilen taze geopolimer harçların işlenebilirliği, harçların çapları ölçülerek yayılma tablası testi ile kullanılarak yapılmıştır. Çizelge 4.1’de uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların yayılma tablası sonuçları verilmektedir.

Çizelge 4.1. Geopolimer harçların yayılma tablası sonuçları

Numune Kodu	Yayılma tablasın çapı (mm)
UK0LS0DZ100	140
UK10DZ90	150
UK20DZ80	165
UK30DZ70	170
UK40DZ60	180
UK50DZ50	190
LS10DZ90	145
LS20DZ80	150
LS30DZ70	155
LS40DZ60	160
LS50DZ50	170
UK10LS10DZ80	150
UK15LS15DZ70	155
UK20LS20DZ60	168
UK25LS25DZ50	175
UK30LS30DZ40	185

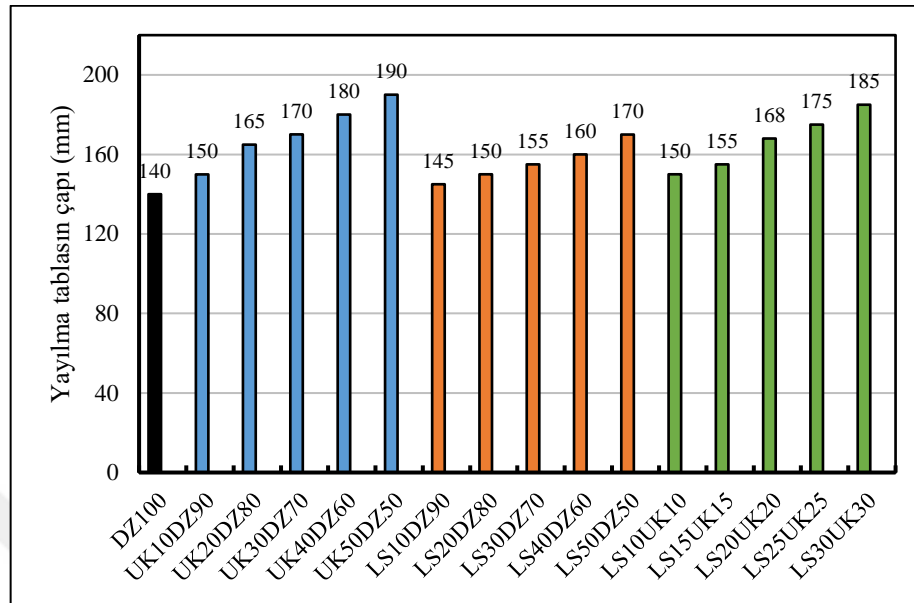
*UK: Uçucu Kül, LS: Toz Kalker, DZ: Doğal Zeolit

*Örnek; UK10LS10DZ80: %10 uçucu kül+%10 toz kalker+%80 doğal zeolit

Karışımların ilk kategorisi, doğal zeolit yerine farklı uçucu kül yüzdeleri kullanılmıştır. Karışımda kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça karışımların işlenebilirliği en çok artmıştır. Yayılma tablası sonuçlarından görüldüğü gibi uçucu kül doğal zeolit yerine kullanıldığında, yayılma tablası çapı kontrol karışımına kıyasla arttırılmıştır. Doğal zeolit yerine uçucu kül kullanıldığında, üretilen geopolimer harçların işlenebilirliği en iyi şekilde geliştirilmiştir. Karışımların maksimum yayılma çapı, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında elde edilmiştir. Karışımların ikinci kategorisi, doğal zeolit yerine farklı toz kalker yüzdeleri kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan toz kalker miktarı arttıkça, yayılma tablası değeri bir artış göstermiştir. Toz kalker, zeolit bazlı geopolimer harçların işlenebilirliğini arttığı tespit edilmiş, ancak uçucu kül ya da uçucu kül-toz kalkerin işlenebilirliği arttırdığı gibi kadar bulunmamıştır.

Karışımların üçüncü kategorisi ise, doğal zeolit yerine farklı uçucu kül-kalker yüzdeleri birlikte kullanılmıştır. Bu durumda da işlenebilirlik arttırılmıştır. Karışımlarda kullanılan uçucu kül-kalker miktarı arttıkça, yayılma tablası çapı bir artış göstermiştir. Bu kategori maksimum yayılma tablası çapı, zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında elde edilmiştir. Geopolimer harçlarının üretiminde zeolit yerine uçucu kül ve toz kalker gibi katkı maddelerinin kullanımı, yayılma tablası testi ile ölçülen daha

yüksek işlenebilirliğe neden olmuştur. Şekil 4.1’de uçucu kül, kalker ve uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlarının yayılma tablası sonuçlarını göstermektedir.



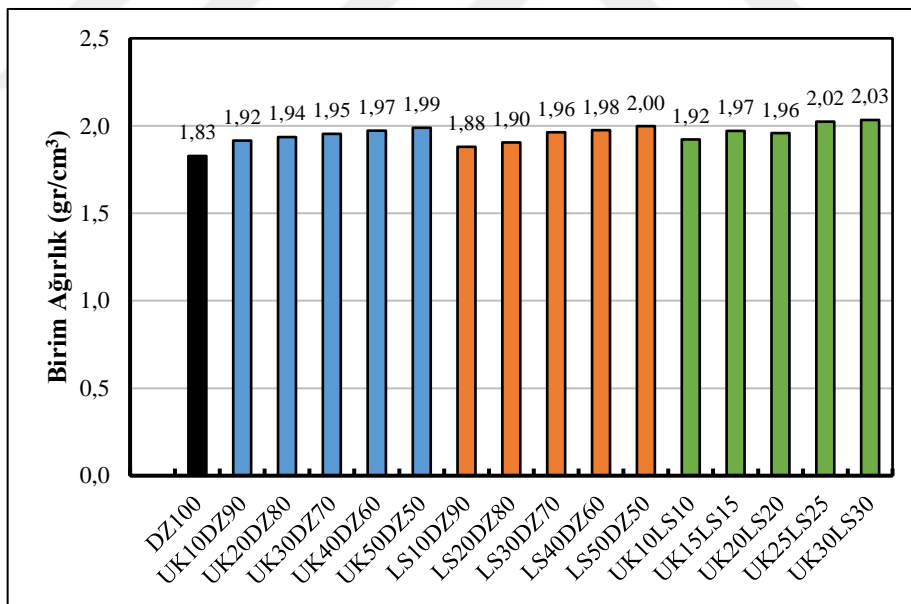
Şekil 4.1. Geopolimer harçların yayılma tablası sonuçları

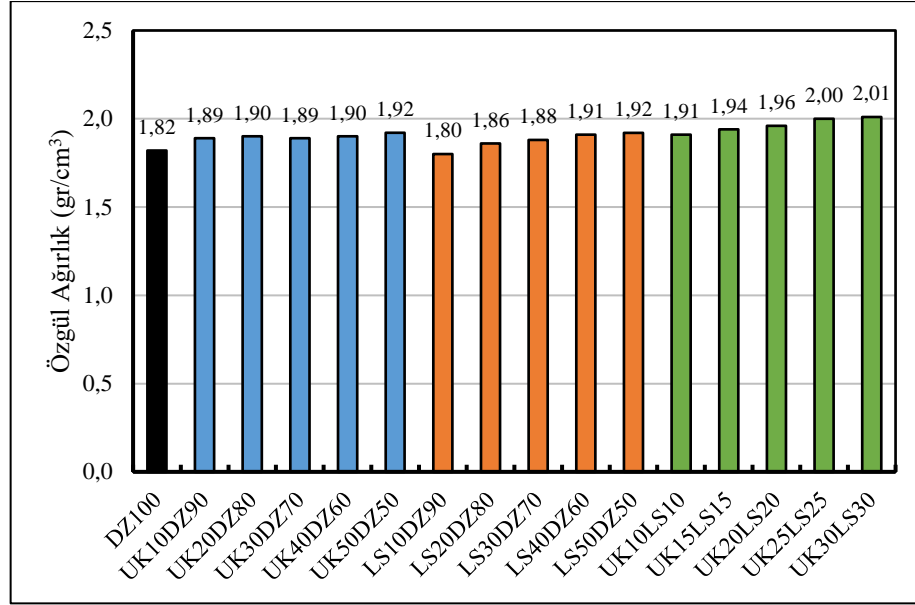
4.2. Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı

Birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı deneyleri 28 gün kür edilen geopolimer harç numunelerin üzerinde yapılmıştır. Çizelge 4.2, üretilen numunelerin fiziksel özelliklerinin sonuçlarını vermektedir. Genel olarak, katkı malzemelerin varlığı incelenen tüm fiziksel özellikler açısından önemli bir gelişme sağlamıştır. Üretilmiş geopolimer harç numunelerin birim hacim ağırlıklarını, özgül ağırlıklarını, su emmelerini ve boşluk oranlarını sırasıyla Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de göstermektedir.

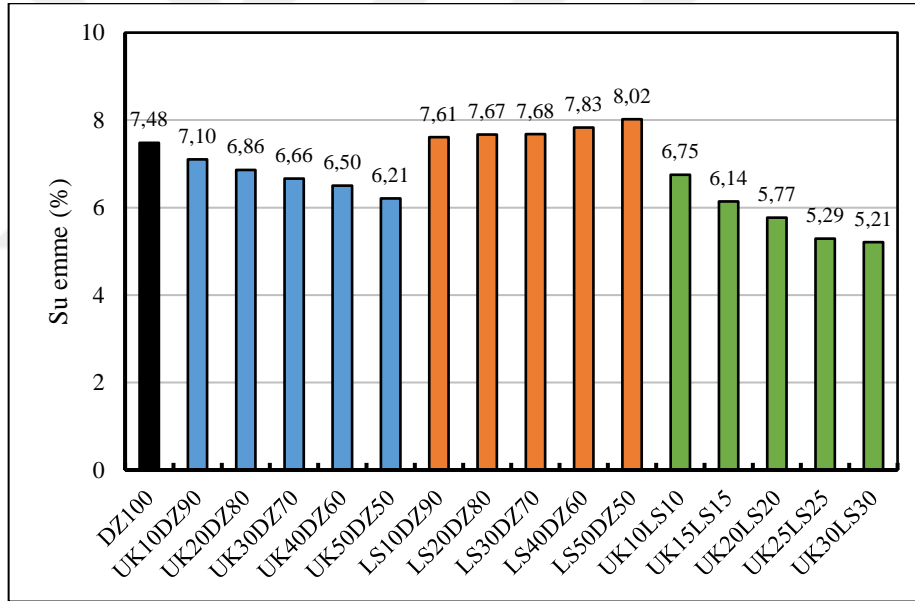
Çizelge 4.2. Geopolimer harçların birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı sonuçları

Numune Kodu	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Su Emme (%)	Boşluk Oranı (%)
UK0LS0DZ100	1.83	1.82	7.48	13.60
UK10DZ90	1.92	1.89	7.10	13.38
UK20DZ80	1.94	1.90	6.86	13.02
UK30DZ70	1.95	1.89	6.66	12.60
UK40DZ60	1.97	1.90	6.50	12.36
UK50DZ50	1.99	1.92	6.21	11.93
LS10DZ90	1.88	1.80	7.61	13.69
LS20DZ80	1.90	1.86	7.67	14.30
LS30DZ70	1.96	1.88	7.68	14.42
LS40DZ60	1.98	1.91	7.83	14.94
LS50DZ50	2.00	1.92	8.02	15.36
UK10LS10DZ80	1.92	1.91	6.75	12.91
UK15LS15DZ70	1.97	1.94	6.14	11.90
UK20LS20DZ60	1.96	1.96	5.77	11.32
UK25LS25DZ50	2.02	2.00	5.29	10.60
UK30LS30DZ40	2.03	2.01	5.21	10.44

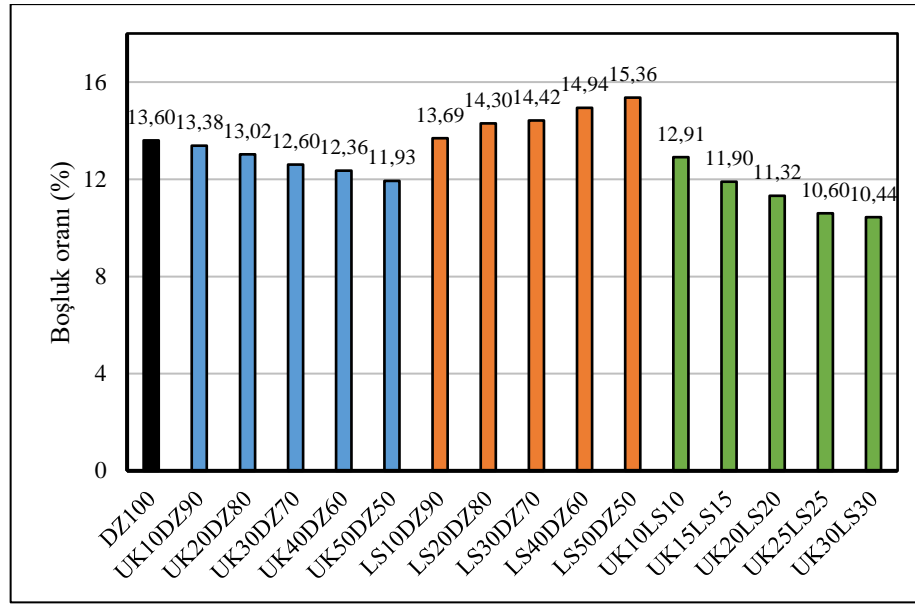
**Şekil 4.2.** Geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları



Şekil 4.3. Geopolimer harçların özgül ağırlıkları



Şekil 4.4. Geopolimer harçların su emmeleri



Şekil 4.5. Geopolimer harçların boşluk oranları

Yapılan deneysel çalışmalar sonuçlarında uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker miktarlarının artması ile birlikte geopolimer harç numunelerin birim hacim ağırlıklarının ve özgül ağırlıklarının değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere en düşük birim hacim ağırlık (1.83 gr/cm^3), %100 doğal zeolit kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerden elde edilmiştir. Doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 kalker kullanılması durumunda en yüksek birim hacim ağırlık (2.03 gr/cm^3) elde edilmiştir.

Üretilen farklı kategoriler geopolimer harçlar için su emme deney sonuçları Çizelge 4.2’de verilmektedir. Geopolimer harçların su emme değerleri %5.21 ve %8.02 arasında çıkmıştır. Maksimum su emme, doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanılması durumunda elde edilirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında minimum su emme elde edilmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numuneler su emme değeri %7.48 çıkmıştır.

Genel olarak, uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlarda, doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça su emme değerleri azalmıştır. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, su emme miktarı %7.10 azalmıştır. Doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanılması durumunda ise, su emme miktarı %6.21 azalmıştır. Bu sonuçlara göre, doğal zeolit yerine katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlarının su emme değerleri azalmıştır.

Diğer yandan, kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlarda, doğal zeolit yerine kullanılan kalker miktarı arttıkça su emme miktarları biraz artmıştır. Örneğin, doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında, su emme miktarı %8.02 en yüksek çıkmıştır. Doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanılması durumunda ise, su emme miktarı %7.61 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, doğal zeolit yerine katkı maddesi olarak kullanılan toz kalker miktarı arttıkça, kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlarının su emme miktarları artmıştır. Son olarak, uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların su emme miktarlarına bakıldığında, doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül-toz kalker miktarı arttıkça su emme miktarları düşmüştür. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 kalker kullanıldığında, su emme miktarı %6.75 azalmıştır. Doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 kalker kullanılması durumunda ise, su emme miktarı %5.21 azaltmıştır. Bu sonuçlara göre, zeolit yerine katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül-toz kalker miktarı arttıkça, uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlarının su emme değerleri azaltmıştır.

Boşluk oranlarının yüzdesi Çizelge 4.2'de verilmiştir. Geopolimer harç numunelerin boşluk oranları %10.44 ila %15.36 arasında değişmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin boşluk oranı %13.60 olarak bulunmuştur. Zeolit bazlı geopolimer harçların boşluk oranları, katkı maddesi olarak uçucu kül kullanıldığında bir azalma göstermiştir. Katkı maddesi olarak uçucu kül içeren zeolit bazlı geopolimer harçlar için doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında boşluk oranı %13.38 olarak çıkarken, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında boşluk oranı %11.93 olarak bulunmuştur. Geopolimer harçların boşluk oranları, doğal zeolit yerine katkı maddesi olarak toz kalker kullanıldığında biraz artmıştır. Katkı maddesi olarak toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harç numuneler için doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında maksimum boşluk oranı (%15.36) kaydedilirken, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında minimum boşluk oranı (%13.69) elde edilmiştir.

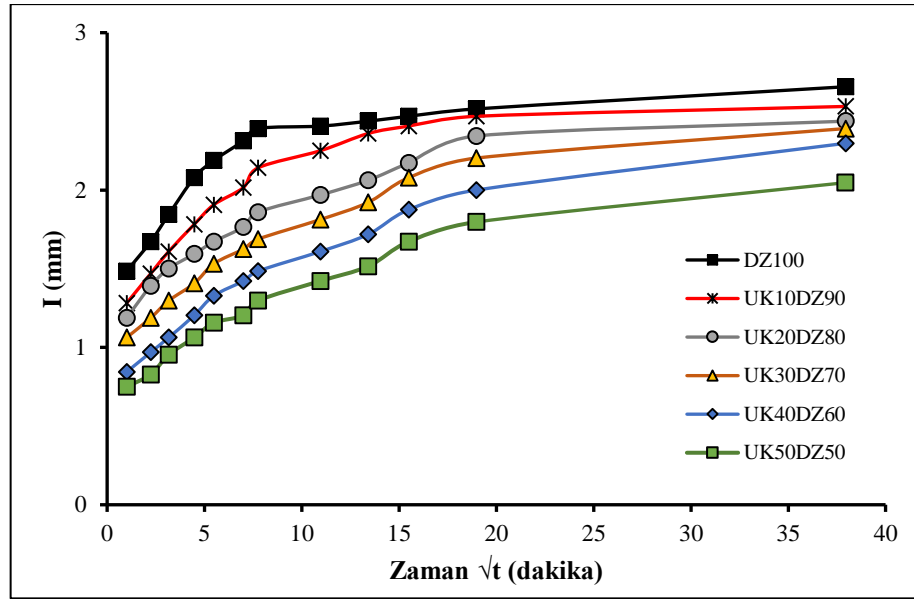
Katkı maddesi olarak uçucu kül-toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harç numuneler için ise doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanıldığında boşluk oranı (%12.91) kaydedilirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında minimum boşluk oranı (%10.44) elde edilmiştir. Katkı maddesi olarak uçucu kül ve toz kalker birlikte kullanıldığında, geopolimer harçların boşluk oranları, sadece toz kalker ve uçucu kül katkı maddesi olarak kullanılan geopolimer harçlardan daha küçük olduğunu görülmüştür.

4.3. Kapilarite (Kılcallık Su Emme) Katsayısı

Kapilarite katsayısı, bir malzemenin kılcal emiş yoluyla suyu emme ve iletme yeteneğidir ve dayanıklılık için önemli olan mikroyapı ve özelliklerin mühendislik ölçüsünü sağlamaktadır. Kapilarite katsayısı, agresif ortamlara maruz kalmaya karşı beton direncinin bir ölçüsü olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Kapilarite katsayısı testi, geopolimer betonun dayanıklılığının değerlendirildiği en önemli testlerden biridir. Kapiler su emme deneyi 28 günlük kür edilen 40x40x160 mm³ boyutlarındaki geopolimer harç numuneleri kullanılarak ASTM C1585'e göre yapılmıştır. Katkı maddesi olarak uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harçları ilk olarak fırında kurutulup ağırlıklarını kaydedilmiştir. Numuneler daha sonra suyun içine tek yönde temas olarak şekilde yerleştirilerek 1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 360 ve 1440 dakika sonra ağırlık değerlerini kaydedilmiştir. Kapilarite katsayısı Denklem 3.10 kullanılarak hesaplanmış ve milimetre cinsinden ifade edilmiştir.

Uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin kapilarite katsayısı testi sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6'da görülebileceği üzere, %100 doğal zeolit içeren numunelerin ve uçucu kül katkılı zeolit bazlı numunelerin kapiler katsayısı değerleri ilk 30 dakika hızlı bir artış göstermiştir. 30 dakika ila 24 saat arası kapiler katsayısı değerleri neredeyse sabit kaldığı görülmüştür.

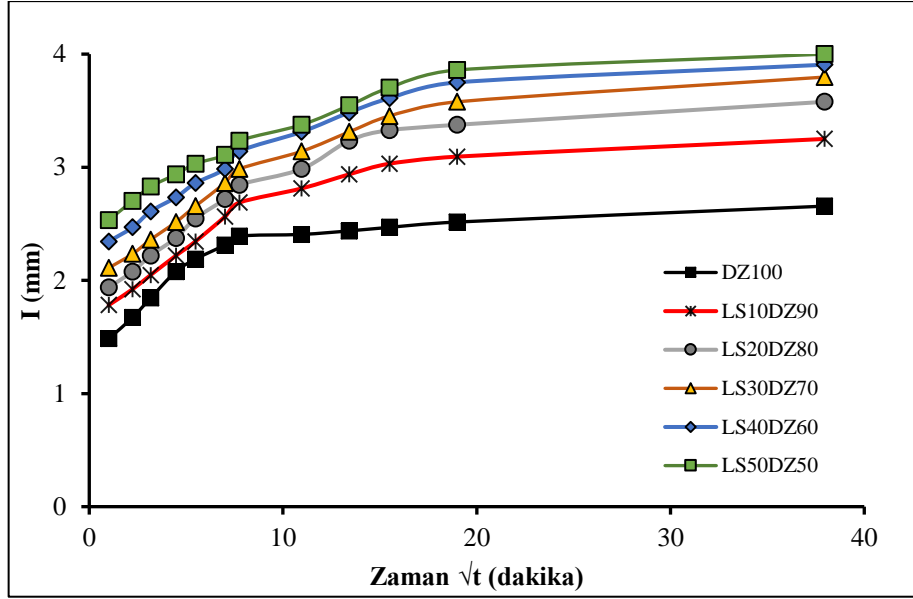
Katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça geopolimer harç numunelerin kapilarite katsayısı değerleri azalmıştır. Bağlayıcı olarak %100 doğal zeolit içeren numuneler en yüksek kapilarite katsayısı değeri gösterirken, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül içeren harçlar en düşük kapilarite katsayısı değeri göstermiştir. Geopolimer harç numunelerin kapilarite katsayısı değerlerin zamanla arttığı tespit edilmiştir. Örneğin, ilk dakika için %100 doğal zeolit içeren numunelerin kapilarite katsayısı değeri 1.48 mm iken 24 saat sonra 2.66 mm'ye ulaşmıştır. Katkı maddesi olarak %50 uçucu kül içeren zeolit numuneleri için kapilarite katsayısı değeri 1 dakika sonra 0.75 mm iken 24 saat sonra 2.05 mm çıkmıştır.



Şekil 4.6. Uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların 28 günlük kapilarite katsayısını sonuçları

Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin kapilarite katsayısı testi sonuçları Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Şekil 4.7'den de görülebileceği üzere, %100 doğal zeolit içeren numuneleri ve kalker katkılı zeolit bazlı numuneleri kapilarite katsayısı değerleri ilk 30 dakika hızlı bir artış göstermiştir. 30 dakika ila 6 saat arası kapilarite katsayısı değerleri bir artış göstermiştir. 6 saat sonra numunelerin kapilarite katsayısı değerleri neredeyse sabit kaldığı görülmüştür.

Katkı maddesi olarak kullanılan kalker miktarı arttıkça geopolimer harç numunelerin kapilarite katsayısı değerleri artmıştır. %100 doğal zeolit içeren numunelerin en düşük kapilarite katsayısı değeri gösterirken doğal zeolit yerine %50 toz kalker içeren numuneleri en yüksek kapilarite katsayısı değeri göstermiştir. %100 doğal zeolit kullanıldığında, numunelerin kapilarite katsayısı değerlerinin zamanla arttığı tespit edilmiştir. Örneğin, ilk dakika kapilarite katsayısı değeri 1.48 mm iken 24 saat sonra 2.66 mm'ye ulaşmıştır. Katkı maddesi olarak %50 kalker içeren zeolit numuneler için kapilarite katsayısı değeri 1 dakika sonra 2.35 mm iken 24 saat sonra neredeyse 4 mm'ye ulaşmıştır.

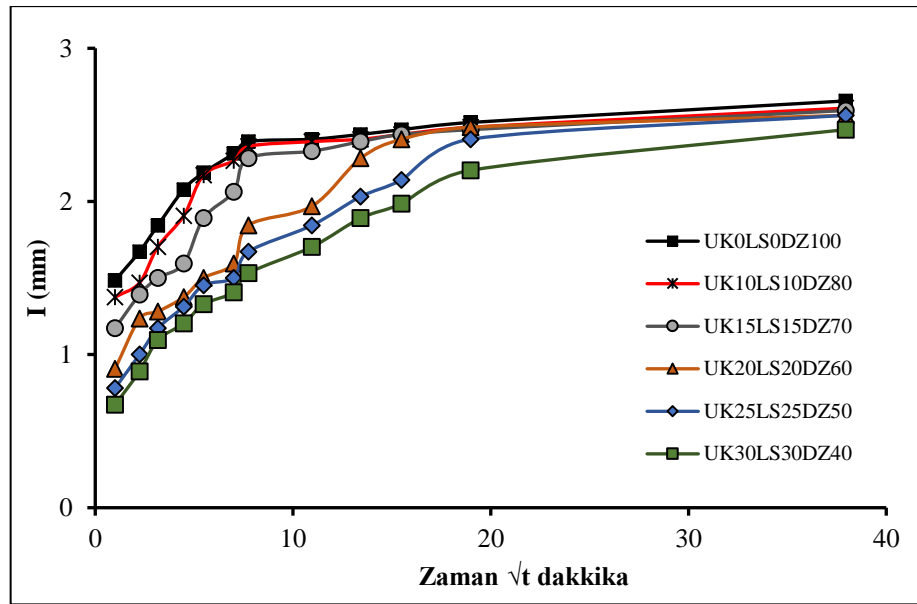


Şekil 4.7. Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların 28 günlük kapilarite katsayısını sonuçları

Uçucu kül-toz kalker- katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin kapilarite katsayısı testi sonuçları Şekil 4.8'de göstermektedir. Şekil 4.8'den de görülebileceği üzere, %100 doğal zeolit içeren numuneler ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı numuneler kapilarite katsayısı değerleri ilk 30 dakika hızlı bir artış göstermiştir ama 30 dakika ila 24 saat arası yavaş bir şekilde artmıştır ve neredeyse sabit kaldığı görülmüştür.

Katkı maddesi olarak kullanılan uçucu kül-toz kalker miktarı arttıkça geopolimer harçların kapilarite katsayısı değerleri azalmıştır. %100 doğal zeolit içeren numuneler en yüksek kapilarite katsayısı değeri gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker içeren numuneler en düşük göstermiştir.

Geopolimer harç numunelerin kapilarite katsayısı değerleri zamanla arttığı görülmüştür. Örneğin, ilk dakika için %100 doğal zeolit içeren numunelerin kapilarite katsayısı değeri 1.48 mm iken 24 saat sonra 2.66 mm'ye ulaşmıştır. Katkı maddesi olarak doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 kalker içeren numuneler için kapilarite katsayısı değeri 1 dakika sonra 0.67 mm iken 24 saat sonra neredeyse 2.47 mm çıkmıştır.



Şekil 4.8. Uçucu kül-kalker- katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların 28 günlük kapilarite katsayısını sonuçları

4.4. Mekanik Özellikler

Bu çalışmada üretilen geopolimer harç numunelerin basınç ve eğilme dayanımı özellikleri belirlenmiş, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi için önce zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri üretilmiş sonra uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkı maddeleri olarak kullanılmıştır. Bu bölümde basınç ve eğilme dayanımlarına ait olan 7, 28 ve 90 günlük deney sonuçları sunulmaktadır.

4.4.1. Eğilme dayanımı deney sonuçları

Bu çalışmada geopolimer harç numuneleri üretilmiş ve ilk 24 saat boyunca 80 °C fırında kür edilmiştir. 24 saat sonra fırından çıkarılmış ve test gününe kadar oda sıcaklığında kür edilmiştir. Eğilme dayanımı deneyi için 40x40x160 mm³ prizmatik numuneler üretilmiş ve 7., 28., ve 90. günlerde test edilmiştir.

Üç farklı kategoride zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Birinci kategoride uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer üretmek için katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmıştır. İkinci kategoride kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer üretmek için katkı malzemesi olarak toz kalker kullanılmıştır. Son olarak, üçüncü kategoride uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer üretmek için katkı malzemesi olarak hem uçucu kül hem de toz kalker birlikte kullanılmıştır. Çizelge 4.3'te, uçucu kül, toz

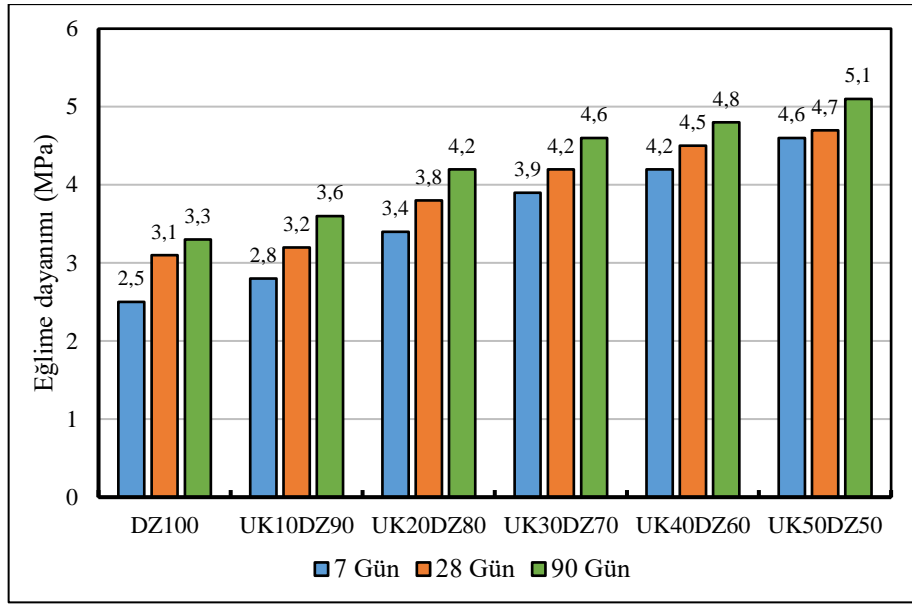
kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçlarını vermiştir.

Çizelge 4.3. Geopolimer harçların eğilme dayanımı deney sonuçları

Numune kodu	7 Gün	28 Gün	90 Gün
UK0LS0DZ100	2.5	3.1	3.3
UK10DZ90	2.8	3.2	3.6
UK20DZ80	3.4	3.8	4.2
UK30DZ70	3.9	4.2	4.6
UK40DZ60	4.2	4.5	4.7
UK50DZ50	4.6	4.7	4.9
LS10DZ90	3.1	3.5	3.9
LS20DZ80	3.6	3.9	4.5
LS30DZ70	4.1	4.5	4.8
LS40DZ60	4.5	4.8	5
LS50DZ50	4.8	5.1	5.4
UK10LS10DZ80	4.6	5.5	5.7
UK15LS15DZ70	4.9	6.2	6.2
UK20LS20DZ60	6.3	7.1	7.5
UK25LS25DZ50	5.1	5.5	5.6
UK30LS30DZ40	5.3	5.9	6.1

Zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin ilk kategorisinin eğilme dayanımı test sonuçları Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Şekil 4.9'dan görülebileceği üzere, kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı değerleri artmıştır.

7 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı 2.5 MPa olarak bulunmuştur. Zeolit yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, 7 günlük eğilme dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, eğilme dayanımı %12 artmıştır. Doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, eğilme dayanımı değeri 4.6 MPa'ya ulaşarak, %84 oranında arttığı anlamına gelmektedir.

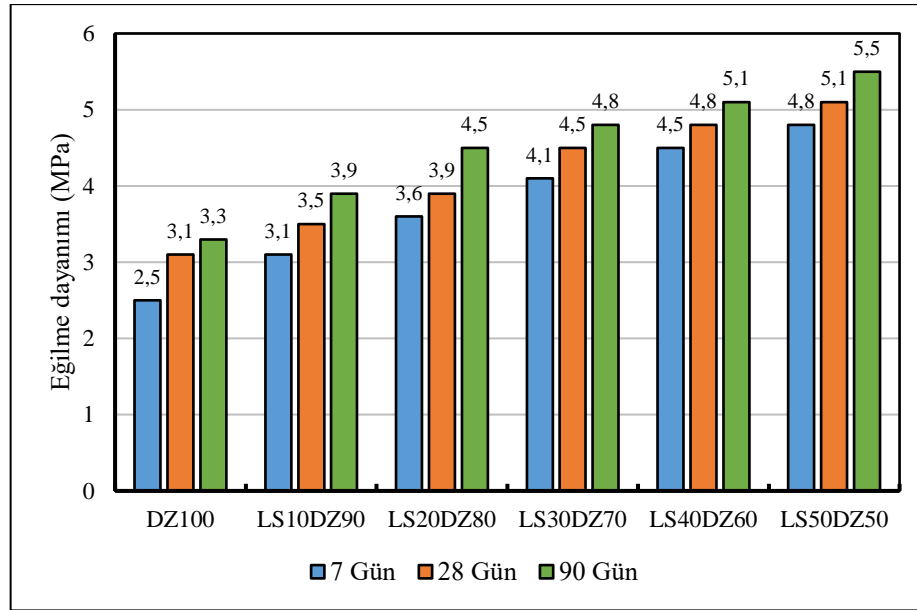


Şekil 4.9. Uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların eğilme dayanımı deney sonuçları

28 gün kür edildikten sonra % 100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı 3.1 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, 28 günlük eğilme dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, 28 günlük eğilme dayanımı %3.2 artmıştır. Doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, 28 günlük eğilme dayanımı değeri 4.7 MPa'ya ulaşarak, %51.6 oranında arttığı anlamına gelmektedir.

90 gün kür edildikten sonra % 100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı 3.3 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, 90 günlük eğilme dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, eğilme dayanımı %9 artmıştır. Doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, 90 günlük eğilme dayanımı değeri 5.1 MPa'ya ulaşarak, %54.6 oranında arttığı anlamına gelmektedir.

Zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin ikinci kategorisinin eğilme dayanımı test sonuçları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.10'dan görülebileceği üzere, kullanılan toz kalker miktarı arttıkça, kalker katkılı zeolit bazlı numunelerin eğilme dayanımı değerlerini artmıştır.



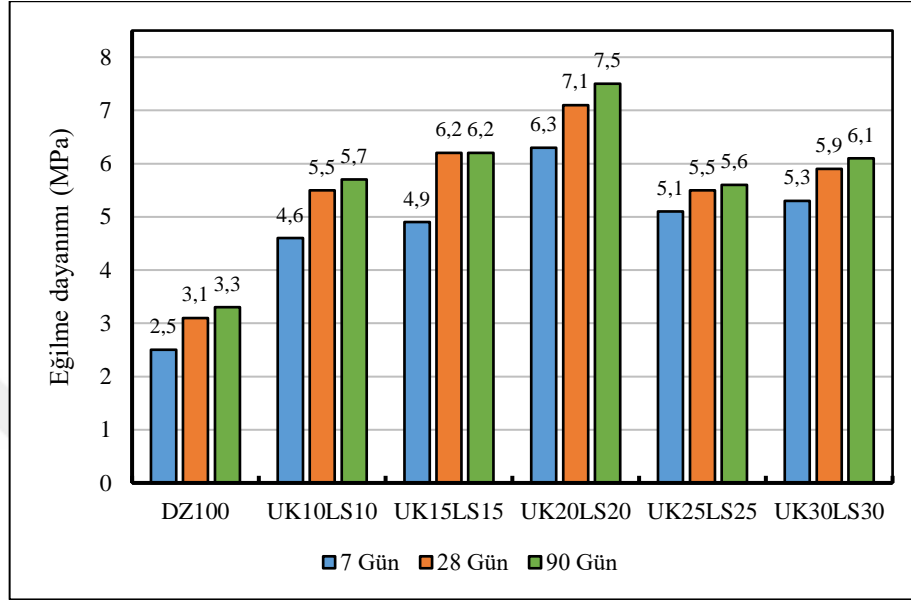
Şekil 4.10. Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların eğilme dayanımı deney sonuçları

7 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı 2.5 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan kalker miktarı arttıkça, 7 günlük eğilme dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanılması durumunda, eğilme dayanımı %24 artmıştır. Doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanılması durumunda ise, eğilme dayanımı değeri 4.8 MPa'ya ulaşarak, %92 oranında arttığı anlamına gelmektedir.

28 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı 3.1 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan kalker miktarı arttıkça, 28 günlük eğilme dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanılması durumunda, 28 günlük eğilme dayanımı %13 artmıştır. Doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanılması durumunda ise, 28 günlük eğilme dayanımı değeri 5.1 MPa'ya ulaşarak, %64.5 oranında arttığı anlamına gelmektedir.

90 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı 3.3 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan kalker miktarı arttıkça, 90 günlük eğilme dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı %18.2 artmıştır. Doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında ise, 90 günlük eğilme dayanımı değeri 5.5 MPa'ya ulaşarak, %66.7 oranında arttığı anlamına gelmektedir.

Zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin üçüncü kategorisinin eğilme dayanımı test sonuçları Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Şekil 4.11’den görülebileceği üzere, kullanılan uçucu kül-toz kalker miktarı arttıkça, uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı numunelerin eğilme dayanımı değerlerini artmıştır.



Şekil 4.11. Uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların eğilme dayanımı deney sonuçları

7 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı 2.5 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül –toz kalker miktarı arttıkça, 7 günlük eğilme dayanımı değerleri hafifçe dalgalanmıştır. %20 uçucu kül ve %20 toz kalker kullanıldığında geopolimer harçlar en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaşmıştır. Kullanılan uçucu kül ve toz kalker miktarı %20’den fazla olunca eğilme dayanımı bir düşüş göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanıldığında, geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı %84 artmıştır. Doğal zeolit yerine %15 uçucu kül ve %15 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı değeri 4.9 MPa’ya ulaşarak, %96 oranında artmıştır. Doğal zeolit yerine %20 uçucu kül ve %20 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı 6.3 MPa en yüksek değere ulaşmıştır (eğilme dayanımı %152 artmıştır). Doğal zeolit yerine %25 uçucu kül ve %25 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı biraz düşüş göstermiş ve 5.1 MPa bir değeri olarak bulunarak, eğilme dayanımı %104 oranında artmıştır. Son olarak, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı yeniden

biraz artış göstermiş ve 5.3 MPa değerine ulaşılmıştır (eğilme dayanımı %112 oranında artmıştır).

28 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı 3.1 MPa olarak bulunmuştur. 7 günlük sonuçları gibi, 28 günlük geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı hafifçe dalgalanmıştır. %20 uçucu kül ve %20 toz kalkere eğilme dayanımı doğrusal artmış ve sonra eğilme dayanımı bir düşüş göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanılması durumunda, eğilme dayanımı %77.4 artmıştır. Doğal zeolit yerine %15 uçucu kül ve %15 toz kalker kullanılması durumunda, eğilme dayanımı değeri %100 artmıştır. Doğal zeolit yerine %20 uçucu kül ve %20 toz kalker kullanıldığında ise, eğilme dayanımı 7.1 MPa en yüksek değere ulaşmıştır (eğilme dayanımı %129 arttırmıştır). Doğal zeolit yerine %25 toz kalker ve %25 uçucu kül kullanıldığında, eğilme dayanımı (5.5 MPa) biraz düşmüş ama %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçların karşılaştırıldığında, %77.4 artmıştır. Son olarak, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı değeri 5.9 MPa bulunmuş yani eğilme dayanımı %90.3 artmıştır.

90 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı 3.3 MPa olarak bulunmuştur. 28 günlük sonuçları gibi, 90 gün sonra numunelerin eğilme dayanımları, hafifçe dalgalanmıştır. %20 uçucu kül ve %20 toz kalkere kadar eğilme dayanımı doğrusal artmış ve sonra eğilme dayanımı bir düşüş göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanılması durumunda, eğilme dayanımı %72.7 artmıştır. Doğal zeolit yerine %15 uçucu kül ve %15 toz kalker kullanılması durumunda, eğilme dayanımı değeri %87.9 artmıştır. Doğal zeolit yerine %20 uçucu kül ve %20 toz kalker kullanıldığında ise, eğilme dayanımı 7.5 MPa en yüksek değere ulaşmıştır (eğilme dayanımı %127.3 arttırmıştır). Doğal zeolit yerine %25 uçucu kül ve %25 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı (5.6 MPa) biraz düşmüş ama %100 doğal zeolit içeren harçların karşılaştırıldığında, %69.7 artmıştır. Son olarak, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı değeri 6.1 MPa bulunmuş yani eğilme dayanımı %84.9 artmıştır.

4.4.2. Basınç dayanımı deney sonuçları

Geopolimer harç numuneleri 7, 28 ve 90 gün boyunca oda sıcaklığında kür edilmiş sonra 40x40x160 mm³ prizmatik numuneler eğilme dayanımı test edildiğinde iki bölüme

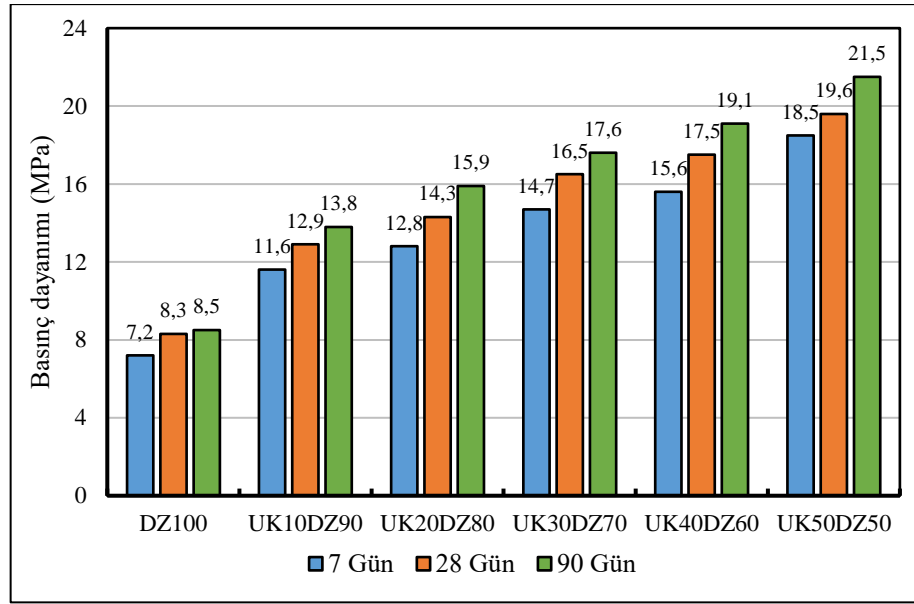
ayrılmış ve elde edilen her parça (40x40 mm²) basınç dayanım testine tabi tutulmuştur. Çizelge 4.4, üretilen numunelerin basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 4.4. Geopolimer harçların basınç dayanımı deney sonuçları

Numune kodu	7 Gün	28 Gün	90 Gün
UK0LS0DZ100	7.2	8.3	8.5
UK10DZ90	11.6	12.9	13.8
UK20DZ80	12.8	14.3	15.9
UK30DZ70	14.7	16.5	17.6
UK40DZ60	15.6	17.5	19.1
UK50DZ50	18.5	19.6	21.5
LS10DZ90	15.6	16.8	17.5
LS20DZ80	18.3	19.4	20.1
LS30DZ70	19.8	20.5	21.8
LS40DZ60	20.5	21.6	22.6
LS50DZ50	21.3	22.5	23.5
UK10LS10DZ80	20.7	22.8	24.2
UK15LS15DZ70	21.5	23.2	25.2
UK20LS20DZ60	25.6	28.8	31.8
UK25LS25DZ50	22.5	23.5	26.8
UK30LS30DZ40	23.4	24.5	25.9

Bu çalışmada, üç farklı kategoride zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Birinci kategoride uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer üretmek için katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmıştır. İkinci kategoride kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer üretmek için katkı malzemesi olarak toz kalker kullanılmıştır. Son olarak, üçüncü kategoride uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer üretmek için katkı malzemesi olarak hem uçucu kül hem de toz kalker birlikte kullanılmıştır. Çizelge 4.4, kalker, uçucu kül ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçlarını göstermektedir.

Zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin ilk kategorisinin basınç dayanımı test sonuçları Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Şekil 4.12'den görülebileceği üzere, kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, uçucu kül katkılı zeolit bazlı numunelerin basınç dayanımı değerlerini artmıştır.



Şekil 4.12. Uçucu kül katkıli zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı deney sonuçları

7 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit bağlayıcı malzeme olarak kullanılarak üretilen zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 7.2 MPa olarak bulunmuştur. Nikolov ve ark. (2017) 3.7 MPa'lık zeolit bazlı geopolimerin maksimum basınç dayanımını bildirirken, Baykara ve ark. (2017) 10 MPa'lık zeolit bazlı geopolimerin maksimum basınç dayanımını bildirmişlerdir. Bu geçmiş araştırmalara göre, üretilen zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı bu iki değer arasındadır. Zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımını arttırmak için, mineral katkıları olarak uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker kullanılmıştır.

Doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, 7 günlük basınç dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, basınç dayanımı %61.1 artmıştır (basınç dayanımı 7.2 MPa'dan 11.6 MPa'ya yükselmiştir). Doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, basınç dayanımı değeri 18.5 MPa'ya ulaşarak, %157 oranında artmıştır.

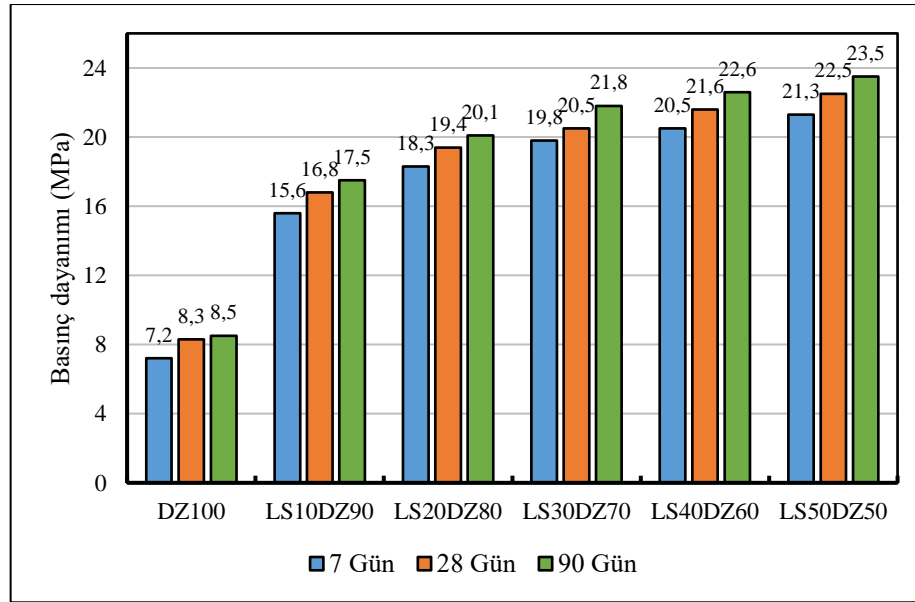
28 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 8.3 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer 7 günlük edilen değerle karşılaştırıldığında, basınç dayanımının biraz arttığı görülmüştür. Doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, 28 günlük basınç dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanılması durumunda, 28 günlük basınç dayanımı %55.4 artmıştır (basınç dayanımı 8,3 MPa'dan 12,9 MPa'ya

yükselmiştir). Doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanılması durumunda ise, 28 günlük basınç dayanımı değeri 19.6 MPa'ya ulaşarak, %136.2 oranında artmıştır.

90 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 8.5 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer 28 günlük basınç dayanımının biraz arttığı görülmüştür. Doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, 90 günlük basınç dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, basınç dayanımı %62.4 artmıştır (basınç dayanımı 8.5 MPa'dan 13,8 MPa'ya yükselmiştir). Doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, 90 günlük basınç dayanımı değeri 21.5 MPa'ya ulaşarak %153 oranında artmıştır.

Bu sonuçlara göre, doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça, üretilen uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımının arttığını görülmüştür. %100 doğal zeolit içeren geopolimer en düşük basınç dayanımını sağlarken, %50 uçucu kül içeren zeolit bazlı geopolimer en yüksek basınç dayanımını sağlamıştır.

Zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin ikinci kategorisinin basınç dayanımı test sonuçları Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Şekil 4.13'ten görülebileceği üzere, kullanılan toz kalker miktarı arttıkça, kalker katkılı zeolit bazlı numunelerin basınç dayanımı değerleri %100 doğal zeolit içeren numuneler ile karşılaştırıldığında bir artış göstermiştir.



Şekil 4.13. Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı deney sonuçları

Doğal zeolit yerine kullanılan toz kalker miktarı arttıkça, 7 günlük basınç dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanılması

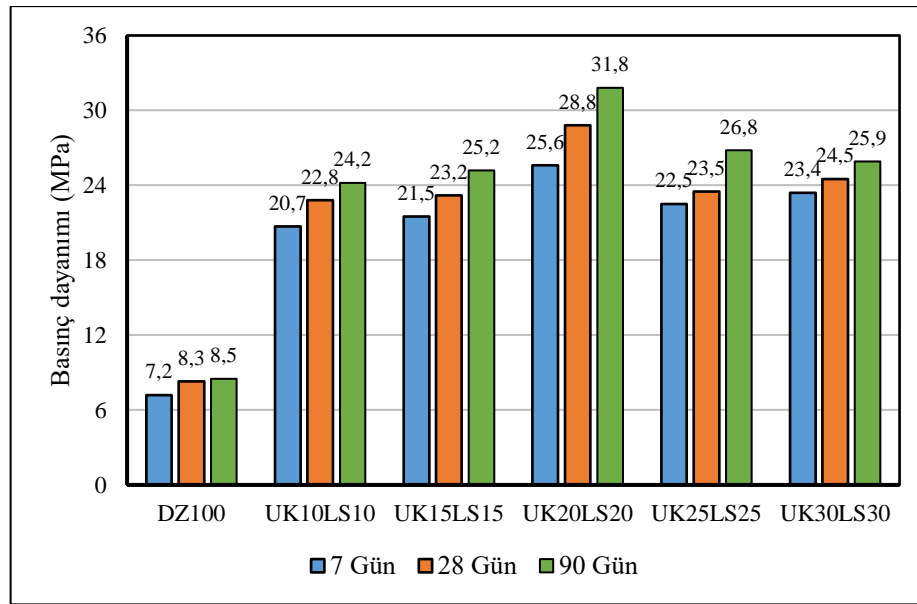
durumunda, basınç dayanımı 7.2 MPa'dan 15.6 MPa'ya yükselmiştir (basınç dayanımı %116.7 artmıştır). Doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanılması durumunda ise, basınç dayanımı değeri 18.5 MPa'ya ulaşarak, %195.8 oranında artmıştır.

28 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 8.3 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan toz kalker miktarı arttıkça, 28 günlük basınç dayanımını doğrusal arttırmıştır. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanılması durumunda, 28 günlük basınç dayanımı 8.3 MPa'dan 12.9 MPa'ya yükselmiştir (basınç dayanımı %102.4 artmıştır). Doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanılması durumunda ise, 28 günlük basınç dayanımı değeri 22.5 MPa'ya ulaşarak, %171.1 oranında artmıştır.

90 günlük kür edildikten sonra %100 zeolit içeren geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 8.5 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan toz kalker miktarı arttıkça, 90 günlük basınç dayanımı doğrusal bir artış göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı 8.5 MPa'dan 17.5 MPa'ya yükseltilmiştir. (basınç dayanımı %105.9 artmıştır). Doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında ise, 90 gün sonra toz kalker katkılı zeolit bazlı basınç dayanımı değeri 23.5 MPa'ya ulaşarak, %176.5 oranında artmıştır.

Bu sonuçlara göre, doğal zeolit yerine kullanılan toz kalker miktarı arttıkça, üretilen kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımının arttığı görülmüştür. %100 doğal zeolit içeren numuneler en düşük basınç dayanımı sağlarken, doğal zeolit yerine %50 toz kalker içeren numuneler en yüksek basınç dayanımı sağlamıştır.

Zeolit bazlı geopolimer harç numunelerinin üçüncü kategorisinin basınç dayanımı test sonuçları Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'ten görülebileceği üzere, kullanılan uçucu kül ve toz kalker miktarı arttıkça, uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı numunelerin basınç dayanımı değerleri hafifçe dalgalanmıştır. Uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı sonuçları tüm diğer zeolit bazlı numunelerinden daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.14. Uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı deney sonuçları

7 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 7.2 MPa olarak bulunmuştur. Doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül-toz kalker miktarı arttıkça, 7 günlük basınç dayanımı hafifçe dalgalanmıştır. Geopolimer harçların basınç dayanımı değerlerini %20 uçucu kül ve %20 toz kalkere kadar doğrusal artmıştır. Kullanılan uçucu kül ve toz kalker miktarı %20'den fazla olunca basınç dayanımı değerleri bir düşüş göstermiştir. Örneğin, zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı %187.5 artmıştır (basınç dayanımı 7.2 MPa'dan 20.7 MPa'ya yükselmiştir). Doğal zeolit yerine %15 uçucu kül ve %15 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı değeri 21.5 MPa'ya ulaşarak basınç dayanımı %198.6 oranında artmıştır. Doğal zeolit yerine %20 uçucu kül ve %20 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı 25.6 MPa en yüksek değeri ulaşmıştır (basınç dayanımı %255.6 oranında artmıştır). Doğal zeolit yerine %25 uçucu kül ve %25 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı biraz düşüş göstermiş ve 22.5 MPa bir değeri olarak bulunmuştur. Son olarak, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı yeniden biraz artış göstermiş ve 23.5 MPa bir değeri ulaşmıştır (Basınç dayanımı %226.4 oranında artmıştır).

28 gün kür edildikten sonra %100 zeolit içeren geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 8.3 MPa olarak bulunmuştur. 7 günlük sonuçları gibi, 28 günlük basınç dayanımı, hafifçe dalgalanmıştır. Geopolimer harçların basınç dayanımı değerlerini %20 uçucu kül ve %20 toz kalkere kadar doğrusal artmıştır. Örneğin, doğal zeolit yerine %10

uçucu kül ve %10 toz kalker birlikte kullanılması durumunda, basınç dayanımı %174.7 oranında artmıştır. Doğal zeolit yerine %15 uçucu kül ve %15 toz kalker kullanılması durumunda, basınç dayanımı değeri %179.5 artmıştır. Doğal zeolit yerine %20 uçucu kül ve %20 toz kalker kullanıldığında ise, basınç dayanımı 26.8 MPa en yüksek değere ulaşmıştır (basınç dayanımı %222,9 oranında arttırmıştır). Doğal zeolit yerine %25 uçucu kül ve %25 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı (23.5 MPa) biraz düşmüş ama %100 zeolit içeren geopolier harçlar karşılaştırıldığı zaman basınç dayanımı %183.1 oranında artmıştır. Son olarak, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı değeri 24.5 MPa bulunarak, basınç dayanımı %195.2 oranında artmıştır.

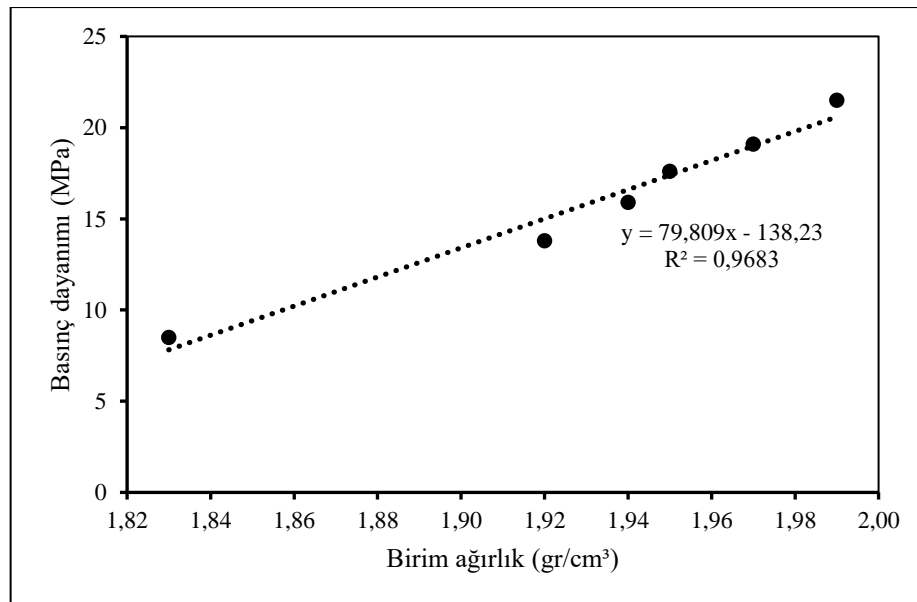
90 gün kür edildikten sonra %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı 8.5 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer 28 günlük elde edilen değerle karşılaştırıldığında, basınç dayanımı biraz arttığı görülmüştür. 28 günlük sonuçları gibi, 90 günlük geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı, hafifçe dalgalanmıştır. Geopolimer harçların basınç dayanımı değerlerini %20 uçucu kül ve %20 toz kalker kadar doğrusal artmıştır. Uçucu kül ve toz kalker miktarları arttıkça basınç dayanımı değerleri bir düşüş göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanılması durumunda, basınç dayanımı (24.2 MPa) %184.7 oranında artmıştır. Doğal zeolit yerine %15 uçucu kül ve %15 toz kalker kullanılması durumunda, uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı değeri (25.2 MPa) %196.5 artmıştır. Doğal zeolit yerine %20 uçucu kül ve %20 toz kalker kullanıldığında ise, basınç dayanımı 31.8 MPa en yüksek değere ulaşmıştır (geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı %274.1 oranında artmıştır). Doğal zeolit yerine %25 uçucu kül ve %25 toz kalker kullanıldığında, geopolimer harç numunelerin basınç dayanımı (26.8 MPa) biraz düşmüş ama %100 zeolit içeren karşılaştırıldığında, %215.3 oranında artmıştır. Son olarak, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı değeri 25.9 MPa bulunmuş yani eğilme dayanımı %204.7 oranında artmıştır.

Yukarda bahsi geçen sonuçlarına göre uçucu kül ve kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçlarında üretmek için kullanılan doğal zeolit miktarları arttıkça eğilme ve basınç dayanım değerleri azalmıştır. Özer (2018) ve Valipour ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmalarda da kullanılan zeolit miktarı arttıkça basınç dayanımlarında bir düşüş olduğunu göstermişlerdir.

Yukarıdaki tüm sonuçlardan, uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkıli zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımlarının, önemli bir şekilde ilk 28 günde arttığı fark edilmektedir. Bununla birlikte, basınç dayanımlarındaki değişim 28 gün sonra yavaşça artmıştır. Sonuçlara bakıldığında 90 günlük ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri yakın bulunmuştur. Bu nedenle, basınç dayanımı 28 günlük kürlemeden önce hızlı bir şekilde geliştiği fark edilmektedir. Cyr ve Pouhet, (2016) ve Yadollahi ve ark. (2015) tarafından yapılan araştırmalarda, geopolimerin basınç dayanımı 28 günlük kürlemeden sonra yavaşça arttığı ve bu sürenin ötesindeki dayanım kazanımı önemsiz olduğu sonucuna varılmıştır.

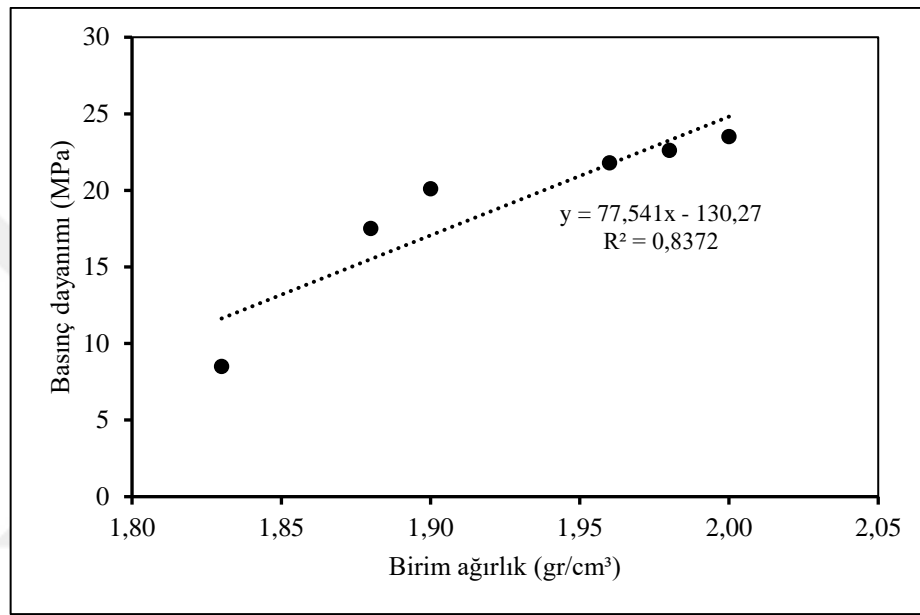
4.4.3. Geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişkisi

Çalışmada üretilmiş farklı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımlarını ve birim ağırlık değerlerini arasındaki ilişkisi incelenmiştir. Uçucu kül katkıli zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımlarını ve birim ağırlık değerlerini arasındaki ilişkisi Şekil 4.15'teki veriler itibariyle incelediğinde, bu iki parametre arasında istatistiksel olarak yüksek bir korelasyonel ilişkisi ($R^2 = 0.968$) olduğu görülmüştür. Böylece, basınç dayanımı ile birim ağırlık arasında doğrusal bir ilişki olduğu, artan birim ağırlık bağlı olarak basınç dayanımı değerinde artış olduğu görülmüştür.



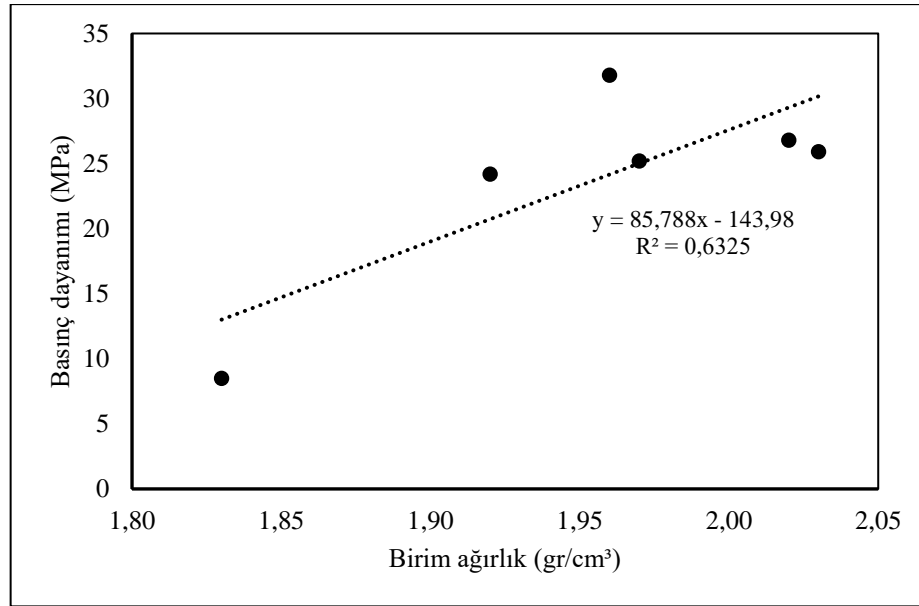
Şekil 4.15. Uçucu kül katkıli zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişki

Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişkisi Şekil 4.16'da göstermektedir. Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişkisi incelendiğinde, $R^2 = 0.837$ istatistiksel korelasyonel ilişkisi sağladığını görülmüştür. Bu korelasyon, uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların sağladığı korelasyonu daha küçük çıkmıştır. Ancak, kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların birim ağırlık değerleri arttıkça basınç dayanımı değerleri artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16. Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişki

Şekil 4.18'de uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişkisini göstermektedir. Bu şekil incelendiğinde, uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasında ilişkisi düşük anlam seviyesinde bir korelasyon olduğu ($R^2 = 0.623$) görülmüştür.



Şekil 4.17. Uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı ve birim ağırlık arasındaki ilişki

4.5. Durabilite Deneyleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Dayanıklılık deneyleri sonuçlarını; donma-çözülme direnci, ıslanma-kuruma direnci, sülfat etkisi ve asit etkisi deney sonuçlarının değerlendirilmesi başlıkları altında incelenmiştir. Böylece üretilen uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin fiziksel ve mekanik etkilere dayanıklılıkları değerlendirilmiştir. Dayanıklılık deneyleri 28 gün ortam koşulları kür edilen geopolimer harç numunelerin üzerinde uygulanmıştır.

4.5.1. Donma-çözülme deney sonuçları

Zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri ve uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı harç numuneleri 28 gün sonunda 50 döngü donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Her karışımdan 2 adet 40x40x160 mm³ prizmatik numune donma-çözülme test kabineye yerleştirilmiştir. Geopolimer numuneleri önce -20 °C sıcaklığa ulaşarak dondurulmuş daha sonra +20 °C sıcaklıkla çözülüp toplam 50 donma-çözülme çevrim uygulanmıştır. Donma-çözülme deneyi sonra numunelerin ağırlık kaybı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı sonuçlarına incelenmiş ve donma-çözülme deneyi önce elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

4.5.1.1. Geopolimerlerin donma-çözülme etkisinde ağırlık kaybı değerlendirilmesi

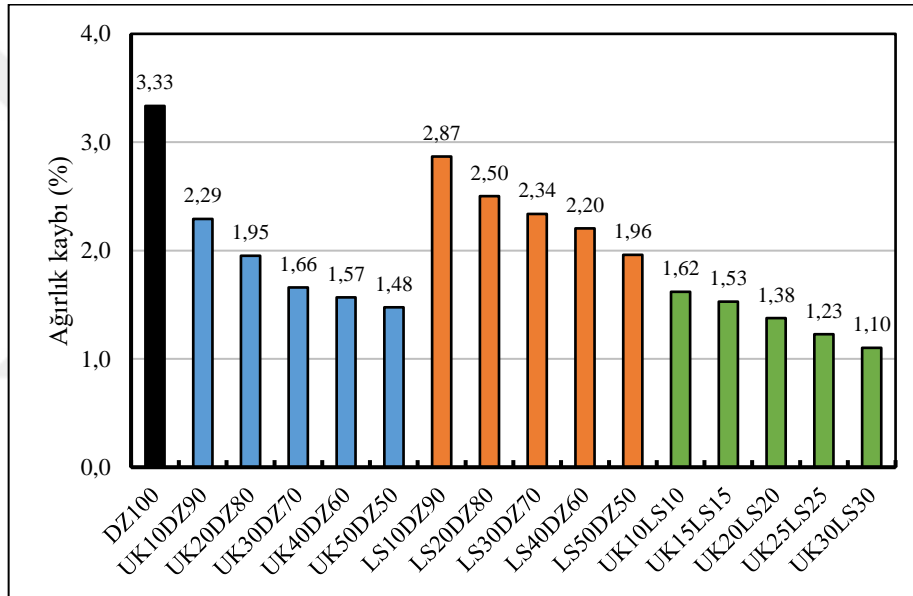
Donma-çözülme çevrimleri sonrası ağırlık kaybı hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerinin donma-çözülme çevrimlerinden kaynaklanan ağırlık kaybı değeri %3.33 bulunmuştur. Katkı maddesi olarak uçucu kül içeren numuneler için ağırlık kaybı, %100 doğal zeolit içeren numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Karışımda kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça ağırlık kayıpları bir düşüş göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, ağırlık kaybı değeri %2.29 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, ağırlık kaybı değeri %1.48 olarak bulunmuştur.

Katkı maddesi olarak toz kalker kullanılan geopolimer harç numuneleri için, ağırlık kaybı %100 doğal zeolit içeren numunelerinden daha küçük çıkmıştır ama uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer numunelerinden biraz daha büyük çıkmıştır. Geopolimer karışımda kullanılan toz kalker miktarı arttıkça ağırlık kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında, ağırlık kaybı değeri %2.87 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında ise, ağırlık kaybı değeri %1.96 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.5. Donma-çözülme çevrimlerden sonra ağırlık kayıpları

Numune kodu	Önceki ağırlık (gr)	Sonraki Ağırlık (gr)	Ağırlık kaybı (%)
UK0LS0DZ100	467.8	452.2	3.33
UK10DZ90	488.8	477.6	2.29
UK20DZ80	502.4	492.6	1.95
UK30DZ70	506.5	498.1	1.66
UK40DZ60	510.1	502.1	1.57
UK50DZ50	515.2	507.6	1.48
LS10DZ90	481.2	467.4	2.87
LS20DZ80	487.6	475.4	2.50
LS30DZ70	496.2	484.6	2.34
LS40DZ60	503.5	492.4	2.20
LS50DZ50	510.1	500.1	1.96
UK10LS10DZ80	506.4	498.2	1.62
UK15LS15DZ70	510.3	502.5	1.53
UK20LS20DZ60	515.8	508.7	1.38
UK25LS25DZ50	521.3	514.9	1.23
UK30LS30DZ40	526.3	520.5	1.10

Katkı maddesi olarak uçucu kül-kalker içeren geopolimer harç numuneleri için, ağırlık kaybı hem %100 doğal zeolit içeren numunelerinden hem de uçucu kül katkılı ve kalker katkılı zeolit bazlı numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer karışımlarının 50 donma-çözülme çevrimi sonrasında ağırlık kaybı değerleri %2'nin altındadır. Geopolimer karışımında kullanılan uçucu kül-toz kalker miktarı arttıkça ağırlık kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanıldığında, ağırlık kaybı değeri %1.62 gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında ise, ağırlık kaybı değeri %1.10 olarak bulunmuştur. Şekil 4.18'de geopolimer harç numunelerin donma-çözülme etkisinden kaynaklanan ağırlık kayıp değerleri göstermektedir.



Şekil 4.18. Donma-çözülme etkisindeki geopolimer harçlarının ağırlık kayıpları

4.5.1.2. Geopolimerlerin donma-çözülme etkisinde dayanım kaybı değerlendirilmesi

Donma-çözülme çevrimleri sonrası eğilme dayanımı kayıpları hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerinin donma-çözülme çevrimlerinden kaynaklanan eğilme dayanımı kaybı değeri %29 bulunmuştur. Katkı maddesi olarak uçucu kül içeren numuneler için, eğilme dayanımı kaybı %100 doğal zeolit içeren numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Karışımda kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça eğilme dayanımı kayıpları azalma

göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, eğilme dayanımı kaybı değeri %25 gösterirken, zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, eğilme dayanımı kaybı değeri düşmüş ve %14.9 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.6. Donma-çözülme çevrimlerden sonra eğilme dayanımı kayıpları

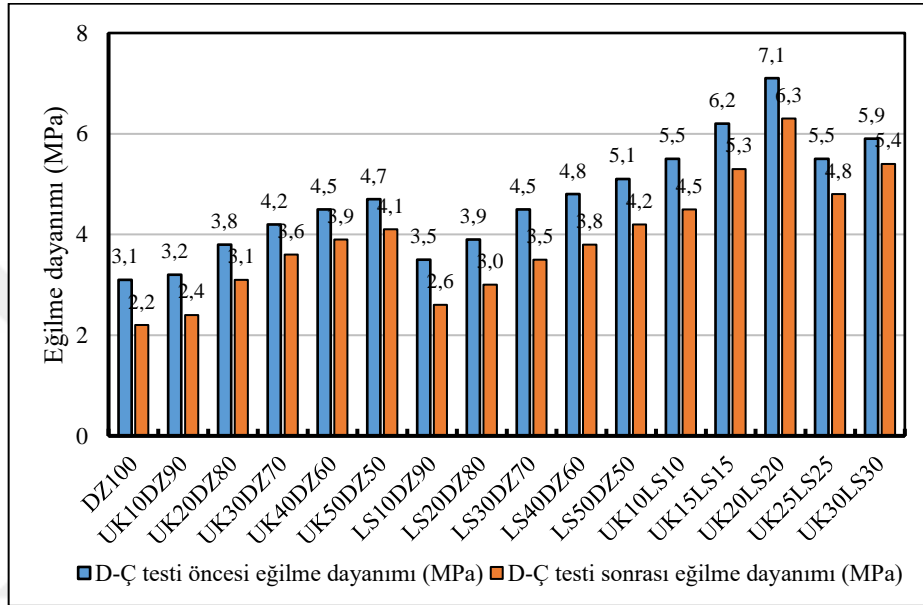
Numune kodu	D-Ç testi öncesi (28 gün) eğilme dayanımı (MPa)	D-Ç testi sonrası eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme dayanımı kaybı (%)
UK0LS0DZ100	3.1	2.2	29.0
UK10DZ90	3.2	2.4	25.0
UK20DZ80	3.8	3.1	18.4
UK30DZ70	4.2	3.6	14.3
UK40DZ60	4.5	3.9	13.3
UK50DZ50	4.7	4.1	12.8
LS10DZ90	3.5	2.6	25.7
LS20DZ80	3.9	3.0	23.1
LS30DZ70	4.5	3.5	22.2
LS40DZ60	4.8	3.8	20.8
LS50DZ50	5.1	4.2	17.6
UK10LS10DZ80	5.5	4.5	18.2
UK15LS15DZ70	6.2	5.3	14.5
UK20LS20DZ60	7.1	6.3	11.3
UK25LS25DZ50	5.5	4.8	12.7
UK30LS30DZ40	5.9	5.4	8.5

Katkı maddesi olarak toz kalker içeren geopolimer harç numuneleri için, eğilme dayanımı kaybı %100 doğal zeolit içeren numunelerinden daha küçük çıkmıştır ama uçucu kül katkılı zeolit bazlı numunelerinden biraz daha büyük çıkmıştır. Geopolimer karışımında kullanılan toz kalker miktarı arttıkça eğilme dayanımı kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı kaybı değeri %25.7 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında ise, eğilme dayanımı kaybı değeri %17.6 olarak bulunmuştur.

Son olarak, katkı maddesi olarak uçucu kül-toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri için, eğilme dayanımı kaybı hem %100 doğal zeolit içeren numunelerinden hem de uçucu kül katkılı ve kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer karışımlarının 50 donma-çözülme çevrim sonrasında eğilme dayanımı kaybı değerleri %20'in altındadır. Geopolimer karışımında kullanılan uçucu kül-toz kalker miktarı arttıkça eğilme dayanımı kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit

yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı kaybı değeri %18.2 gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında ise, eğilme dayanımı kaybı değeri %8.5 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.19, donma-çözülme çevrimleri uygulamadan önce geopolimer harçların eğilme dayanımlarını ve donma-çözülme çevrimleri uyguladıktan sonra geopolimer harçların eğilme dayanımı değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.19. Geopolimer harçların 50 donma-çözülme çevrim sonrasındaki eğilme dayanımı kayıpları

Donma-çözülme çevrimleri sonrası basınç dayanımı kayıpları ve sonuçlar Çizelge 4.7'de verilmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerinin donma-çözülme çevrimlerinden kaynaklanan basınç dayanımı kaybı değeri %31.3 bulunmuştur. Katkı maddesi olarak uçucu kül içeren geopolimer harç numuneleri için, basınç dayanımı kaybı %100 doğal zeolit içeren numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Karışımda kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça basınç dayanımı kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, basınç dayanımı kaybı değeri %15.5 gösterirken, zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, basınç dayanımı kaybı değeri düşmüş ve %12.2 olarak bulunmuştur.

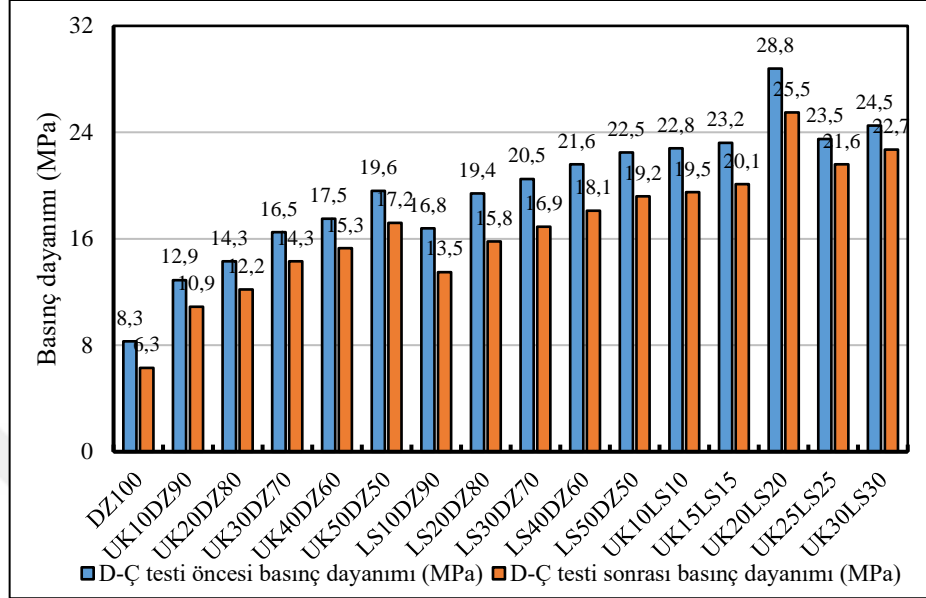
Çizelge 4.7. Donma-çözülme çevrimlerden sonra basınç dayanımı kayıpları

Numune kodu	D-Ç testi öncesi (28 gün) basınç dayanımı (MPa)	D-Ç testi sonrası basınç dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı kaybı (%)
UK0LS0DZ100	8.3	6.3	24.1
UK10DZ90	12.9	10.9	15.5
UK20DZ80	14.3	12.2	14.7
UK30DZ70	16.5	14.3	13.3
UK40DZ60	17.5	15.3	12.6
UK50DZ50	19.6	17.2	12.2
LS10DZ90	16.8	13.5	19.6
LS20DZ80	19.4	15.8	18.6
LS30DZ70	20.5	16.9	17.6
LS40DZ60	21.6	18.1	16.2
LS50DZ50	22.5	19.2	14.7
UK10LS10DZ80	22.8	19.5	14.5
UK15LS15DZ70	23.2	20.1	13.4
UK20LS20DZ60	28.8	25.5	11.5
UK25LS25DZ50	23.5	21.6	8.1
UK30LS30DZ40	24.5	22.7	7.3

Katkı maddesi olarak toz kalker kullanılan geopolimer harç numuneleri için, basınç dayanımı kaybı %100 doğal zeolit içeren numunelerinden daha küçük çıkmıştır ama uçucu kül katkılı zeolit bazlı numunelerinden biraz daha büyük çıkmıştır. Geopolimer karışımında kullanılan toz kalker miktarı arttıkça basınç dayanımı kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı kaybı değeri %19.6 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında ise, basınç dayanımı kaybı değeri %14.7 olarak bulunmuştur.

Katkı maddesi olarak uçucu kül-toz kalker kullanılan geopolimer harç numuneleri için, basınç dayanımı kaybı hem %100 doğal zeolit içeren numunelerinden daha hem de uçucu kül katkılı ve kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer karışımlarının 50 donma-çözülme çevrim sonrasında basınç dayanımı kaybı değerleri %15'in altındadır. Geopolimer karışımında kullanılan uçucu kül-toz kalker- miktarı arttıkça basınç dayanımı kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı kaybı değeri %14.5 gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında ise, basınç dayanımı kaybı değeri %7.3 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.20, donma-çözülme çevrimleri uygulamadan önce geopolimer harçların basınç dayanımlarını ve donma-çözülme çevrimleri uyguladıktan sonra geopolimer harçların basınç dayanımı değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.20. Geopolimer harçların 50 donma-çözülme çevrim sonrasındaki basınç dayanımı kayıpları

4.5.2. İslanma-kuruma deney sonuçları

Zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri ve uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı harç numunelerine 28 gün sonra ASTM D559'a göre 12 çevrim ıslanma-kuruma uygulanmıştır. Üretilen numuneleri 28 gün boyunca ortam koşullarında kür edilmiştir. Daha sonra her karışımdan 2 adet 40x40x160 mm³ prizmatik numune ıslanma-kuruma testi için kullanılmıştır. İslanma-kuruma testi için kullanılan numuneleri, sabit ağırlık elde etmek için ilk olarak 100 °C'de 24 saat fırına yerleştirilmiştir. İslanma-kuruma deney sonrası numunelerin ağırlık kayıpları, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı kayıplarına hesaplanmış ve ıslanma-kuruma önce elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

İslanma-kuruma çevrimlerinden sonra geopolimer harç numuneleri görsel olarak incelendiğinde, %100 doğal zeolit içeren numuneler büyük parça kayıpları göstermişlerdir. Katkı maddesi olarak toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harçlarda özellikle numunelerin köşe kısımlarında bazı kayıplar görülmüştür. Katkı maddesi olarak uçucu kül içeren zeolit bazlı geopolimer harçlar, ıslanma-kuruma çevrimleri sonrasında tüm numunelerin yüzeylerinde görsel bozulma gözlenmemiştir. Son olarak, katkı

maddesi olarak uçucu kül-toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harçlarda stabil ve ıslama-kuruma işleminden sonra görsel bir bozulma gözlenmemiştir. Bu, katkı maddesi olarak uçucu kül-toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harçların ıslanma-kuruma çevrimleri altında stabil olduğunu ve ıslak ve kuru iklimlerde iyi olabileceğini göstermektedir. Şekil 4.21, ıslanma-kuruma çevrimleri uyguladıktan sonra numuneleri görsel halde göstermektedir.



Şekil 4.21. Islanma-kuruma testinden sonra geopolimer harçları

4.5.2.1. Geopolimerlerin ıslanma-kuruma etkisinde ağırlık kaybı değerlendirilmesi

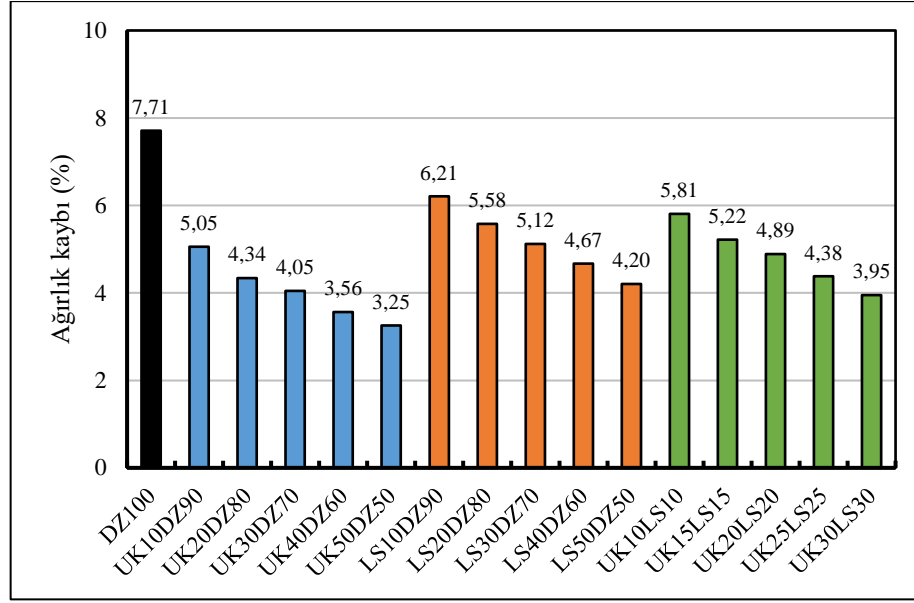
12 ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra geopolimer harç numunelerinin ağırlığı ölçülmüş ve ağırlık kayıplarının sonuçları Çizelge 4.8'de verilmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar, 12 ıslanma-kuruma çevrimlerinden sonra %7.71 ağırlık kaybı göstermiştir. Katkı maddesi olarak uçucu kül içeren zeolit bazlı geopolimer numunelerin ıslanma-kurumaya bağlı ağırlık kayıpları, %100 doğal zeolit içeren numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Geopolimer karışımında kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça ıslanma-kurumaya bağlı ağırlık kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, ağırlık kaybı değeri %5.05 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, en düşük ağırlık kaybı değeri %3.25 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.8. İslanma-kuruma çevrimlerden sonra ağırlık kayıpları

Numune kodu	Önceki ağırlık (gr)	Sonraki Ağırlık (gr)	Ağırlık kaybı (%)
UK0LS0DZ100	461.8	426.2	7.71
UK10DZ90	486.7	462.1	5.05
UK20DZ80	499.8	478.1	4.34
UK30DZ70	503.9	483.5	4.05
UK40DZ60	508.2	490.1	3.56
UK50DZ50	513.5	496.8	3.25
LS10DZ90	483.2	453.2	6.21
LS20DZ80	489.4	462.1	5.58
LS30DZ70	498.1	472.6	5.12
LS40DZ60	505.4	481.8	4.67
LS50DZ50	511.4	489.9	4.20
UK10LS10DZ80	508	492.2	5.81
UK15LS15DZ70	509.8	493.1	5.22
UK20LS20DZ60	513.5	496.1	4.89
UK25LS25DZ50	518.2	499.6	4.38
UK30LS30DZ40	524.1	503.4	3.95

Katkı maddesi olarak toz kalker kullanılan geopolimer harç numuneleri için, ıslanma-kurumaya bağlı ağırlık kayıpları %100 doğal zeolit içeren geopolimer numunelerinden daha küçük çıkmıştır ama uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer numunelerinden biraz daha büyük çıkmıştır. Geopolimer karışımında kullanılan toz kalker miktarı arttıkça ıslanma-kurumaya bağlı ağırlık kayıpları azalma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında, ağırlık kaybı değeri %6.21 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında ise, ağırlık kaybı değeri %4.20 olarak bulunmuştur.

Katkı maddesi olarak uçucu kül-toz kalker kullanılan geopolimer harç numuneleri için, ıslanma-kurumaya bağlı ağırlık kayıpları hem %100 doğal zeolit içeren geopolimer numunelerinden hem de kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer numunelerinden daha küçük çıkmıştır ama uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer numunelerinden daha yüksek çıkmıştır. Geopolimer karışımında kullanılan uçucu kül-toz kalker miktarı arttıkça ağırlık kayıpları azaltma göstermiştir. Örneğin, doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker birlikte kullanıldığında, ağırlık kaybı değeri %5.81 gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül %30 toz kalker kullanıldığında ise, ağırlık kaybı değeri %3.95 olarak bulunmuştur. Şekil 4.22, geopolimer harç numunelerin ıslanma-kuruma etkisinden kaynaklanan ağırlık kaybı değerlerini göstermektedir



Şekil 4.22. İslanma-kuruma etkisindeki geopolimer harçların ağırlık kayıpları

4.5.2.2. Geopolimerlerin ıslanma-kuruma etkisinde dayanım kaybı değerlendirilmesi

İslanma-kuruma çevrimleri sonrası eğilme dayanımı kayıpları sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerinin ıslanma-kuruma çevrimlerinden kaynaklanan eğilme dayanımı kaybı değeri %100 bulunmuştur çünkü numune kırılmıştır. Uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri için, eğilme dayanımı kaybı %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, eğilme dayanımı kaybı değeri %59.7 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, eğilme dayanımı kaybı değeri düşmüş ve %50.6 olarak bulunmuştur.

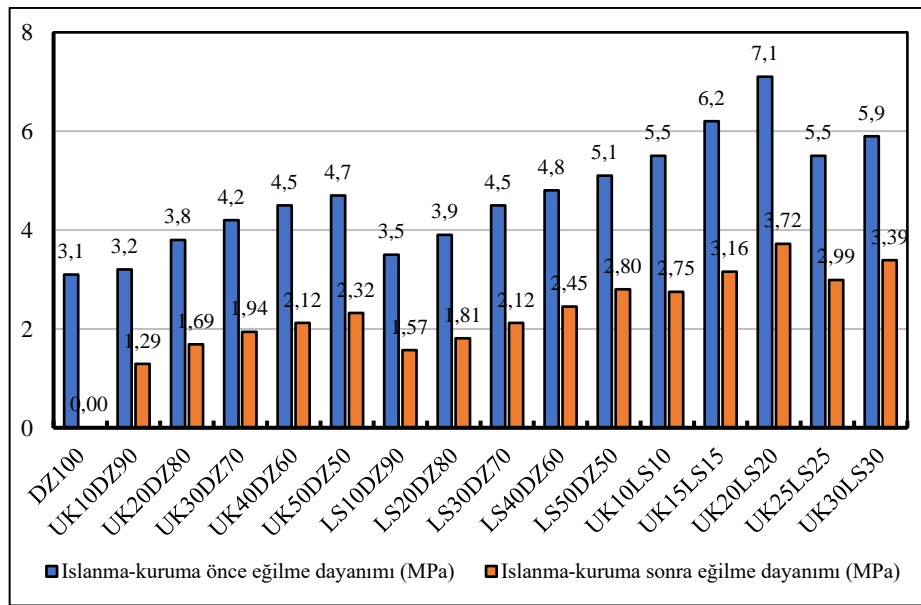
Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri için, eğilme dayanımı kaybı hem %100 doğal zeolit içeren numunelerinden hem de uçucu kül katkılı zeolit bazlı numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı kaybı değeri %55.1 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, eğilme dayanımı kaybı değeri düşmüş ve %45.1 olarak bulunmuştur. Uçucu kül-toz kalker- katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneler için, eğilme dayanımı kaybı hem %100 doğal zeolit içeren numunelerinden hem de uçucu kül katkılı ve kalker katkılı zeolit bazlı numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanıldığında, eğilme dayanımı kaybı değeri

%50 gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında ise, eğilme dayanımı kaybı değeri düşmüş ve %42.5 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.9. İslanma-kuruma çevrimlerden sonra eğilme dayanımı kayıpları

Numune kodu	İslanma-kuruma testi öncesi eğilme dayanımı (MPa)	İslanma-kuruma testi sonrası eğilme dayanımı (MPa)	Eğilme dayanımı kaybı (%)
UK0LS0DZ100	3.1	0.00	100.0
UK10DZ90	3.2	1.49	59.7
UK20DZ80	3.8	1.69	55.5
UK30DZ70	4.2	1.78	53.8
UK40DZ60	4.5	1.90	52.9
UK50DZ50	4.7	2.22	50.6
LS10DZ90	3.5	1.57	55.1
LS20DZ80	3.9	1.81	53.6
LS30DZ70	4.5	2.12	52.9
LS40DZ60	4.8	2.45	49.0
LS50DZ50	5.1	2.80	45.1
UK10LS10DZ80	5.5	3.04	50.0
UK15LS15DZ70	6.2	3.16	49.0
UK20LS20DZ60	7.1	3.72	47.6
UK25LS25DZ50	5.5	2.70	45.6
UK30LS30DZ40	5.9	2.80	42.5

Şekil 4.23, ıslanma-kuruma çevrimleri uygulamadan önce geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımlarını ve ıslanma-kuruma çevrimleri uyguladıktan sonra geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.23. Geopolimer harçların 12 ıslanma-kuruma çevrim sonrasındaki eğilme dayanımı kayıpları

Islanma-kuruma çevrimleri sonra basınç dayanımı kayıpları sonuçlar Çizelge 4.10'da verilmiştir. Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı, geopolimer harçların eğilme dayanımının davranış şekliyle aynı eğilimde olduğu görülmüştür.

%100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin ıslanma-kuruma çevrimlerinden kaynaklanan basınç dayanımı kaybı değeri %62.7 çıkmıştır. Uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri için, basınç dayanımı kaybı %100 zeolit içeren numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Doğal zeolit yerine %10 uçucu kül kullanıldığında, basınç dayanımı kaybı değeri %52.7 gösterirken, zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, basınç dayanımı kaybı değeri düşmüş ve %48.0 çıkmıştır.

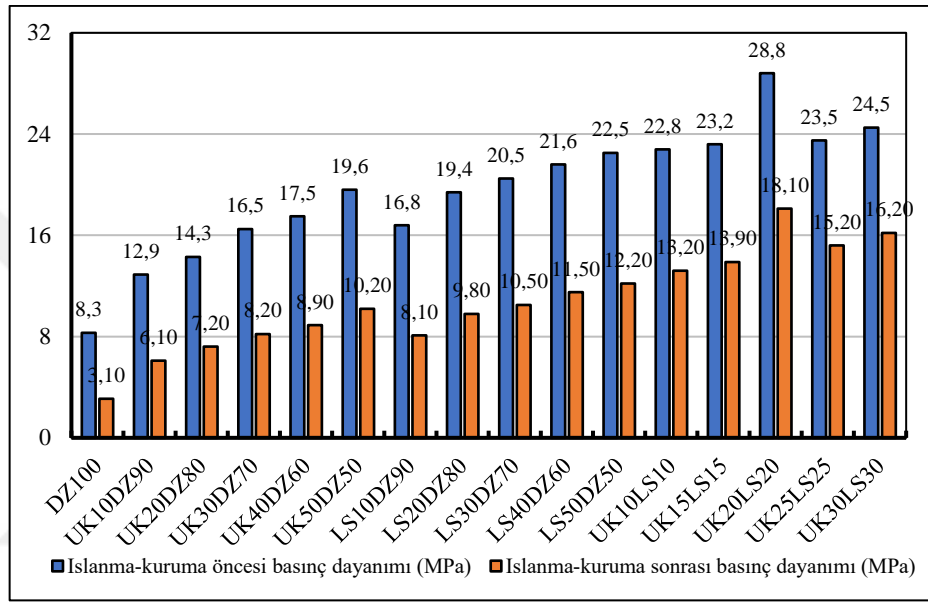
Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri için, basınç dayanımı kaybı hem %100 doğal zeolit içeren numunelerinden hem de uçucu kül katkılı zeolit bazlı numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Geopolimer üretiminde kullanan doğal zeolit yerine %10 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı kaybı değeri %51.8 gösterirken, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında ise, basınç dayanımı kaybı değeri düşmüş ve %45.8 olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.10. Islanma-kuruma çevrimlerden sonra basınç dayanımı kayıpları

Numune kodu	Islanma-kuruma testi öncesi basınç dayanımı (MPa)	Islanma-kuruma testi sonrası basınç dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı kaybı (%)
UK0LS0DZ100	8.3	3.10	62.7
UK10DZ90	12.9	6.10	52.7
UK20DZ80	14.3	7.20	49.7
UK30DZ70	16.5	8.20	50.3
UK40DZ60	17.5	8.90	49.1
UK50DZ50	19.6	10.20	48.0
LS10DZ90	16.8	8.10	51.8
LS20DZ80	19.4	9.80	49.5
LS30DZ70	20.5	10.50	48.8
LS40DZ60	21.6	11.50	46.8
LS50DZ50	22.5	12.20	45.8
UK10LS10DZ80	22.8	13.20	42.1
UK15LS15DZ70	23.2	13.90	40.1
UK20LS20DZ60	26.8	16.80	37.3
UK25LS25DZ50	23.5	15.20	35.3
UK30LS30DZ40	24.5	16.20	33.9

Uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneler için, basınç dayanımı kaybı hem %100 doğal zeolit içeren numunelerinden hem de uçucu kül katkılı

ve toz kalker katkılı zeolit bazlı numunelerinden daha küçük çıkmıştır. Doğal zeolit yerine %10 uçucu kül ve %10 toz kalker kullanıldığında, basınç dayanımı kaybı değeri %42.1 gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker kullanıldığında ise, basınç dayanımı kaybı değeri düşmüş ve %33.9 olarak bulunmuştur. Şekil 4.24, ıslanma-kuruma çevrimleri uygulamadan önce geopolimer harçların basınç dayanımlarını ve ıslanma-kuruma çevrimleri uyguladıktan sonra geopolimer harçların basınç dayanım değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.24. Geopolimer harçların 12 ıslanma-kuruma çevrim sonrasındaki basınç dayanımı kayıpları

4.5.3. Sülfat etkisi deney sonuçları

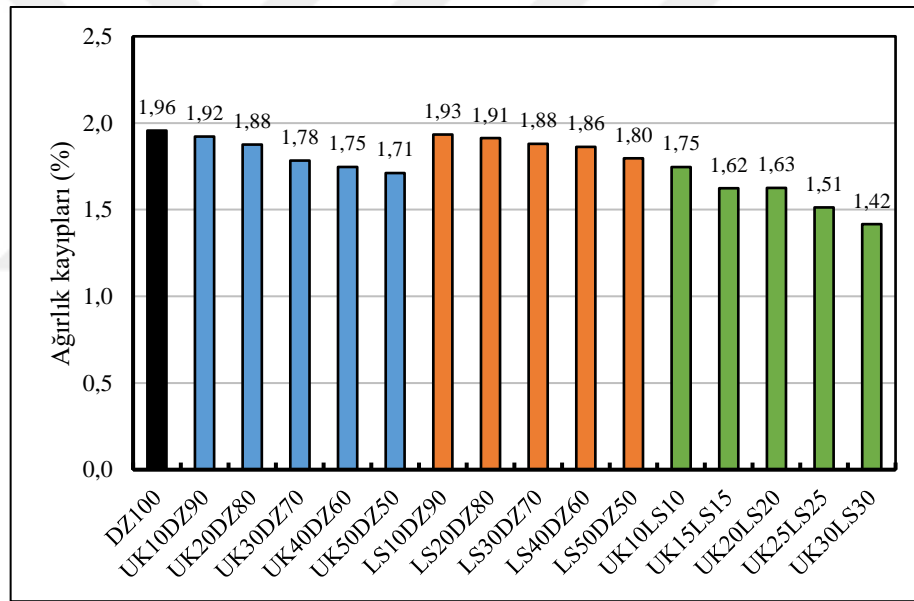
Üretilen uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri %5 magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltilerde 2 ay bekletilmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisi ayda bir kere yenilenecek değiştirilmiştir. Numuneleri çözeltilerden çıkarıldıktan sonra, 40 °C sıcaklıkta kurutulmuştur. Daha sonra, numunelerin ağırlık ve basınç dayanımları değişimlerini belirlenmiştir.

4.5.3.1. Geopolimerlerin sülfat etkisinde ağırlık kaybı değerlendirilmesi

Şekil 4.25, geopolimer harç numunelerin sülfat etkisinden kaynaklanan ağırlık artışı değerlerini göstermektedir. Üretilen numunelerin 2 ay sonra magnezyum sülfat

etkisinden kaynaklanan ağırlık artışları %1.96 ile %1.42 arasında olduğu bulunmuştur. %100 doğal zeolit içeren numuneleri en yüksek (%1.96) ağırlık artışı gösterirken, %30 uçucu kül ve %30 toz kalker birlikte içeren zeolit bazlı numuneler ise, en düşük (%1.42) ağırlık artışı göstermiştir. Zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin kullanılan uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker miktarları arttıkça, ağırlık artışı azaltmaktadır.

Geopolimer harç numunelerin sülfat etkisinde ağırlık artışlarının %2'nin altında bulunmuş ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri diğer numunelere göre düşük ağırlık artışları elde edilmiştir. Thokchom ve ark, (2010) yaptıkları çalışmalarda, sülfat etkisinde ağırlık artışlarının geopolimer yüzeylerindeki boşlukları dolduran pul halindeki beyaz tortulardan, ağırlık azalmalarının ise; geopolimerden çözeltiye alkalilerin geçişinden kaynaklandığını belirtmiş ve sülfat etkisinde ağırlık artışının küçük değerlerde (%0.41-1.98) kaldığını bulunmuştur.



Şekil 4.25. Magnezyum sülfat etkisiyle geopolimer harçların oluşan ağırlık artışları

4.5.3.2. Geopolimerlerin sülfat etkisinde dayanım kaybı değerlendirilmesi

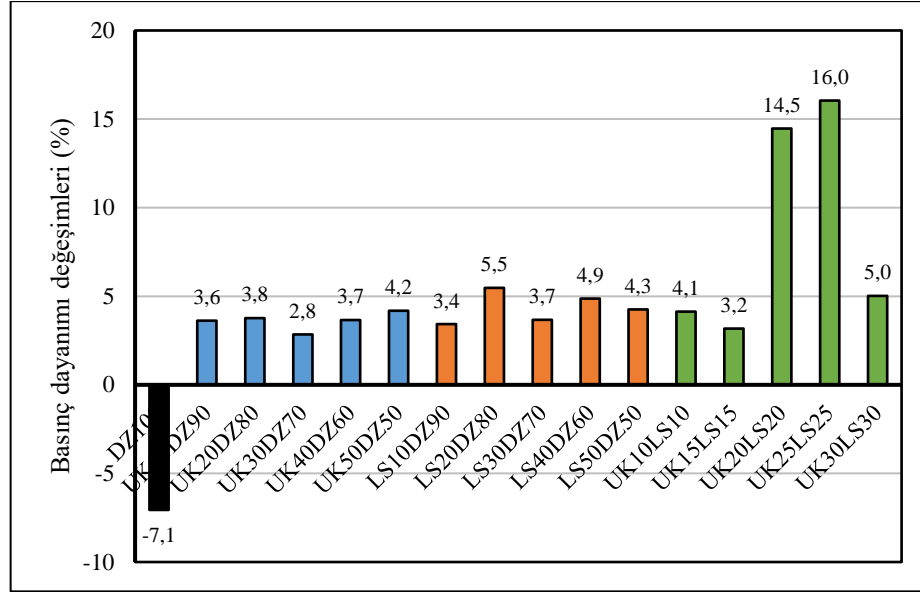
Magnezyum sülfat etkisi sonuçlarına göre 2 aylık süreçte basınç dayanımlarında dalgalanmalar görülmüştür. Geopolimerizasyon reaksiyonu, sülfat etkisine maruz kalma süresi ile devam etmiş, bu nedenle basınç dayanımında artış olmuştur. Sülfat etkisinden sonra hesaplanan basınç dayanımı 90 gün elde edilen basınç dayanımı sonuçları karşılaştırılmıştır. Magnezyum sülfat etkisinden sonra basınç dayanımı değişim sonuçları Çizelge 4.11'de verilmiştir.

%100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerde basınç dayanımı düşerken, diğer uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zaolit bazlı numunelerde basınç dayanımında bir artış görülmüştür. %100 doğal zeolit içeren numunelerde basınç dayanımı %7.1 azalma görülmüştür. Katkı maddeleri kullanıldığında ise, basınç dayanımı artış göstermiştir. Örneğin; doğal zeolit yerine %25 uçucu kül ve %25 toz kalker birlikte katkı maddesi olarak kullanılması durumunda, sülfat etkisinden kaynaklanan basınç dayanımı artışı %16 ile en yüksek olmuştur. Şekil 4.26'da, geopolimer harçların magnezyum sülfat etkisinden kaynaklanan dayanım değişimleri görülmektedir.

Çizelge 4.11. Magnezyum sülfat etkisinden sonra basınç dayanımı değişimleri

Numune kodu	Sülfat etkisi öncesi basınç dayanımı (MPa)	Sülfat etkisi sonrası basınç dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı değişimi (%)
UK0LS0DZ100	8.5	7.9	-7.1
UK10DZ90	13.8	14.3	3.6
UK20DZ80	15.9	16.5	3.8
UK30DZ70	17.6	18.1	2.8
UK40DZ60	19.1	19.8	3.7
UK50DZ50	21.5	22.4	4.2
LS10DZ90	17.5	18.1	3.4
LS20DZ80	20.1	21.2	5.5
LS30DZ70	21.8	22.6	3.7
LS40DZ60	22.6	23.7	4.9
LS50DZ50	23.5	24.5	4.3
LS10UK10DZ80	24.2	25.2	4.1
LS15UK15DZ70	25.2	26.0	3.2
LS20UK20DZ60	31.8	36.4	14.5
LS25UK25DZ50	26.8	31.1	16.0
LS30UK30DZ40	25.9	27.2	5.0

Geopolimerlerde dayanım kayıpları literatürde bahsedildiği gibi geopolimerlerden sülfat çözeltisi alkali geçmesi sonucu geopolimerler yapısının bozulmasından, dayanım artışları ise geopolimerler ve çözelti arasındaki reaksiyon sonuçları oluşan ve daha sonra sertleşerek geopolimerdeki boşlukları dolduran tortulardan kaynaklanmaktadır (Bakharev, 2005b; Thokchom ve ark., 2010). Başka bir nedeni şudur: geopolimerizasyon reaksiyonu, sülfata maruz kalma süresi ile devam etmiş, bu durumdan dolayı basınç dayanımı artışı olmuştur.



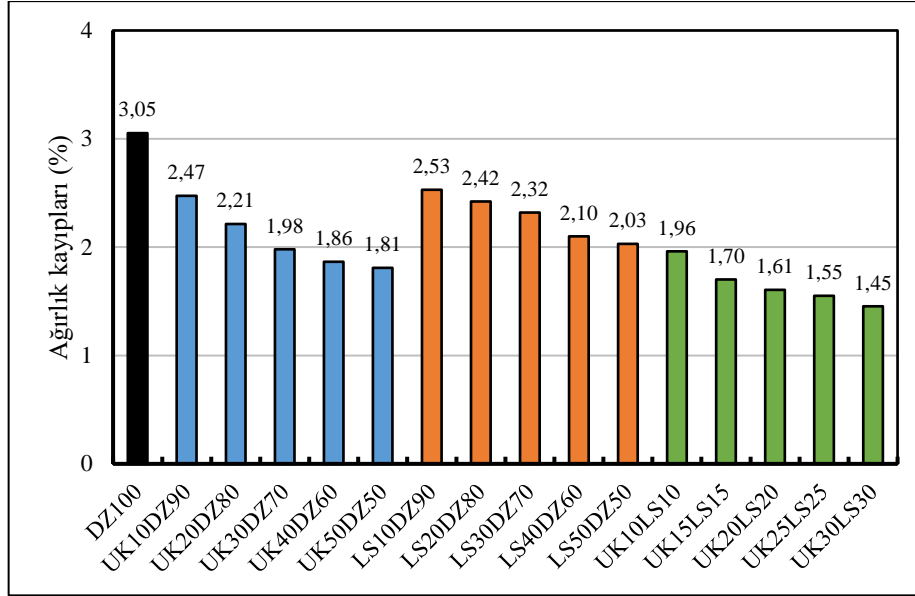
Şekil 4.26. Magnezyum sülfat etkisiyle geopolimer harçların oluşan basınç dayanımı değişimleri

4.5.4. Asit etkisi deney sonuçları

Üretilen uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkıli zeolit bazlı geopolimer harç numuneler, 28 gün kür edildikten sonra %2.5 sülfürik asit (H_2SO_4) çözeltilerinde 6 hafta bekletilmiştir. Numuneler asit çözeltilerden çıkarıldıktan sonra, 40°C sıcaklıkta kurutulmuştur. Daha sonra, geopolimer harç numunelerin ağırlık kayıpları ve basınç dayanımları değişimleri belirlenmiştir.

4.5.4.1. Geopolimerlerin asit etkisinde ağırlık kaybı değerlendirilmesi

Şekil 4.27, geopolimer harç numunelerin asit etkisinden kaynaklanan ağırlık kayıpları göstermektedir. Üretilen geopolimer harç numuneler yapısında bulunan alkalilerin bozularak asit çözeltilerine geçmesi ile 6 haftalık ağırlık kaybı %3.05 ila %1.45 arasında olmuştur. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numuneleri en yüksek (%3.05) ağırlık kaybı göstermiştir. Kullanan uçucu kül veya toz kalker miktarları arttıkça, asit etkisinden kaynaklanan ağırlık kayıpları azaltmıştır. Örneğin; %50 uçucu kül kullanılan numunelerde, ağırlık kaybı %1.81 olmuştur. %50 toz kalker kullanılan numunelerde ise, ağırlık kaybı %1.96 olarak bulunmuştur. %30 uçucu kül ve %30 toz kalker birlikte kullanılması ise, en düşük ağırlık kaybı (%1.45) gerçekleşmiştir.



Şekil 4.27. Sülfürik asit etkisiyle geopolimer harçların oluşan ağırlık kayıpları

4.5.4.2. Geopolimerlerin asit etkisinde dayanım kaybı değerlendirilmesi

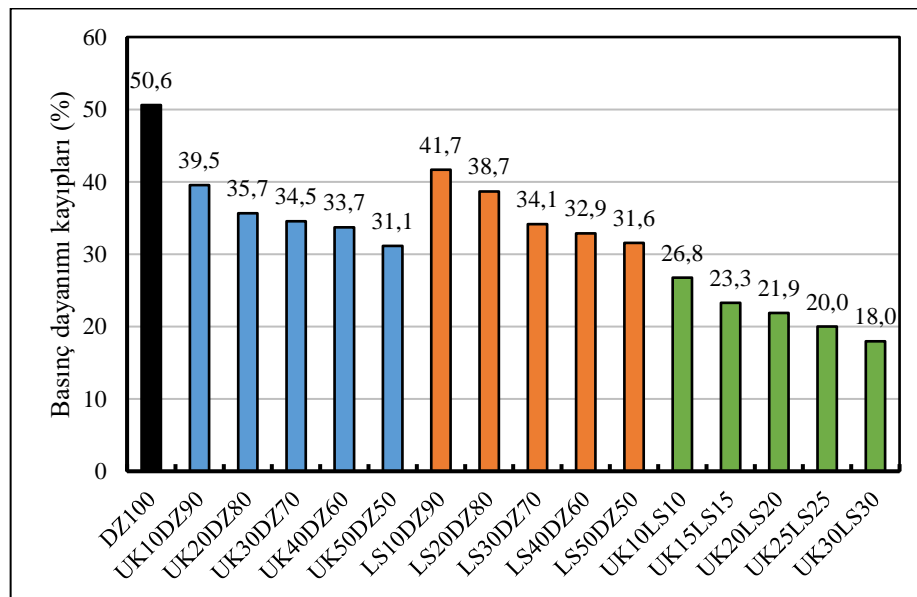
Sülfürik asit (H_2SO_4) içerisinde yerleştirilen geopolimer harç numunelerinin basınç dayanım kayıpları 6 hafta sonra hesaplanmıştır. Sülfürik asit etkisinden sonra hesaplanan basınç dayanımı 28 günlük elde edilen basınç dayanımı sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 6 hafta sonunda geopolimer harç numunelerde sülfürik asit etkisi altında basınç dayanımı kaybı oranları %50.6 ile %18 arasında olmuştur.

Sülfürik asit etkisinden sonra basınç dayanımı kayıpları sonuçlarını Çizelge 4.12'de verilmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numuneleri en yüksek (%50.6) basınç dayanımı kaybı göstermiştir. Katkı maddeleri kullanılan miktarları arttıkça, asit etkisinden kaynaklanan basınç dayanımı kayıpları azaltmıştır. Örneğin; %50 uçucu kül kullanılması, basınç dayanımı kayıp değeri %31.1 çıkmıştır. %50 toz kalker kullanılması, basınç dayanımı kayıp değeri %31.6 olarak bulunmuştur. %30 uçucu kül ve %30 toz kalker birlikte kullanılması ise, en düşük basınç dayanımı kayıp değeri (%18) olarak bulunmuştur.

Çizelge 4.12. Sülfürik asit etkisinden sonra basınç dayanımı kayıpları

Numune kodu	Asit etkisi öncesi basınç dayanımı (MPa)	Asit etkisi sonrası basınç dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı kaybı (%)
UK0LS0DZ100	8.3	4.1	50.6
UK10DZ90	12.9	7.8	39.5
UK20DZ80	14.3	9.2	35.7
UK30DZ70	16.5	10.8	34.5
UK40DZ60	17.5	11.6	33.7
UK50DZ50	19.6	13.5	31.1
LS10DZ90	16.8	9.8	41.7
LS20DZ80	19.4	11.9	38.7
LS30DZ70	20.5	13.5	34.1
LS40DZ60	21.6	14.5	32.9
LS50DZ50	22.5	15.4	31.6
LS10UK10DZ80	22.8	16.7	26.8
LS15UK15DZ70	23.2	17.8	23.3
LS20UK20DZ60	28.8	22.5	21.9
LS25UK25DZ50	23.5	18.8	20.0
LS30UK30DZ40	24.5	20.1	18.0

Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numuneleri asit saldırısı nedeniyle alkalilerin çözeltiliye geçmesi ile geopolimer yapısının bozulmuş ve basınç dayanımların düşüşü neden olmuştur. Ayrıca, basınç dayanımdaki kaybı, sülfürik aside yüksek maruziyette geopolimerlerin alümina-silikat bağlarının bozulmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.28’de, geopolimer harç numunelerin sülfürik asit etkisinden kaynaklanan basınç dayanımı kayıpları göstermektedir.

**Şekil 4.28.** Sülfürik asit etkisiyle geopolimer numunelerin oluşan basınç dayanımı kayıpları

4.6. Mikroyapı Analizleri

SEM-EDS analizleri, geopolimer hamurlarının faz karakterizasyonu ve mikroyapısal evrimini sergilemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. En yüksek ve en düşük dayanım değerlerine sahip geopolimer hamurları analiz edilmiştir. Ayrıca, magnezyum sülfat ve sülfürik asit saldırılarına uygulanan geopolimer harçların SEM-EDS vasıtasıyla analiz edilmiştir.

4.6.1. SEM ve EDS analizleri

Geopolimer karışımların SEM görüntüleri ve EDS spektroskopileri sonuçları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Genel bir gözlem olarak, incelenen numunelerin SEM görüntüleri tatmin edici derecede kompaktlık ve geopolimerik matris bileşenleri arasında iyi bir mikroyapısal bağlanma olduğunu göstermektedir. SEM görüntüleri bazı reaksiyona girmemiş parçacıkları gözlenmiştir, tepkilenmemiş parçacıkların varlığı iyi bir mukavemet davranışının bir göstergesidir, çünkü bu parçacıklar üretilen numunelerin yapıştırma deseninde olumlu yönde etkileyecektir (Sung ve ark., 2015).

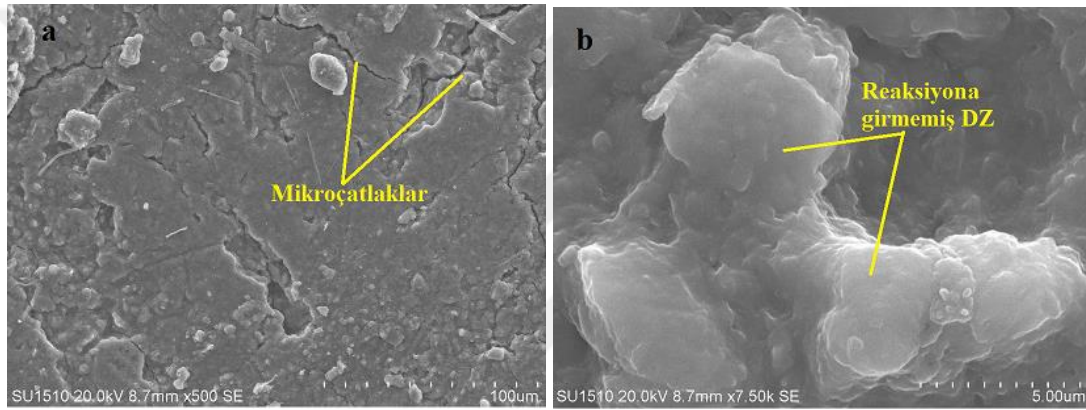
%100 doğal zeolit içeren geopolimer hamurlarının genel mikroyapısal özellikleri Şekil 4.29'da gösterilmiştir. SEM görüntülerinden de görülebileceği üzere, incelenen geopolimer hamurunda bazı reaksiyona girmemiş doğal zeolit parçacıkları bulunmaktadır. Geopolimer karışımlarında oluşan bazı mikro çatlaklar da vardır ve bazı gözeneklilikler emilebilmektedir.

Şekil 4.30'da, uçucu kül ve doğal zeolit içeren geopolimer hamurların SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.30 a ve Şekil 4.30 b sırasıyla UK10DZ90 ve UK50DZ50 geopolimer hamurların SEM görüntülerini göstermektedir. Uçucu kül katkılı zeolit bazlı geopolimer hamurların %100DZ içeren geopolimer hamurlarından daha küçük mikro çatlaklara ve daha yoğun bir mikroyapıya sahip olduğunu gözlenmiştir. SEM görüntülerinden görülebileceği gibi, geopolimer hamurunda reaksiyona girmemiş zeolit parçacıkları azalmıştır.

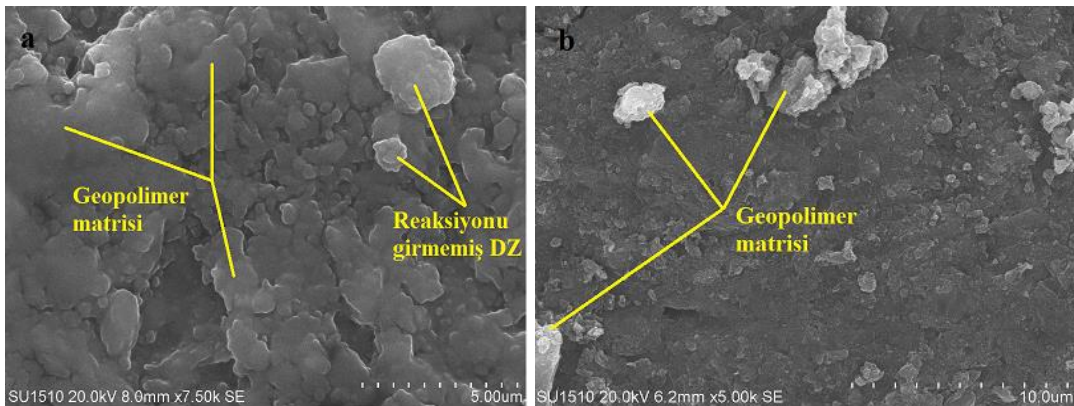
Şekil 4.31'de, toz kalker ve doğal zeolit içeren geopolimer hamurların SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.31 a ve Şekil 4.31 b sırasıyla LS10DZ90 ve LS50DZ50 geopolimer hamurların SEM görüntülerini göstermektedir. Kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer hamurların SEM görüntüleri, DZ100, UK10DZ90 ve UK50DZ50 geopolimer hamurlarından daha küçük mikro çatlaklara ve daha yoğun bir mikroyapıya

sahip olduğunu görülmektedir. Malzemeyi oldukça kompakt mikroyapı ile bırakan SEM görüntülerinde, aralarında neredeyse hiç arayüzey alan olmayan çok sayıda ağ geopolimer ürünü görülmektedir.

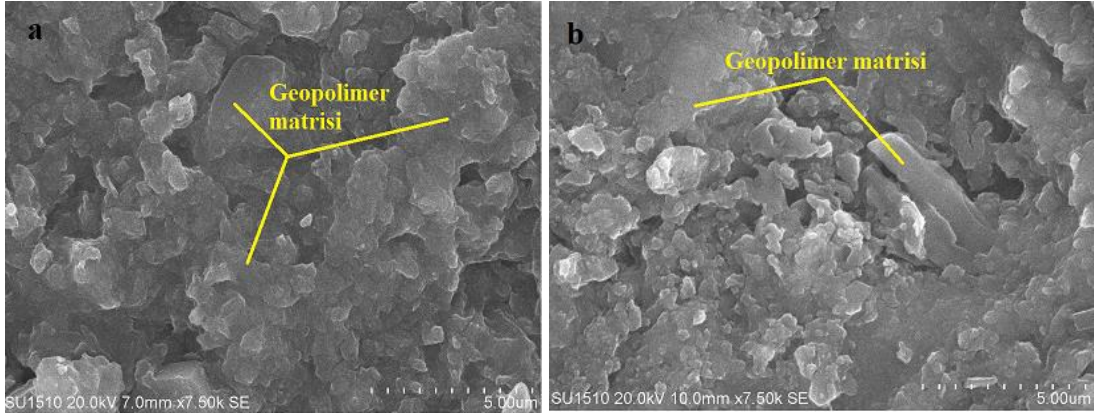
Şekil 4.32’de, uçucu kül, toz kalker ve doğal zeolit içeren geopolimer hamurların SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.32 a ve 4.32 b sırasıyla UK20LS20DZ60 ve UK30LS30DZ40 geopolimer harç numunelerin SEM görüntülerini göstermektedir. Doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalker içeren geopolimer harç numuneleri iyi bir kompaktlık, yoğun bir matris ve çok az gözeneklilik göstermiştir. SEM görüntülerine göre, uçucu kül ve toz kalkerin birlikte kullanılması, zeolit bazlı geopolimer harçların mikro yapısını iyileştirir.



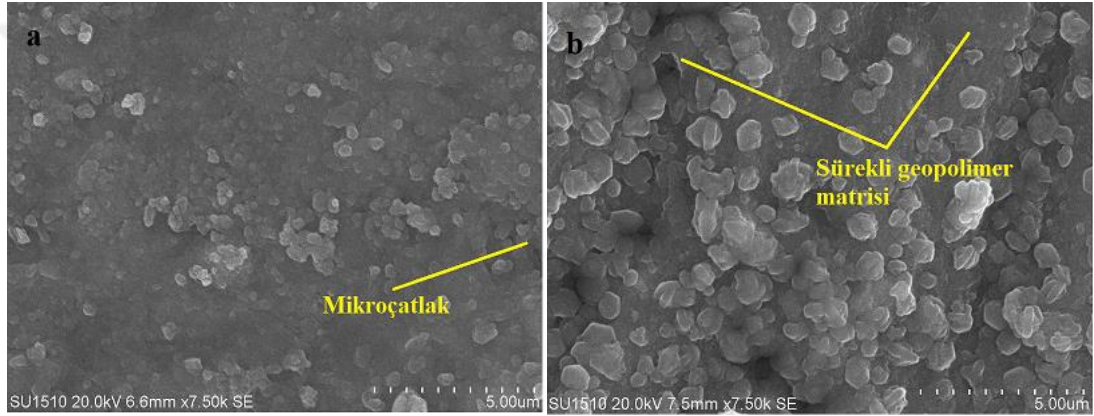
Şekil 4.29. %100 doğal zeolit içeren numuneler için SEM görüntüleri: a)500x b)7500x büyütülmüş



Şekil 4.30. (a) UK10DZ90 numuneler için SEM görüntüleri: 7500x büyütülmüş (b) UK50DZ50 numuneler için SEM görüntüleri: 5000x büyütülmüş



Şekil 4.31. (a) LS10DZ90 numuneler için SEM görüntüleri: 7500x büyütülmüş (b) LS50DZ50 numuneler için SEM görüntüleri: 7500x büyütülmüş

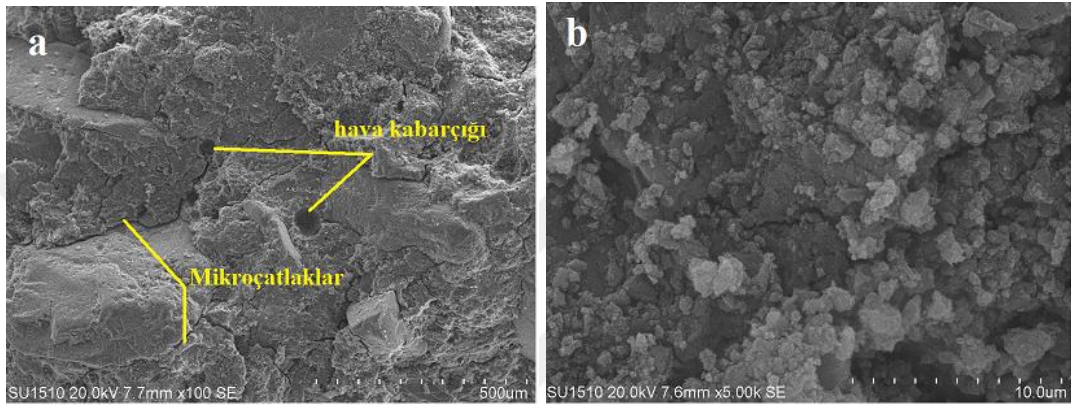


Şekil 4.32. (a) UK20LS20DZ60 (b) UK30LS30DZ40 numuneler için SEM görüntüleri: 7500x büyütülmüş

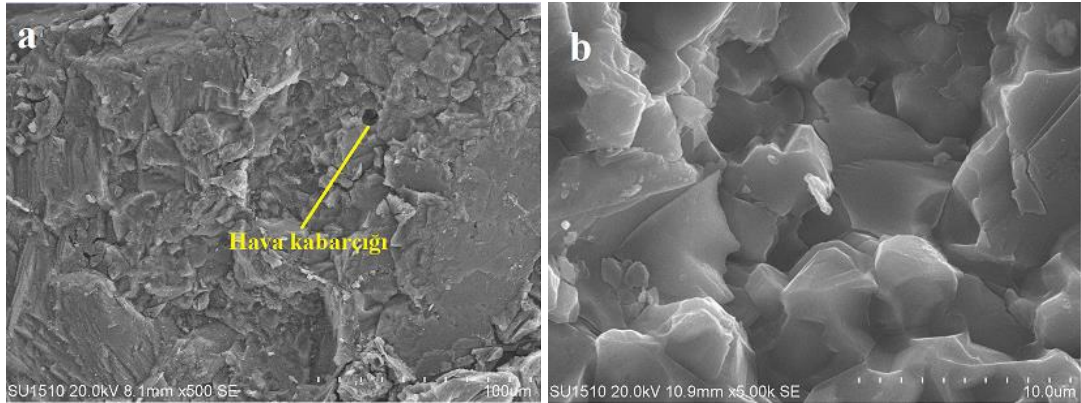
Magnezyum sülfat saldırısından sonra UK20LS20DZ60 ve UK30LS30DZ40 geopolimer harç numunelerinde 2 aylık sürede meydana gelen mikroyapısal değişiklikler sırasıyla Şekil 4.33 ve Şekil 4.34’de gösterilmiştir.

SEM görüntülerine göre, geopolimer harç numunelerin mikroyapısı, magnezyum sülfata maruz bırakıldıktan sonra korunmuştur. Geopolimerik malzemelerin sülfatlara karşı gösterdiği mükemmel direnç ve daha kararlı bağlı alüminasilikat yapısına sahip olmasına atfedilmektedir. Aralarında neredeyse hiç arayüzey alan olmayan çok sayıda ağ geopolimer ürünü, malzemeyi güçlü kompakt mikroyapı ile bırakan magnezyum sülfat saldırısından sonra SEM görüntülerinden görülmektedir. Geopolimer harç numunelerinin mikro yapısındaki görülen mikroçatlaklar, eğilme ve basınç dayanım testlerine uygulandıktan sonra oluşturulmuştur. Ayrıca, sülfat etkisinde kuarts pik yegınlıklarının yükseldiği görülmüştür. Bu durum, çözeltideki sülfat iyonlarının geopolimer

numunelerin iç kısmına gerip geopolimerzasyon reaksiyonunda yer alarak kristiller üretmesiyle ilgilidir. Ayrıca, geopolimer harç numunelerin parlaklıklarını kaybettiği belirgin bir şekilde gözlenmiştir. Buradan geopolimer harç numunelerin yapılarında bazı kimyasal değişiklikler olduğu düşünülmektedir. Bu yapı nedeniyle sülfat çözeltisinde bekletilen geopolimer harç numunelerin dayanımı artmaktadır. Bu deney sonuçları, geopolimer harç numunelerinin magnezyum sülfat etkisinde 2 aylık sürede neden daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu açıklamak için kullanılabilir.



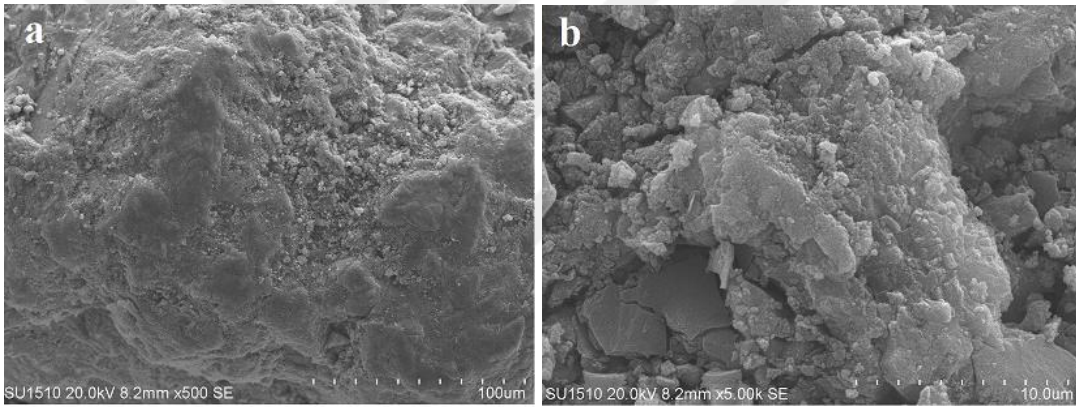
Şekil 4.33. UK20LS20DZ60 numunelerde magnezyum sülfat etkisi sonucu için SEM görüntüleri: (a) 100x büyütülmüş (b)5000x büyütülmüş



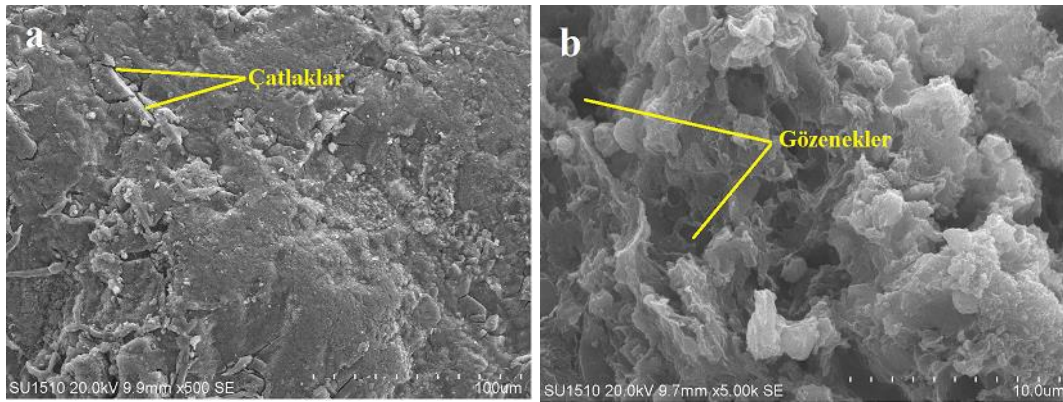
Şekil 4.34. UK30LS30DZ40 numunelerde magnezyum sülfat etkisi sonucu için SEM görüntüleri: (a) 500x büyütülmüş (b)5000x büyütülmüş

Sülfürik asit saldırısından sonra UK20LS20DZ60 ve UK30LS30DZ40 geopolimer harç numunelerinde 6 haftalık sürede meydana gelen mikroyapısal değişiklikler sırasıyla Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Sülfürik asit etkisine maruz kaldıktan sonra geopolimer harç numunelerin SEM mikroyapısı, esas olarak geopolimer jelin alüminasilikat (Si-O-Al) bağlarının asit tarafından bozulması nedeniyle mikro çatlakların

oluşturduğunu gözeneklidir. Mikroyapıdaki bu bozulmaların nedeni sülfürik asit ortamda polimerlerin parçalanması ile büyük dayanım kayıpları ve kırılmalı bir yapının oluşmasıdır. Literatür çalışmalarında alüminosilikat oluşan geopolimer yapısı üzerinde asitlerin etkileri sonucu geopolimer yapısında görev alan sodyum ve potasyum gibi alkalilerin asit çözeltisi içindeki hidrojenlerle yer değiştirdiği ve bunun sonucunda geopolimer yapısının bozularak silisik asit ve alüminyum iyonlarına ayrıştığı belirtilmektedir (Bakharev, 2005a). SEM görüntülerinde bozulmuş parçacıkları, geopolimer matrisi asit çözeltisinde çözülmesiyle açıklanabilir. Sülfürik asit çözeltilerine maruz kalan geopolimer harç numuneleri çok gözenekli ve kırılmalı hale gelmişlerdir. SEM görüntüleri, geopolimer harç numunelerinin matrisinde bazı yeni kristallerin oluştuğunu ve 6 haftalık maruziyetin ardından bazı amorf yapıların görülebileceğini gözlenmiştir.



Şekil 4.35. UK20LS20DZ60 numunelerde sülfürik asit etkisi sonucu için SEM görüntüleri: (a) 100x büyütülmüş (b)5000x büyütülmüş



Şekil 4.36. UK30LS30DZ40 numunelerde sülfürik asit etkisi sonucu için SEM görüntüleri: (a) 500x büyütülmüş (b)5000x büyütülmüş

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında ilk bölümde doğal zeolit bazlı geopolimer harçların optimum karışım oranlarını belirlenmek için Taguchi deneysel yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, üretilen doğal zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini arttırmak için katkı maddesi olarak C sınıfı uçucu kül, toz kalker ve C sınıfı uçucu kül-toz kalker kullanılmıştır. Çalışmanın üçüncü bölümünde mekanik mukavemet testlerinin sonucu olarak belirlenen parametrelerle dayanıklılık testleri yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların SEM ve EDS analizleri kullanılarak mikro yapı özelliklerini incelenmiştir.

Farklı karışımların kullanılarak üretilen uçucu kül, kalker ve uçucu kül-kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların fiziksel, mekanik, dayanıklılık ve mikro yapı özelliklerine etkilerinin araştırılmıştır. Zeolit bazlı geopolimer harçların üretiminde uçucu kül ve toz kalkerin katkı maddesi olarak kullanılması, üretilen geopolimer harçların işlenebilme özelliklerini arttırmıştır. Aynı zamanda geopolimer harçların mekanik ve dayanıklılık özelliklerini arttırmıştır.

Çalışmadan elde edilen araştırma bulgularından çalışmayla ilgili aşağıdaki değerlendirmelere ulaşılmıştır,

5.1.1.Taguchi yöntemi sonuçları

- Zeolit bazlı geopolimer harçların optimal karışım oranlarını bulunmak için, Taguchi yöntemi L9(3⁴) ortogonal dizisine göre 4 parametrelili ve 3 seviyeli bir deney tasarımı kurulmuştur. Kullanılan 4 parametre ve 3 seviye şunlardır: bağlayıcı miktarı (450, 500 ve 550), aktivatör/bağlayıcı oranı (0.8, 0.9 ve 1), sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı (1, 1.5 ve 2), ve sodyum hidroksit molariteleri (8 M, 10 M ve 12 M).
- Taguchi yönteminden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 28 günlük basınç dayanımları kullanılarak hesaplanan ortalama S/N değerleri sonuçlarında optimum karışım tasarımı; bağlayıcı miktarın 1. seviyesinde (450gr),

aktivatör/bağlayıcı oranın 2. seviyesinde (0.9), sodyum silikat/sodyum hidroksit oranın 2. seviyesinde (1.5) ve sodyum hidroksit molaritesin 3. seviyesinde (12 M) olarak elde edilmiştir.

- Optimum karışım bulunduktan sonra, doğal zeolitin yerini, C sınıfı uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker farklı yüzdeleri ile değiştirilerek 16 geopolimer harç karışımı üretilmiştir.

5.1.2. Yayılma tablası sonuçları

- Geopolimer harç numunelerin yayılma tablası değerleri 140-190 mm arasında olduğu görülmüştür. Katkı maddesi olarak uçucu kül içeren zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin yayılma tablası değerleri 150-190 mm arasında olduğu görülmüştür. Katkı maddesi olarak toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin yayılma tablası değerleri ise 145-170 mm arasında olduğunu bulunmuştur. Katkı maddesi olarak uçucu kül-toz kalker içeren zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin yayılma tablası değerleri ise 150-185 mm arasında olduğu görülmüştür.
- Geopolimer harçların en düşük (140 mm) yayılma tablası %100 doğal zeolit içeren karışımların elde edilirken, en yüksek (190 mm) yayılma tablası doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında elde edilmiştir.
- Geopolimer harçların üretiminde doğal zeolit yerine uçucu kül ve toz kalkerin katkı maddesi olarak kullanılması, zeolit bazlı geopolimer harçların yayılma tablası testi ile ölçülen daha yüksek işlenebilirliğe neden olmuştur.

5.1.3. Birim ağırlık, özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin birim ağırlık değerleri 1.83-2.03 gr/cm³ arasında olduğunu bulunmuştur. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numuneleri en düşük birim ağırlık (1.83 gr/cm³) sağlarken, %30 uçucu kül ve %30 toz kalker içeren geopolimer harç numuneleri en büyük birim ağırlık (2.03 gr/cm³) sağlanmıştır.
- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların özgül ağırlık değerleri 1.82-2.01 gr/cm³ arasında olduğu görülmüştür.

Katkı maddesi uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker kullanılması, özgül ağırlık değerleri arttırmıştır.

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların su emme değerleri %8.02-5.21 arasında olmuştur. Uçucu külün katkı maddesi olarak kullanılması su emmeyi azaltmış, toz kalkerin katkı maddesi olarak kullanılması ise, su emmede bir miktar artışa neden olmuştur. Uçucu kül-toz kalkerin birlikte katkı maddesi olarak kullanılmasında ise su emme değerleri azalmıştır.
- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların boşluk oranı değerleri ise %10.44-15.36 arasında çıkmıştır. Uçucu kül katkı maddesi olarak kullanılması boşluk oranı değeri azaltmış, toz kalker katkı maddesi olarak kullanılması ise boşluk oranı değeri biraz artış göstermiştir. Uçucu kül-toz kalkerin birlikte katkı maddesi olarak kullanılması ise, boşluk oranını azaltmıştır.

5.1.4. Kapilarite katsayısı sonuçları

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların kapilarite katsayısı değerleri 2.66-4.0 arasında çıkmıştır. Uçucu kül katkı maddesi olarak kullanılması kapilarite katsayısı değerleri 2.66'dan 2.05'e düşmüştür. Toz kalker katkı maddesi olarak kullanılması ise kapilarite katsayısı değerleri 2.66'dan 4.0'e artmıştır. Son olarak, uçucu kül-toz kalker birlikte katkı maddesi olarak kullanılması ise kapilarite katsayısını 2.66'dan 2.47'e azaltmıştır.
- Zeolit bazlı geopolimer harçların en yüksek kapilarite katsayısı değeri (4.0) doğal zeolit yerine %50 toz kalker kullanıldığında kaydedilerken, en düşük kapilarite katsayısı değeri (2.05) doğal zeolit yerine %50 uçucu kül kullanıldığında kaydedilmiştir. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçları ise, 2.66 kapilarite katsayısı değeri sağlamıştır.

5.1.5. Eğilme dayanımı sonuçları

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların 7 günlük eğilme dayanımı değerleri 2.5-6.3 MPa arasında çıkmıştır. 28

günlük eğilme dayanımı değerleri ise, 3.1-7.1 MPa aralığında olmuştur. 90 günlük eğilme dayanımı değerleri ise, 3.3-7.5 MPa arasında olduğu görülmüştür.

- Uçucu kül ve toz kalker miktarları arttıkça zeolit bazlı geopolimer harçların eğilme dayanımı değerleri artmıştır. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en düşük (3.3 MPa) 90 günlük eğilme dayanımı değeri sağlarken, doğal zeolit yerine %20 uçucu kül ve %20 toz kalker birlikte içeren geopolimer harçlar ise, en yüksek (7.5 MPa) 90 günlük eğilme dayanımı değeri sağlanmıştır.

5.1.6. Basınç dayanımı sonuçları

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı bazlı zeolit geopolimer harç numunelerin 7 günlük basınç dayanımı değerleri 7.2-26.5 MPa arasında çıkmıştır. 28 günlük basınç dayanımı değerleri ise 8.3-28.8 MPa arasında çıkmıştır. 90 günlük basınç dayanımı değerleri ise de 8.5-31.8 MPa arasında olduğunu görülmüştür.
- Uçucu kül ve toz kalker miktarları arttıkça zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri artmıştır. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en düşük (8.5 MPa) 90 günlük basınç dayanımı değeri sağlarken, doğal zeolit yerine %20 toz kalker ve %20 uçucu kül birlikte içeren geopolimer harçlar ise en yüksek (31.8 MPa) 90 günlük basınç dayanımı değeri sağlanmıştır.
- Yukarda bahsi geçen sonuçlarına göre uçucu kül ve kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların üretmek için kullanılan doğal zeolit miktarları arttıkça eğilme ve basınç dayanım değerleri azalmıştır. Ayrıca, uçucu kül ve toz kalker doğal zeolit yerine kullanılması, zeolit bazlı geopolimer harçlarının mekanik özelliklerini artmıştır ve geopolimer harçların üzerinde olumlu etkisi olduğunu görülmüştür.

5.1.7. Donma-çözülme sonuçları

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin 50 çevrim donma-çözülme uygulandıktan sonra ağırlık kayıpları %3.33-1.10 arasında çıkmıştır. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en yüksek ağırlık kaybı (%3.33) gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve

%30 toz kalker içeren geopolimer harçlar en düşük ağırlık kaybı (%1.10) göstermiştir.

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin 50 donma-çözülme çevrimleri uygulandıktan sonra 28 günlük basınç dayanımı kayıpları %24.1-7.3 olduğunu görülmüştür. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en yüksek (%24.1) basınç dayanımı kaybı gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker birlikte içeren geopolimer harçlar en düşük (%7.3) basınç dayanımı kaybı göstermiştir.
- Geopolimer harçların üretiminde doğal zeolit yerine uçucu kül ve toz kalker kullanım miktarları arttıkça, zeolit bazlı geopolimer harçların donma-çözülme dayanıklılığı artmıştır.

5.1.8. Islanma-kuruma sonuçları

- Islanma-kuruma döngülerinden sonra geopolimer harçların görsel olarak incelenmiş ve %100 doğal zeolit içeren geopolimer harç numunelerin diğer uçucu kül ve toz kalker içeren numunelerin karşılaştırıldığını büyük parça kayıpları göstermişlerdir.
- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin 12 ıslanma-kuruma sonra ağırlık kayıpları %7.71-3.25 arasında çıkmıştır. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en yüksek ağırlık kaybı (%7.71) gösterirken, doğal zeolit yerine %50 uçucu kül içeren geopolimer harçlar en düşük ağırlık kaybı (%3.25) göstermiştir.
- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harç numunelerin 12 ıslanma-kuruma çevrimleri uygulandıktan sonra basınç dayanımı kayıpları %62.7-33.9 olduğunu görülmüştür. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en yüksek (%62.7) basınç dayanımı kaybı gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker birlikte içeren geopolimer harçlar en düşük (%33.9) basınç dayanımı kaybı göstermiştir.

- Geopolimer harçların üretiminde doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül ve toz kalker miktarları arttıkça, zeolit bazlı geopolimer harçların ıslanma-kuruma dayanıklılığı artmıştır.

5.1.9. Sülfat etkisi sonuçları

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların %5 magnezyum sülfat çözeltilerde 2 ay bekletildikten sonra ağırlık artışı değerleri %1.96-1.42 arasında çıkmıştır. %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en yüksek (%1.96) ağırlık artışı gösterirken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker içeren geopolimer harçlar en düşük (%1.42) ağırlık artışı göstermiştir.
- %5 magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilmiş uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri bir artış gösterirken, %100 zeolit içeren geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri ise düşüş göstermiştir.
- %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en yüksek (%7.1) basınç dayanımı düşüşü sağlarken, doğal zeolit yerine %25 uçucu kül ve %25 toz kalker birlikte içeren geopolimer harçlar en yüksek (%16.0) basınç dayanımı artışı sağlamıştır. Geopolimerizasyon reaksiyonu sülfata maruz kalma süresi ile devam etmiştir, bundan dolayı basınç dayanımı artması neden olmuştur.

5.1.10. Asit etkisi sonuçları

- Uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların %2.5 sülfürik asit çözeltilerde 6 hafta bekletildikten sonra ağırlık kaybı değerleri %3.05-1.45 arasında çıkmıştır. %100 doğal zeolit harçlar en yüksek (%3.05) ağırlık kaybı gösterirken, %30 uçucu kül ve %30 toz kalker içeren harçlar en düşük (%1.45) ağırlık kaybı göstermiştir.
- %2.5 sülfürik asit çözeltisi içerisinde bekletilmiş uçucu kül, toz kalker ve uçucu kül-toz kalker katkılı zeolit bazlı geopolimer harçların basınç dayanımı değerleri düşüş göstermiştir.

- %100 doğal zeolit içeren geopolimer harçlar en yüksek (%50.6) basınç dayanımı düşüş sağlarken, doğal zeolit yerine %30 uçucu kül ve %30 toz kalker birlikte içeren geopolimer harçlar en düşük (%18.0) basınç dayanımı kaybı sağlanmıştır. Geopolimer harç numunelerin asit saldırısı nedeniyle alkalilerin çözeltiliye geçmesi ile geopolimer yapısı bozulmuş, bundan dolayı basınç dayanımlarında düşüşe neden olmuştur.
- Geopolimer harçların üretiminde doğal zeolit yerine kullanılan uçucu kül ve toz kalker miktarları arttıkça, zeolit bazlı geopolimer harçların asit etkisi dayanıklılığı artış göstermiştir.

5.1.11.Mikroyapı analizleri

- SEM analizi kullanılarak geopolimer harçların mikroyapısal incelemesi genellikle yoğun matris kompaktlığı ile iyi bir geopolimerizasyon bağı gösterirken, geopolimer harçların EDS ölçümleri kullanılarak yapılan elemental analiz, orijinal doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalkerine göre daha yüksek bir Si/Al oranının varlığını göstermiştir.
- Sülfat geopolimerizasyon reaksiyonu devam etmesine neden olduğundan dolayı magnezyum sülfat çözeltilisine maruz kalan geopolimer harçların mikro yapıları daha yoğun bir mikro yapı oluşmuştur. Ayrıca, sülfat etkisinden sonra SEM görüntülerini güçlü bir matris geliştiğini görülmüştür.
- Asit geopolimer jelin yıkanmasına neden olduğundan dolayı sülfürik asit çözeltilisine maruz kalan geopolimer harçların mikro yapıları önemli ölçüde bozulmasıyla mikro çatlakları oluşturduğunu gözlenmiştir. Ayrıca, geopolimer harçların asit etkisinden sonra SEM görüntülerini çok zayıf geopolimer matris olduğunu görülmüştür.

5.2. Öneriler

- Yapılan bu tez çalışma neticesinde geopolimer harçların hem mekanik hem de dayanıklılık özellikleri anlamında harçlara katkı yaptığı gözlemlenmiştir. Doğal zeolit daha uygun maliyetli, kolay erişilebilir ve doğal (çevre dostu) olduğundan, geopolimer beton üretmek için uçucu kül ve diğer puzzolanlar için iyi bir alternatif olabilmektedir.
- Bu çalışma kapsamında basınç dayanımı esas alınarak Taguchi deneysel yöntemi kullanılmış ve optimum karışım tasarımı elde edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda dayanıklılık ve maliyet parametreleri gözönüne alınarak optimum tasarımı için Taguchi deneysel yöntemi kullanılabilir.
- İlerideki çalışmalarda uzun süre ile sıcak kür uygulanarak zeolit esaslı geopolimer harçları üretilebilir. Doğal zeolit esaslı geopolimer harçların kimyasal özelliklerine, priz başlangıç ve bitiş sürelerine, aşınma direnci, yüksek yangın dayanımı deneyleri araştırılabilir.
- Doğal zeolit, uçucu kül ve toz kalkerli birlikte içeren geopolimer harçların farklı lifler kullanılarak harçların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri ile ilgili araştırmalar yapılabilir. Böylelikle uçucu kül ve toz kalker katkılı doğal zeolit bazlı geopolimer harçların kullanımının avantaj ve dezavantajları araştırılarak kullanımının yaygınlaştırılması yönünde adımlar atılmış olur.
- Geopolimer harç ve betonların üretiminde genellikle alkali aktivatör olarak çoğu zaman sodyum silikat ve sodyum hidroksit birlikte kullanılmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda diğer alkali aktivatörlerden potasyum silikat ve potasyum hidroksit gibi kullanılarak araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Adak, D. ve Mandal, S. 2019, Strength and durability performance of fly ash-based process-modified geopolymer concrete. *Journal of Material Civil Engineering*, 31(9) 04019174-8.
- Aiken, T.A. Kwasny, J. Sha, W. ve Soutsos, M.N. 2018, Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymer binders to sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Research*, 111: 23–40.
- Akbarnezhad, A. Huan, M. Mesgari, A. ve Castel, A. 2015, Recycling of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 101: 152-158.
- Akyıldız, A. 2012, Beton üretiminde bor atıklarının puzzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Doktora tezi.
- Al-mashhadani, M.M. Canpolat, O. Aygormez, Y. Uysal, M. ve Erdem, S. 2018, Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 167: 505–513.
- Almutairi, A.L. Tayeh, B.A. Adesina, A. Isleem, H.F. ve Zeyad, A.M, 2021, Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15 e00733.
- Alonso, S. ve Palomo, A. 2001, Alkaline activator of metakaolin and calcium hydroxide mixture: Influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Materials Letters*, 47 (1-2); 55-62.
- Amran, Y.H.M. Alyousef, R. Alabduljabbar, H. ve El-Zeadani, M. 2020, Clean production and properties of geopolymer concrete: A review. *Journal of Clean production*, 251; 119679.
- Ariffin, M.A. Hussin, M.W. Samadi, M, Abdul Shukor Lim, N.H, Mirza, J. Awalluddin, D. ve Othman, N. 2015, Effects of ceramic aggregate on high strength multi-blended ash geopolymer mortar. *Journal of Teknologi*, 77: 33-36.
- Ariffin, M.A.M. Bhutta, M.A.R. Hussin, M.W. Mohd Tahir, M. ve Aziah, N. 2013, Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 43: 80–86.
- Aruntaş, H, Y. 2006, Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21: 193-203.
- Assi, L.N. Deaver, E. ElBatanouny, M.K. ve Zeihl, P. 2016, Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 112: 807-815.

- Assi, L.N. Eddie Deaver, E. ve Ziehl, P. 2018, Effect of source and particle size distribution on the mechanical and microstructural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 167: 372–380.
- ASTM C1585-04, 2007, Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes.
- ASTM C666, Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing.
- ASTM D559-96, Standard test methods for wetting and drying compacted soil-cement mixture.
- Auqui, N.U. Baykara, H. Rigail, A. ve Cornejo, M.H. 2017, An investigation of the effect migratory type corrosion inhibitor on mechanical properties of zeolite-based novel geopolymers. *Journal of Molecular Structure*, 1146: 814-820.
- Bakharev, T. 2005a, Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions, *Journal of Cement and Concrete Research*, 35: 1233-1246.
- Bakharev, T. 2005b, Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35: 658–670.
- Baradan Bülent, Yazıcı Halit ve Aydın Serdar 2015, BETON. Altındağ Grafik Matbaacılık, İzmir 2015.
- Bascareric, Z. Komljenovic, M. Miladinovic, Z. Nikolic, V. Marjanovic, N. ve Petrovic, R. 2015, Impact of sodium sulfate solution on mechanical properties and structure of fly ash based geopolymers. *Materials and Structures*, 48(3): 683-697.
- Baykara, H. ve Cornejo, M.H. 2017, Preparation, characterization and reaction kinetics of green cement: Ecuadorian natural mordenite-based geopolymers. *Journal of Materials and Structures*, 50: 188.
- Baykara, H. ve Cornejo, M.H. 2017, Preparation, characterization and reaction kinetics of green cement: Ecuadorian natural mordenite-based geopolymers. *Journal of Materials and Structures*, 50: 188.
- Bilodeau, A. ve Mohan Malhotra. 2000, High-volume fly ash system: Concrete solution for sustainable development. *ACI Structural Journal*, 97: 41-48.
- Blanco Verala, M.T. Martinez Ramirez, S. Erena, I. Gener, M. ve Carnona, P. 2006, Characterization and pozzolanicity of zeolitic rocks from two Cuban deposits. *Applied Clay Science Journal*, 33: 149-159.
- Bondar, D. 2013, Geo-polymer concrete as a new type of sustainable construction materials. *Sustainable Construction Materials and Technology*, 18-21.
- Brake, N.A. Allahdadi, H. ve Adam, F. 2016, Flexural strength and fracture size effects of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 113: 536–543.

- Cioffi, R. Maffucci, L. ve Santoro, L. 2003, Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinite residue. *Resources, Conservation and Recycling*, 40(1); 27-38.
- Crirzen, A. Provis, J.L. Penttala, V. ve Habermethl, C.K. 2014, The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 66: 53-62.
- Cwirzen, A. Provis, J.L. Penttala, V. ve Karin, H.C. 2014, The effect of limestone on sodium hydroxide-activated metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 66: 53-62.
- Cyr, M. ve Pouhet, P. 2016, Carbonation in the pore solution of metakaolin based geopolymers, *Cement and Concrete Research*, 88: 227-235.
- Davidovits, J. 1984, Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process. *Google Patents*, No 4, 472, 199.
- Davidovits, J. 1987, Ancient and modern concretes: What is the real difference? *Concrete International*, 9: 23-28.
- Davidovits, J. 1991, Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37(8): 1633-1656.
- Davidovits, J. 1994, Geopolymers-inorganic polymeric new materials. *Journal of Materials Education*, 16; 91-139.
- Dawczynski, S. Krzywon, R. Gorski, M. Dubinska, W. ve Samoszuk, M. 2017, Geopolymer concrete-applications in civil engineering.
- Deb, P.S. Sarker, P.K. ve Barbhuiya, S. 2016, Sorptivity and acid resistance of ambient-cured geopolymer mortars containing nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, 72: 235–245.
- Detphan, S. ve Chindaprasirt, P. 2009, Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(6): 720-726.
- Duan, P. Yan, C. ve Zhou, W. 2017, A novel water permeable geopolymer with high strength and high permeability coefficient derived from fly ash, slag and metakaolin. *Advanced Powder Technology*, 28: 1430–1434.
- Duxson, P. Fernandez-Jimenez, A. Provis, J. Lukay G. Palomo, A. ve van Deventer, J.S. 2007, Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9): 2917-2933.
- Duxson, P. Provis, J. L. Lukey, G.C. ve Van Deventer, J.S. 2007, The role of inorganic polymer technology in development of green concrete. *Cement and Concrete Research*, 37; 1590-1597.

- Ekinci, E. Türkmen, I. Kantarci, F. ve Karakoç, M.B. 2019, The improvement of mechanical, physical and durability characteristics of volcanic tuff based geopolymer concrete by using nano silica, micro silica and Styrene-Butadiene Latex additives at different ratios. *Construction Building Materials*, 201: 257–267.
- Englert, A. H. ve Rubio, J. 2005, Characterization and environmental application of Chilean natural zeolite. *International journal of mineral process*, 75, 21-29.
- Erdoğan, T, Y. 2015, Beton. Beşince baskı, 2015. Ankara: ODTÜ yayıncılık.
- Ersoy, H, Y. 2001, Kompozit malzeme, Literatür yayıncılık. İstanbul, ISBN 975-8431-47-1.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Palomo, A., 2005, Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 35: 1984–1992.
- Fernandez-Jimenez, A. Palomo, A. ve Criado, M. 2005, Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model. *Cement and Concrete Research*, 35(5): 1204-1209.
- Fernandez-Jimenez, A.M. Palomo, A. ve Lopez-Hombrados, C. 2006, Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, 103: 106-112.
- Fernandez-Jimenez, A.M. ve Palomo, A. 2003, Characterisation of fly ashes: Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 82: 2259-2265.
- Gervais, C., ve Ouki, S.K. 2002, Performance study of cementitious systems containing zeolite and silica fume: effects of four metal nitrates on the setting time, strength and leaching characteristics. *Journal of Hazardous Materials B*93, 187-200.
- Gharzouni, A. Vidal L. Essaidi, N. Joussien, E. ve Rossignol, S. 2016, Recycling of geopolymer waste: Influence on geopolymer formation and mechanical properties. *Material design*, 94: 211-229.
- Görhan, G ve Kürklü, G. 2014, The influence of the NaOH solution on the properties of fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites: Part B*, 58 371-377.
- Hadi, M.N. Farhan, N.A. ve Sheikh, M.N. 2017, Design of geopolymer concrete with GGBFS at ambient curing condition using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 140, 424-431.
- Haneefa, K.M. Santhanam, M. ve Parida, F.C. 2013, Performance characterization of geopolymer composites for hot sodium exposed sacrificial layer in fast breeder reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 265: 542–553.
- Hardijito, D. ve Fung, S.S. 2010, Parametric Study on the Properties of Geopolymer Mortar Incorporating Bottom Ash. *Journal of Concrete Research letters*, 1: 3.

- Hardjito, D. Cheak, C.C. ve Ing, C.H.L. 2008, Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Mortars. *Journal of Modern Applied Science*, 2: 4.
- Hardjito, D. Wallah, S.E. Sumajouy, D.M.J. ve Rangan, B.V. 2004, On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *ACI Material of Journal*, 101: 467-472.
- Hardjito, H. ve Rangan, B. 2005, Development and properties of low calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Research Reoprt GC 1, Faculty of Engineering, Curtin University of Techonology, Australia*.
- Hussien, G.F. Mirza, J. Ismail, M. Ghoshal, S.K. ve Ariffin, M.A.M. 2018, Effects of metakaolin replaced granulated blast furnance slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. *Ain Shams Engineering Journal*, 9: 1557-1566.
- Hussin, M.W. Bhutta, M.A.R. Azreen, M. Ramadhansyah, P.J. ve Mirza, J. 2015, Performance of blended ash geopolymer concrete at elavated temperatures. *Materials and Structures*, 48: 709-720.
- Ismail, I. Bernal, S.A. Provis, J.L. S. Hamdan, S. ve Van Deventer, J.S.J. 2013b, Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structurres*, 46: 361–373.
- Ismail, I. Bernal, S.A. Provis, J.L. San Nicolas, R. Brice, D.G. Kilcullen, A.R. Hamdan, S. ve Van Deventer, J.S.J. 2013a, Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 48: 1187–1201.
- Jo, B.W. Park, S.K. ve Park, M.S. 2007, Strength and hardening characteristics of alkali activated fly ash mortars. *Magazine of Concrete Research*, 59(2): 121-129.
- Karahan, O. 2006, liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri. Çukurova Üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, Doktora tezi, Adana.
- Karim, M.R. Hashim, H. Abdul Razak, H. ve Yusoff, S. 2017, Characterization of palm oil clinker powder for utilization in cement-based applications. *Construction and Building Materials*, 135: 21–29.
- Kong, D.L.Y. Sanjayan, J.G. ve 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.
- Kumar, S. Kumar, R. ve Mehrotra, S.P. 2010, Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of Material Science*, 45: 607–615.
- Li, V.C. Lepech, M. Wang, S. Weimann, M. ve Keoleian, G. 2004a, Development of green engineered cementitious composites for sustainable infrastructure systems. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete technology*, 181-191.

- Lloyd, N.A. ve Rangan, B.V. 2010, Geopolymer concrete with fly ash, 2nd International Conference Sustainability. *Construction and Material Technology*, 1493-1504.
- Luga, E. 2015, Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu geopolimer harçların özellikleri, Doktora Tezi.
- Martinez-Remirez, S. Blanco-Verala, M.T. Erena, I. ve Gener, M. 2006, Pozzolanic reactivity of zeolitic rocks from two different Cuban deposits: Characterization of reaction products. *Journal of Applied Clay Science*, 32: 40-52.
- Mastrucci, A. Marvuglia, A. Leopold, U. and Benetto, E. 2017, Life cycle assessment of building stocks from urban to transnational scales: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74: 316-332.
- Merten, G. Snelling, R. Van Balen, K. Bicer-Simser, B. Verlooy, P. ve Elsen, J. 2009, Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity, *Cement and Concrete research*, 39: 233-240.
- Mingyu, H. Xiaomin, Z. ve Fumei, L. 2009, Alkali-Activated Fly Ashed-Based Geopolymers with Zeolite or Bentonite as Additives. *Journal of Cement and Concrete Composites*, 31: 762-768.
- Monita Olivia. 2011, Durability related properties of low calcium fly ash based geopolymer concrete, Ph. D thesis, Curtin University of Technology.
- Morsy, M.S. Rashad, A.M. Shoukry, H. ve Mokhtar, M.M. 2019, Potential use of limestone in metakaolin-based geopolymer activated with H₃PO₄ for thermal insulation. *Construction and Building Materials*, 229: 117088.
- Musci, G. Lakatos, J. Molnar, Z. ve Szabo, R., 2014, Development of geopolymer using industrial waste materials. *9th International Conference of Environmental Engineering*, ICEE 2014.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., ve Shekarchi, M. 2012, An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35: 1023-1033.
- Naskar, S. and Chakraborty, A.K. 2016, Effect of nano materials in geopolymer concrete. *Perspectives in Science*, 8: 273–275.
- Nayaka, R.R. Alengaram, U.J. Jumaat, M.Z. Yusoff, S.B. ve Alnahhal, M.F. 2018, High volume cement replacement by environmental friendly industrial by-product palm oil clinker powder in cement – lime masonry mortar. *Journal of Clean. Production*, 190: 272–284.
- Nazarpour, H. ve Jamali, M. 2020, Mechanical and freezing cycles properties of geopolymer concrete with recycled aggregate. *Structural Concrete*, 21: 1004–1012.

- Nikolov, A. Nugteren, H. ve Rostovsky, I. 2020, Optimization of geopolymers based on natural zeolite clinoptilolite by calcination and use of aluminate activators. *Construction and Building Materials*, 243: 118257.
- Nikolov, A. Rostovsky, I. ve Nugteren H. 2017, Geopolymer Materials Based on Natural Zeolite. *Journal of Construction Materials*, 16: 18.
- Nuaklong, P. Sata, V. ve Chindaprasirt, P. 2016, Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Clean Production*, 112: 2300–2307.
- Okoye, F.N. Prakash, S. ve Singh, N.B. 2017, Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume. *Journal of Clean Production*, 149: 1062–1067.
- Olivia, M. and Nikraz, H. 2012, Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials and Design*, 36, 191-198.
- Ortega, E.A. Cheeseman, C. Knight, J. ve Loizidou. 2000, Properties of alkali-activated chinoptilolite. *Cement and Concrete Research*, 30: 1641-1646.
- Özen, S. ve Alan B. 2018, Compressive Strength and Microstructural Characteristics of Natural Zeolite-Based Geopolymer. *Journal of Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62: 64-71.
- Özen, S. ve Uzal B. 2021, Effect of characteristics of natural zeolites on their geopolymerization. *Case Studies in Construction Materials*, 15: e00715.
- Özer, C. 2018, Geopolimer harçların reolojik davranışı üzerinde zeolit etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. İnönü Üniversitesi.
- Pacheco-Torgal, F. Castro-Gomes, J. ve Jalali, S. 2007, Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders. *Cement and Concrete Research*, 37(6): 933-941.
- Pacheco-Torgal, F. Labrincha, J.A. Leobelli, C. Palomo, A. ve Chindaprasirt, P. 2015, Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 819.
- Palomo, A. Grutzeck, M.W. ve Blanco, M.T. 1999, Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29: 1323–1329.
- Pedro, P.C. ve Ivan Escalante-Garcia, J. 2020, Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakoalin-A comparison of strength, microstructure and sustainability with portland cement and geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 273: 123118.
- Petermann, J. Saeed, A. ve Hammons, M. 2010, Alkali-activated geopolymers: a literature review. *Material Science*, 19890644.

- Petermann, J.C. ve Saeed, A. 2012, Alkali-activated geopolymers: a Literature review. Air Force Research Lab, 1–99.
- Phoo-Ngernkham, T. Maegawa, A. Hatanka, S. and Chindapasirt, P. 2015, Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear strengths of FA-GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials*, 91: 1-8.
- Poon, C.S. Lam, L. Kou, S.C. ve Lin, Z.S. 1999, A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes. *Construction and Building Materials*, 427-432.
- Provis, J.L. ve Van Deventer, J.S.J. 2009, Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 1-11.
- Rajamane, N.P. Nataraja, M.C. Dattatreya, J.K. Lakshmanan, N. ve D. Sabitha, D. 2012 Sulphate resistance and eco-friendliness of geopolymer concretes. *Indian Concrete Journal*, 86(1): 13–22.
- Rangan, B. ve Hardjito, D. 2005, Studies on fly ash-based geopolymer concrete, *Proc. 4th World*.
- Rangan, B.V. 2008, Fly ash-based geopolymer concrete. *Research Report GC4. Curtin University of Technology, Australia*.
- Riahi, S. Nazari, A. Zaarei, D. Khalaj, G. Bohlooli, H. ve Kaykha, M.M. 2012, Compressive strength of ash-based geopolymers at early ages designed by Taguchi method. *Materials and Design*, 37, 443-449.
- Rostami, H. ve Brendley, W. 2003, Alkali ash material: A novel fly ash-based cement. *Environmental, Science and Technology*, 37: 3454–3457.
- Rowles, M.R., 2006, Structural nature of aluminosilicate inorganic polymers: A macro to nanoscale study. Ph. D, Curtin University of Technology, Australia.
- Roy, D.M. 1999, Alkali-activated cements: Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29(2): 249-254.
- Sarikaya, H. 2006, zeolit katkili betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Doktora tezi.
- Shahrajabian, F. ve Behfarnia, K., 2018, The effects of nano particles on freeze and thaw resistance of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 176: 172–178.
- Shayan, A. 2013, Specification and use of geopolymer concrete in the manufacture of structural and non-structural components. *Austrroads Report Project No. TS1835*.
- Shi, C. Fernandez-Jimenez, A. ve Palomo A. 2013, New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and concrete research*, 41: 750-763.

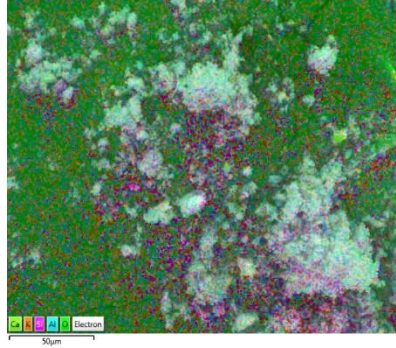
- Shi, X.S. Wang, Q.Y. Zhao, X.L. ve Frank, C. 2012, Discussion on properties and microstructure of geopolymer concrete containing fly ash and recycled aggregate. *Advanced Material Research*, 450–451: 1577–1583.
- Singh, B. Ishwarya, G. Gupta, M. ve Bhattacharyya, S.K. 2015, Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85: 78-90.
- Skvara, F. Kopecky, L. Nemecek, J. ve Bittnar, Z. 2006, Microstructure of geopolymer materials based on fly ash. *Ceramics-Silikaty*, 50(4): 208–215.
- Songpiriyakij, S. Kubprasit, T. Jaturapitakkul, C. ve Chindaprasirt, P. 2010, Compressive strength and degree of reaction of biomass- and fly ash-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24: 236–240.
- Soutsos, M. Boyle, A.P. Vinai, R. ve Barnett, S.J. 2016, Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 110: 355-368.
- Sung, G. Bok, Y. Taek, K. ve Soo, Y. 2015, The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activator. *Construction and Building Materials*, 141: 409-418.
- Swanepoel, J.C. and Strydom, C.A. 2002, Utilisation of fly ash in a geopolymer material, *Applied Geochemistry*, 29(2); 1143-1148.
- Tan, O. Zaimoglu, A.S. Hınıslıoğlu, S. ve Altun, S. 2005, Taguchi approach for optimization of the bleeding on cement-based grouts. *Tunnelling and underground space technology*, 20(2), 167-173.
- Tan, Ö. ve Zaimoglu, A.Ş. 2003, Çimento enjeksiyonlarında kullanılan katkı malzemelerinin reolojik özelliklere etkilerinin araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2): 275-281.
- Thokchom, S. Ghosh, P. ve Ghosh, S. 2010, Performance of fly ash based geopolymer mortars in sulphate solution. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 3(1): 36-40.
- Topçu, İ.B. Toprak, M.U. ve Uygunođlu, T. 2014, Durability and microstructure characteristics of alkali activated coal bottom ash geopolymer cement. *Journal of Cleaner Production* 81: 211–217.
- Topçu, İ.B. ve Canbaz, M. 2007, Alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçlarda donma çözülme. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi *Müh. Mim. Fak. Dergisi C. XXI*, S.2.
- TS EN 1015-10, 1999, Methods of test for masonry-Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar.
- TS EN 1015-11, 2020, Methods of test for mortar for masonry-Part 11: Determination of flexural strength and compressive strength of hardened mortar.

- TS EN 1015-3, 1999, Methods of test for mortar for masonry-Part 3: Determination of consistency of fresh mortar (by flow table)
- Türker, P. Erdoğan, B. Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A. 2009, Türkiye’deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. Ankara.
- Türkmen, İ. Gül, R. ve Çelik, C. 2008, A Taguchi approach for investigation of some physical properties of concrete produced from mineral admixtures. *Building and environment*, 43(6), 1127-1137.
- Ulloa, N, A. Baykara, H. Cornejo, M, H. Rigail, A. Paredes, C. vw Villalba, L. 2018, Application-oriented mix design optimization and characterization of zeolite-based geopolymer mortars. *Journal of Construction and Building Materials*, 174: 138-149.
- Uzal, B. Turanlı, L. Yücelö H. Göncüođlu ve Çulfaz. 2010, Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. *Cement and Concrete Research*, 40: 398-404.
- Uzal, B. 2007, Properties And Hydration Of Cementitious Systems Containing Low, Moderate And High Amounts Of Natural Zeolites, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Science, Ph.D Thesis.
- Valipour, M. Pargar, F. Shekarchi, M. ve Khani, S. 2013, Comparing a natural puzzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 41: 879-888.
- Van Dao, D. Ly, H.B. Trinh, S.H. Le, T.T. ve Pham, B.T. 2019, Artificial intelligence approaches for prediction of compressive strength of geopolymer concrete. *Materials*, 12: 983.
- Van Deventer, J. Proris, J. Duxson, P. ve Brice, D., 2010, Chemical research and climate as drivers in the commerical adoption of alkali activated materials. *Waste and Biomass Valorization*, 1(1): 145-155.
- Van Jaarsved, J.G.S. Van Deventer, J.S.J. ve 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. ve Gomez, L. 2010, Geopolymer Synthesis Using Alkaline Activation of Natural Zeolite, *Journal of Construction and Building Materials*, 24: 2084-2090.
- Wongsa, A. Sirwattanakarn, A, Nuaklong, P. Sata, V. Sukontasukkul, P. ve Chindaprasirt, P. 2020, Use of recycled aggregate in pressed fly ash geopolymer concrete. *Environmental Progressive of Sustainable Energy*, 39.
- Xie, Z. and Xi, Y. 2001, Hardening mechanisms of an alkaline-activated class F fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31: 1245–1249.

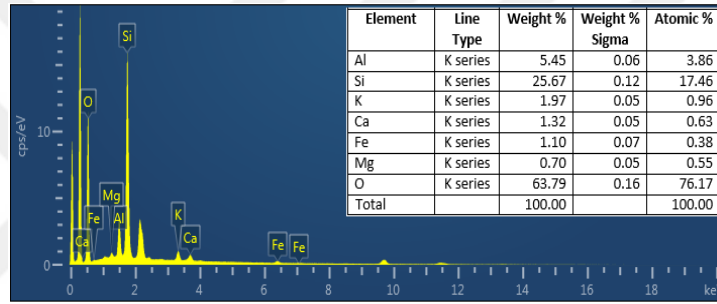
- Xu, H. and Van Deventer, J.C. 2002, Geopolymerisation of multiple minerals. *Minerals Engineering*, 15: 1131-1139.
- Xu, H. Provis, J.L. van Deventer, J.S. ve Krivenko, P.V. 2008, Characterization of aged slag concretes. *ACI Materials Journal*, 105 (2): 131.
- Yadollahi, M.M. Benli, A. ve Demirboga, R. 2015, The effect of silica modulus and aging on compressive strength of pumice based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 94: 767-774.
- Zhao, M. Zhang, G. Htet, K.W. Kwon, M. Liu, C. Xu, Y. Tao, M., 2019b, Freeze-thaw durability of red mud slurry-class F fly ash-based geopolymer: Effect of curing conditions, *Construction and Building Materials*, 215: 381–390.
- Zhao, R. Yuan, Y. Cheng, Z. Wen, T. Li, J. Li, F. Ve Ma, Z.J. 2019a, Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 222: 474–483.

EKLER

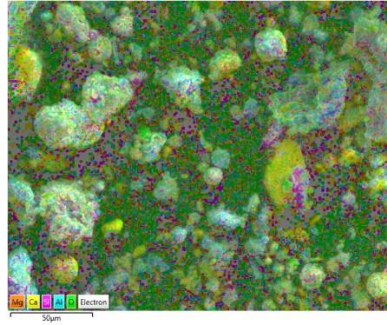
EK-A SEM ile Çekilen Görüntülerin Atomsal İçerikleri (EDS)



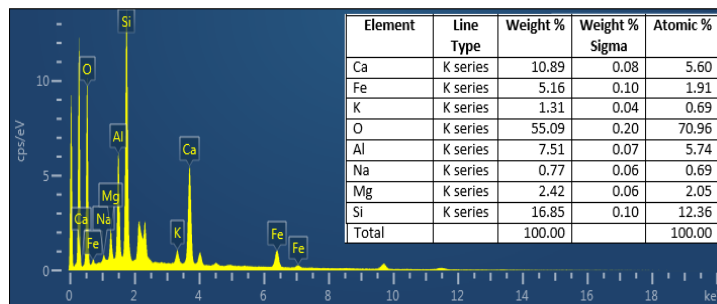
Şelil A1. Doğal zeolit numunenin 500 büyütme SEM



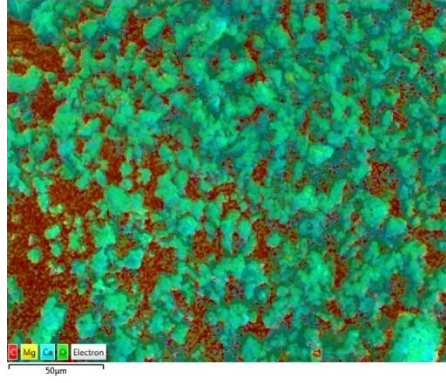
Şekil A2. Doğal zeolit numunenin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



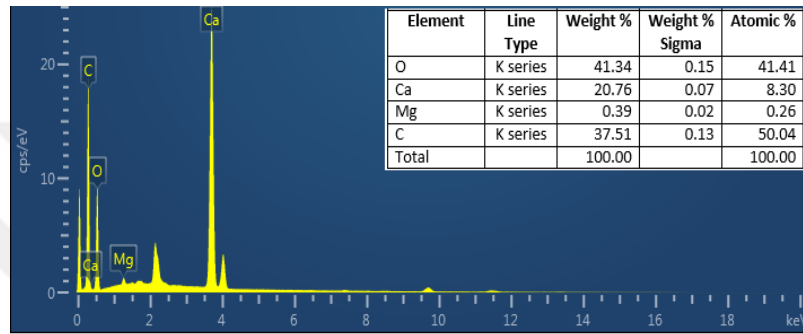
Şelil A3. Uçucu kül numunenin 500 büyütme SEM



Şekil A4. Uçucu kül numunenin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



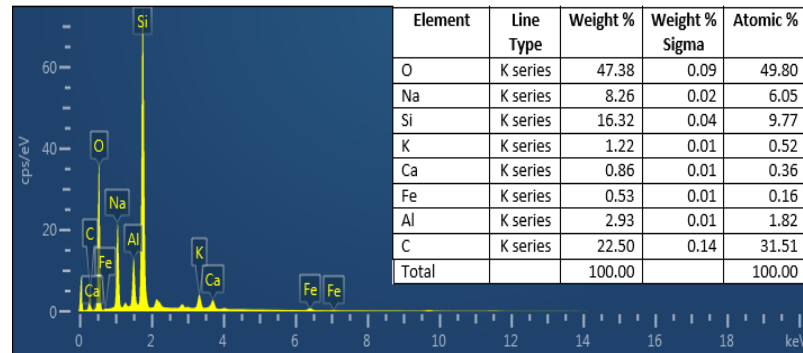
Şelil A5. Toz kalker numunenin 500 büyütmeli SEM



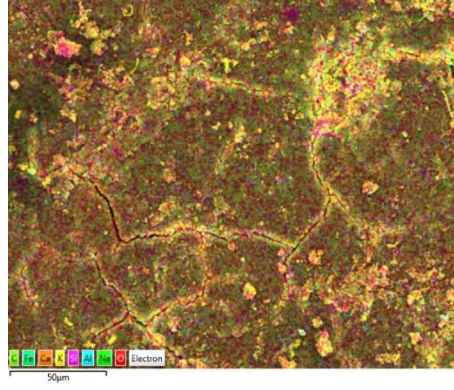
Şekil A6. Toz kalker numunenin 500 büyütmeli görüntünden alınan EDS



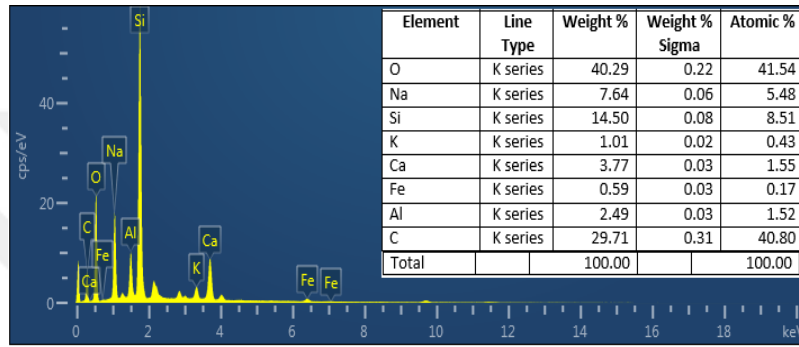
Şelil A7. 100DZ numunelerin 500 büyütmeli SEM



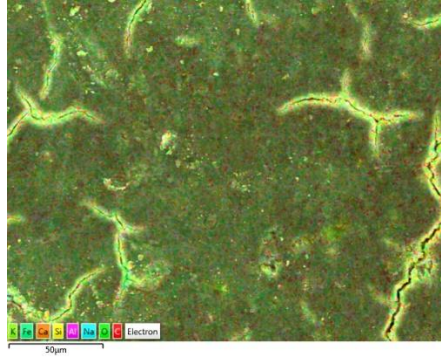
Şekil A8. 100DZ numunelerin 500 büyütmeli görüntünden alınan EDS



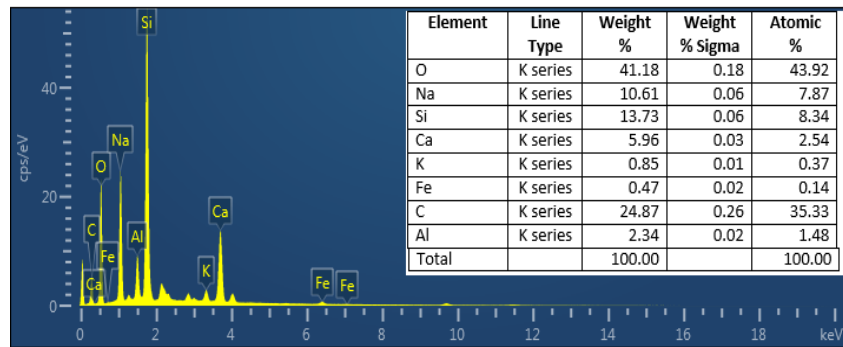
Şekil A9. UK10LS10DZ80 numunelerin 500 büyütmeli SEM



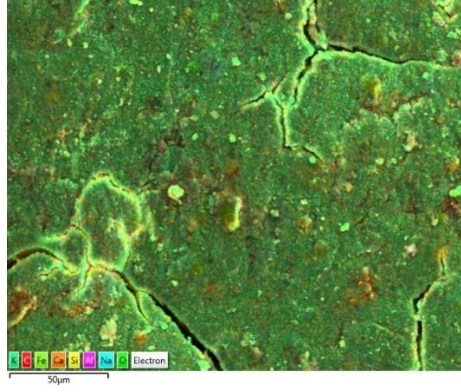
Şekil A10. UK10LS10DZ80 numunelerin 500 büyütmeli görüntünden alınan EDS



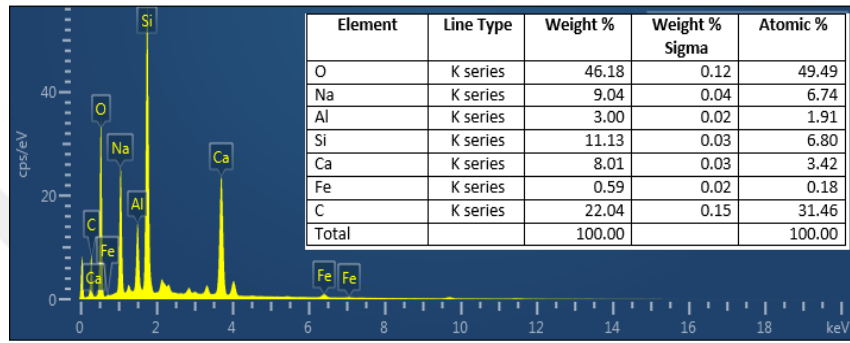
Şekil A11. UK15LS15DZ60 numunelerin 500 büyütmeli SEM



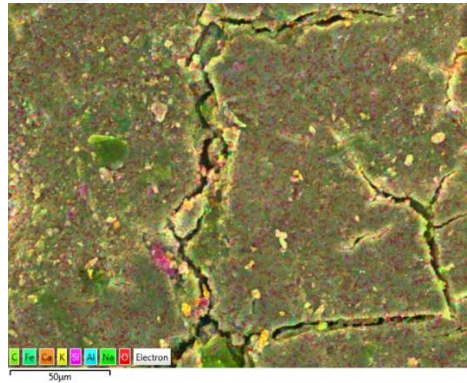
Şekil A12. UK15LS15DZ60 numunelerin 500 büyütmeli görüntünden alınan EDS



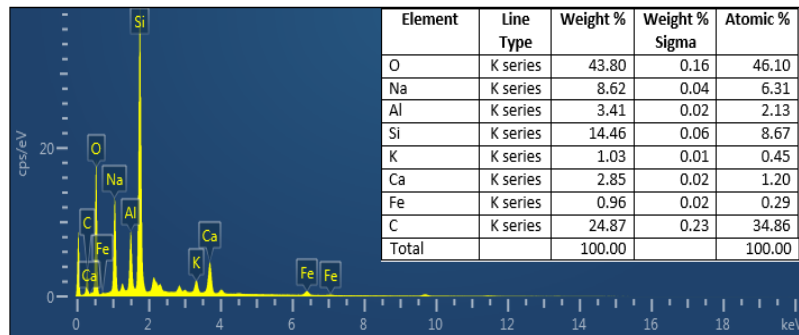
Şekil A13. UK30LS30DZ40 numunelerin 500 büyütme SEM



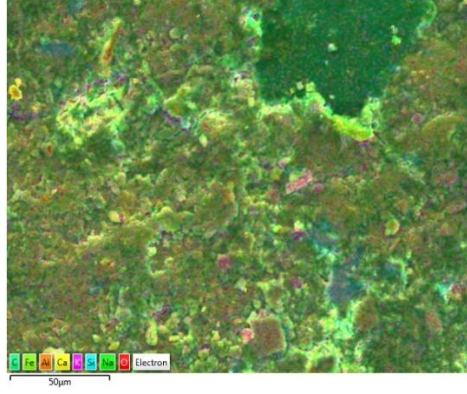
Şekil A14. UK30LS30DZ40 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



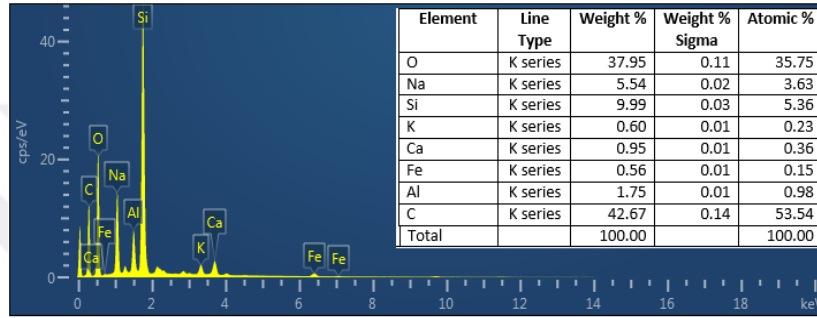
Şekil A15. UK50DZ50 numunelerin 500 büyütme SEM



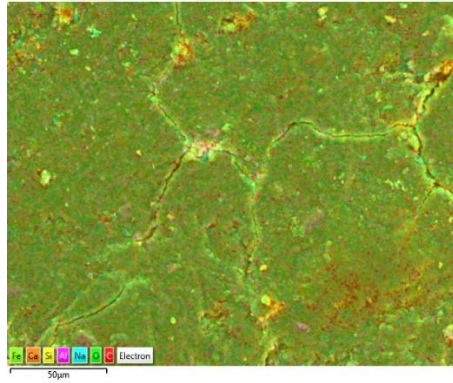
Şekil A16. UK50DZ50 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



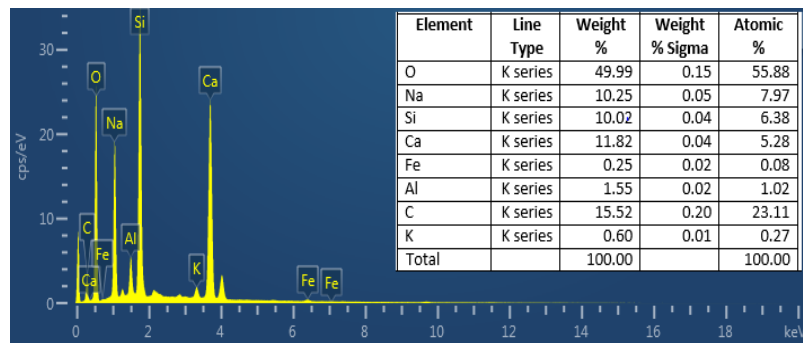
Şekil A17. UK10DZ90 numunelerin 500 büyütme SEM



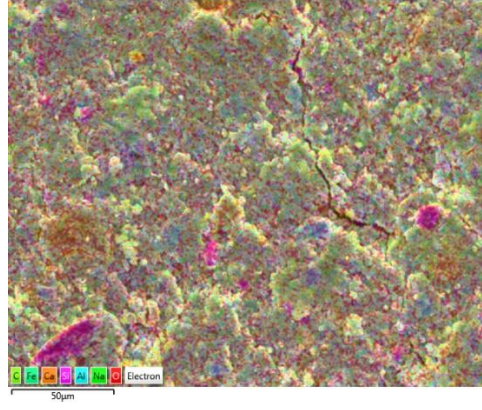
Şekil A18. UK10DZ90 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



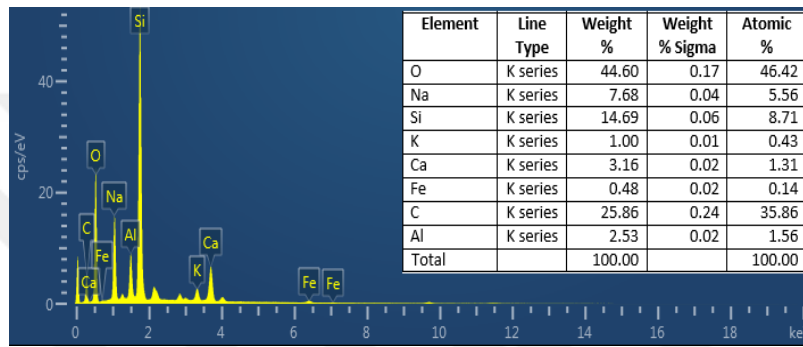
Şekil A19. LS50DZ50 numunelerin 500 büyütme SEM



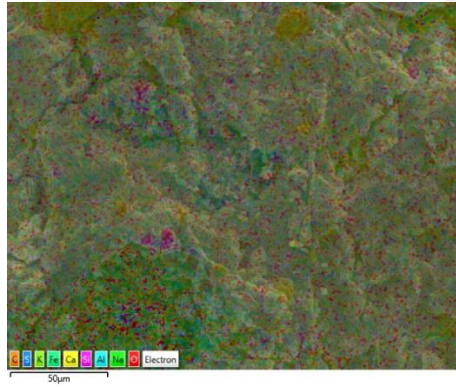
Şekil A20. LS50DZ50 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



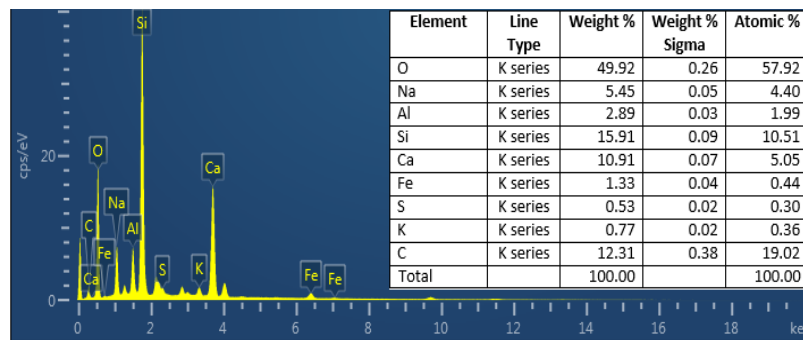
Şekil A21. LS10DZ90 numunelerin 500 büyütme SEM



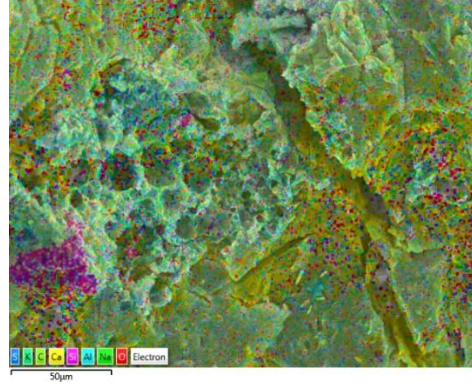
Şekil A22. LS10DZ90 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



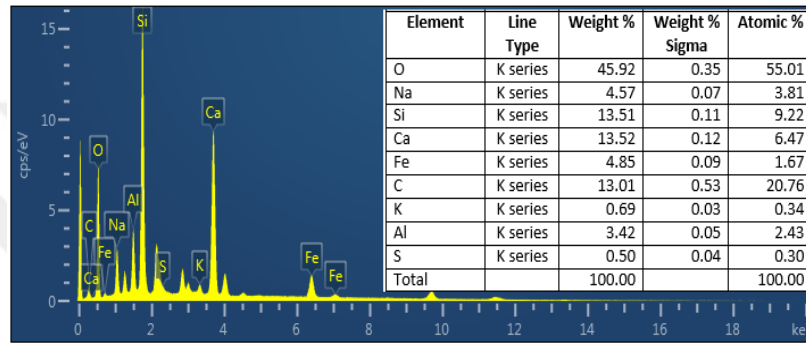
Şekil A23. Sülfat etkisinden sonra UK15LS15DZ60 numunelerin 500 büyütme SEM



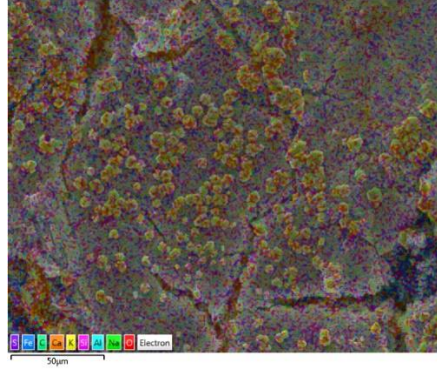
Şekil A24. Sülfat etkisinden sonra UK15LS15DZ60 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



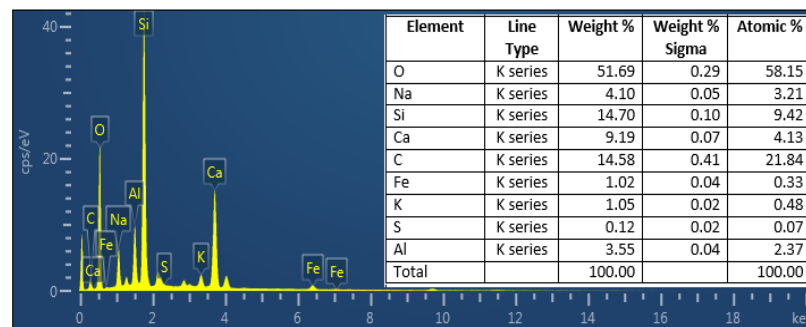
Şekil A25. Sülfat etkisinden sonra UK30LS30DZ40 numunelerin 500 büyütme SEM



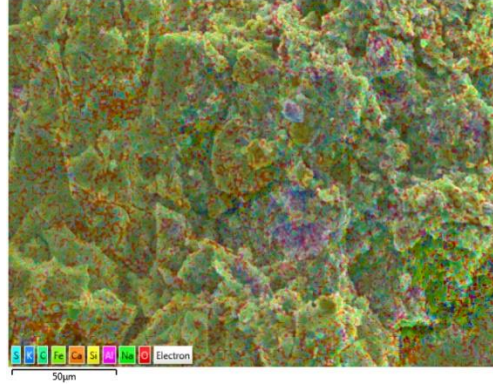
Şekil A26. Sülfat etkisinden sonra UK30LS30DZ40 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



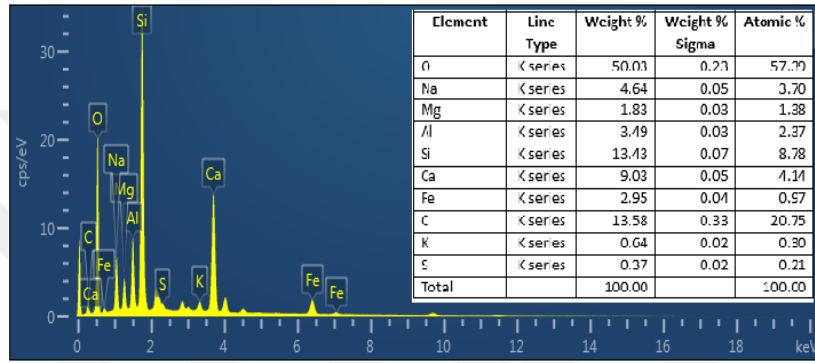
Şekil A27. Asit etkisinden sonra UK20LS20DZ40 numunelerin 500 büyütme SEM



Şekil A28. Asit etkisinden sonra UK20LS20DZ60 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS



Şekil A29. Asit etkisinden sonra UK30LS30DZ40 numunelerin 500 büyütme SEM



Şekil A30. Asit etkisinden sonra UK30LS30DZ40 numunelerin 500 büyütme görüntünden alınan EDS