

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KIRMIZI ÇAMUR VE METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ouiame CHAKKOR

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Programı**

Ocak, 2021

T.C.
İSTANBUL AYDIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KIRMIZI ÇAMUR VE METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Ouiame CHAKKOR
(Y1615.690002)

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Fatih ALTAN
Eş Danışmanı: Doç. Dr. Orhan CANPOLAT

Ocak, 2021

YEMİN METNİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Kırmızı amur ve Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçların Mekanik ve Durabilite zelliklerinin İncelenmesi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (11/01/2021)

Ouiame CHAKKOR

*Rahmetli Babam Sidi Mohammed Chakkor'a,
Annem Lalla Fatima Zohra Zaoujan'a
ve Kardeşim Sidi Anas Chakkor'a...*

ÖNSÖZ

Hayatımın her anında yanımda olan, her türlü konuda maddi ve manevi desteklerini hissettiğim danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Fatih ALTAN'a ve yardımlarını esirgemeyen eş danışman hocam Orhan CANPOLAT'a teşekkür ederim.

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün FBA-2019-3558 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Ocak, 2021

Ouiame CHAKKOR
İnşaat Y. Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
ABSTRACT	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	5
1.2 Literatür Araştırması	6
2. GEOPOLİMERLER	7
2.1 Geopolimerler ve Terminolojisi	7
2.2 Alüminosilikat Geopolimer Çeşitleri	11
2.3 Geopolimer Bileşenleri.....	13
3. DENEY MALZEMELERİ.....	17
3.1 Ana Malzemeler	17
3.1.1 Metakaolin (MK)	17
3.1.2 Kırmızı çamur (KÇ)	20
3.1.3 Granüle yüksek fırın cürufu (GYFC).....	21
3.2 Dolgu Malzemeleri.....	23
3.2.1 Dere kumu	23
3.2.2 Kireçtaşı	25
3.2.3 Mermer tozu	26
3.2.4 Bazalt tozu.....	28
3.3 Aktivatör çözeltileri.....	30
4. YÖNTEM VE DENEYLER.....	31
4.1 Deneysel Çalışmalar.....	31
4.1.1 Basınç dayanım testi	31
4.1.2 Eğilme dayanım testi.....	32
4.1.3 Yarma çekme testi.....	33
4.1.4 Ultrases geçiş hızı testi.....	34
4.1.5 Boşluk oranı, su emme ve birim hacim ağırlık deneyleri	35
4.1.6 Aşınma dayanım testi.....	36
4.1.7 Yüksek sıcaklık dayanım testi.....	38
4.1.8 Donma çözülme dayanım testi.....	39
4.1.9 Magnezyum ve sodyum sülfat etkisinin incelenmesi	40
4.1.10 SEM analizi.....	40
4.1.11 XRD analizi.....	41
4.1.12 Kullanılan harçın karışım özellikleri.....	42
4.1.13 Alkali çözeltilerin hazırlanması	43

4.1.14 Taze geopolimer üretimi	43
4.1.15 Karışımların kür yöntemi	45
5. TARTIŞMA VE BULGULAR	47
5.1 Mekanik Özellikleri	47
5.1.1 Basınç ve eğilme dayanım sonuçları	47
5.1.2 Birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme sonuçları	51
5.1.3 Ultrases geçiş hızı sonuçları	52
5.1.4 Aşınma dayanım sonuçları	54
5.1.5 Yarma çekme sonuçları	56
5.1.6 SEM analizi	57
5.2 Durabilite Özellikler	65
5.2.1 Yüksek sıcaklık deneyleri	65
5.2.1.1 Basınç ve eğilme dayanım sonuçları	65
5.2.1.2 Ultrases geçiş hızı sonuçları	68
5.2.1.3 Ağırlık kaybı sonuçları	70
5.2.1.4 Görsel inceleme ve analizler	72
5.2.2 Donma çözülme deneyi	76
5.2.2.1 Basınç ve eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçları	76
5.2.2.2 Ağırlık değişimi, görsel inceleme ve analizler	79
5.2.3 Magnezyum ve sodyum sülfat etkisinin incelenmesi	81
5.2.3.1 Basınç dayanım sonuçları	81
5.2.3.2 Eğilme dayanım sonuçları	84
5.2.3.3 Ultrases geçiş hızı sonuçları	87
5.2.3.4 Ağırlık kaybı sonuçları	90
5.2.3.5 Görsel inceleme	91
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	111

KISALTMALAR

BZ	: Bazalt Tozu
GP	: Geopolimer
GYFC	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
KÇ	: Kırmızı Çamur
LS	: Kireçtaşı Tozu
MgSO₄	: Magnezyum Sülfat
MK	: Metakaolin
MR	: Mermer Tozu
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
Na₂SO₄	: Sodyum Sülfat
NaOH	: Sodyum Hidroksit
PC	: Portland Çimento
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopisi
UPV	: Ultrases Geçiş Hızı
XRD	: X-ışını Kırınım
σ	: Basınç Dayanımı (N/mm ²)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Geopolimer adlandırması	10
Çizelge 3.1: Metakaolinin kimyasal bileşenlerinin analizi.....	18
Çizelge 3.2: Metakaolinin fiziksel özellikleri.....	19
Çizelge 3.3: Kırmızı çamurun kimyasal bileşenlerinin analizi.....	21
Çizelge 3.4: Cürufun kimyasal bileşenlerinin analizi.....	22
Çizelge 3.5: Kireçtaşı özellikleri	25
Çizelge 3.6: Mermer tozu özellikleri.....	27
Çizelge 3.7: Bazalt tozu özellikleri.....	28
Çizelge 3.8: Sodyum hidroksit özellikleri	30
Çizelge 3.9: Sodyum silikatın özellikleri.....	30
Çizelge 4.1: Harçın kontrol numune karışım oranları (gr)	42
Çizelge 4.2: Harçın karışım oranları (gr).....	42
Çizelge 4.3: Geopolimerin harçın karışım tanıtımı	43
Çizelge 5.1: GP harç numuneleri 7, 28, ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları ..	49
Çizelge 5.2: GP harç numunelerin 7, 28, ve 56 günlük eğilme dayanımı sonuçları	49
Çizelge 5.3: GP harç numunelerin ağırlıkça su emme, birim hacim ağırlık boşluk oranı sonuçları.....	52
Çizelge 5.4: Ultrasonik geçiş hızı sonuçları	53
Çizelge 5.5: Basınç dayanımı kaybı oranları (%).	66
Çizelge 5.6: Eğilme mukavemeti kaybı oranları (%).	67
Çizelge 5.7: Ultrasonik geçiş hızı (UPV) kayıp oranları (%).	68
Çizelge 5.8: Prizma numunelerin ağırlık kaybı (%)	70
Çizelge 5.9: Küp numuneleri ağırlık kaybı (%).....	71
Çizelge 5.10: Basınç dayanımı (Mpa)	77
Çizelge 5.11: Eğilme dayanımı (Mpa)	78
Çizelge 5.12: Magnezyum ve sodyum sülfat etkisi nedeniyle basınç dayanımı kayıp oranları (%).	81
Çizelge 5.13: Magnezyum ve sodyum sülfat etkisi nedeniyle eğilme dayanımı kayıp oranları (%).	84
Çizelge 5.14: Magnezyum ve sodyum sülfat etkisi nedeniyle UPV kayıp oranları (%).	88

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Metakaolin numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş.....	19
Şekil 3.2: Metakaolin.....	20
Şekil 3.3: Kırmızı çamur.....	21
Şekil 3.4: Cüruf.....	22
Şekil 3.5: Cüruf numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş	23
Şekil 3.6: Dere kumu	24
Şekil 3.7: Dere kumu numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş.....	24
Şekil 3.8: Kireçtaşı.....	25
Şekil 3.9: Kireçtaşı numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş.....	26
Şekil 3.10: Mermer tozu	27
Şekil 3.11: Mermer tozu numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş.....	28
Şekil 3.12: Bazalt tozu.....	29
Şekil 3.13: Bazalt tozu numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş.....	29
Şekil 4.1: Basınç dayanımı testinin küp numunelerde uygulanması	32
Şekil 4.2: Eğilme dayanımı testinin prizma numunelerde uygulanması	33
Şekil 4.3: Yarma çekme dayanımı testinin silindir numunelerde uygulanması	34
Şekil 4.4: Ultrases geçiş hızı testi cihazı	35
Şekil 4.5: Arşimed deney düzeneği	36
Şekil 4.6: Böhme aşındırma aleti.....	37
Şekil 4.7: Aşınma öncesi ve sonrası durum.....	37
Şekil 4.8: Korondum tozu.....	38
Şekil 4.9: Yüksek sıcaklık fırını	38
Şekil 4.10: Fırına konulan numuneler	39
Şekil 4.11: Donma çözülme cihazı	39
Şekil 4.12: Çözeltiye konulan numuneler.....	40
Şekil 4.13: SEM cihazı	41
Şekil 4.14: SEM kaplama cihazı.....	41
Şekil 4.15: Matkap karıştırıcı	44
Şekil 4.16: Titreşim masası.....	44
Şekil 4.17: 50 x 50 x 50 mm küp ve 40 x 40 x 160 mm prizma kalıplar	45
Şekil 4.18: Yanmaz fırın poşetli numunelerinin fırına konulması	45
Şekil 5.1: Yanmaz fırın poşetli numunelerinin fırına konulması	47
Şekil 5.2: İncelenen karışımların basınç dayanımı değerleri.....	50
Şekil 5.3: İncelenen karışımların eğilme dayanımı değerleri	50

Şekil 5.4: Harç numunelerin basınç dayanımı testi	50
Şekil 5.5: Harç numunelerin eğilme dayanımı testi.....	51
Şekil 5.6: Basınç dayanım testi.....	51
Şekil 5.7: Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki	53
Şekil 5.8: İncelenen karışımların (gr) değerleri başına aşınma kayıpları	54
Şekil 5.9: İncelenen karışımların (mm) değerleri başına aşınma kayıpları	55
Şekil 5.10: Aşınma testinden sonra incelenen numuneler	55
Şekil 5.11: Yarma Çekme Sonuçları.....	56
Şekil 5.12: Yarma çekme testinden sonra incelenen numuneleri	57
Şekil 5.13: Kontrol numunesinin SEM görüntüleri: a) 10000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş.....	59
Şekil 5.14: %25 LS numunesinin SEM görüntüleri: a) 10000 kez büyütülmüş.....	60
Şekil 5.15: %50 LS numunesinin SEM görüntüleri: a) 5000 kez büyütülmüş b) 3000 kez büyütülmüş.....	61
Şekil 5.16: %50 MR numunesinin SEM görüntüleri: a) 10000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş.....	62
Şekil 5.17: %50 BZ numunesinin SEM görüntüleri: a) 5000 kez büyütülmüş b)3000 kez büyütülmüş.....	63
Şekil 5.18: %75 BZ numunesinin SEM görüntüleri: a) 10000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş.....	64
Şekil 5.19: Yüksek sıcaklıklara maruz numunelerin basınç dayanımı sonuçları.	65
Şekil 5.20: Yüksek sıcaklıklara maruz numunelerin eğilme mukavemeti sonuçları.	66
Şekil 5.21: Yüksek sıcaklık testinden sonra UPV sonuçları.....	69
Şekil 5.22: 200 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler	72
Şekil 5.23: 400 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler	73
Şekil 5.24: 600 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler	73
Şekil 5.25: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler	74
Şekil 5.26: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan kontrol numunesinin SEM görüntüleri 1000 kez büyütülmüş.....	75
Şekil 5.27: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan %25 LS numunesinin SEM görüntüleri 1000 kez büyütülmüş.....	75
Şekil 5.28: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan %50 MR numunesinin SEM görüntüleri 3000 kez büyütülmüş.....	76
Şekil 5.29: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan %50 BZ numunesinin SEM görüntüleri 3000 kez büyütülmüş.....	76
Şekil 5.30: 180 döngü'den sonra ultrases geçiş hızı sonuçları (m/s).....	78
Şekil 5.31: 180 döngü'den sonra ağırlık değişimi (gr) sonuçları	79
Şekil 5.32: 180 döngü'den sonra maruz kalan kontrol numunesinin SEM görüntüleri 5000 kez büyütülmüş.....	80
Şekil 5.33: 180 döngü'den sonra maruz kalan %25 BZ numunesinin SEM görüntüleri 5000 kez büyütülmüş.....	80
Şekil 5.34: 180 döngü'den sonra maruz kalan %50 BZ numunesinin SEM görüntüleri 5000 kez büyütülmüş.....	81
Şekil 5.35 : Magnezyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	83
Şekil 5.36: Sodyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	84
Şekil 5.37: Magnezyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerinin eğilme mukavemeti sonuçları.....	86

Şekil 5.38: Sodyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerinin eğilme mukavemeti sonuçları.....	86
Şekil 5.39: Magnezyum sülfatın UPV sonuçları.....	87
Şekil 5.40: Sodyum sülfatın UPV sonuçları.....	88
Şekil 5.41: Ultrases Geçiş Hızı testi.....	89
Şekil 5.42: Magnezyum sülfatın ağırlık değişiklikleri.....	90
Şekil 5.43: Sodyum sülfatın ağırlık değişiklikleri.....	91
Şekil 5.44: ($MgSO_4$) maruz kaldıktan sonra numuneler , b) (Na_2SO_4) maruz kaldıktan sonra numuneler c) ($MgSO_4$) maruz kaldıktan sonra numuneler, d) (Na_2SO_4) maruz kaldıktan sonra numuneler.....	92
Şekil 5. 45: Sodyum sülfat maruziyetine maruz kaldıktan 180 gün sonra kontrol numunenin X-ışını difraktogramları.....	93
Şekil 5.46: 180 günlük magnezyum sülfat maruziyetinden sonra% 50 LS numunenin X-ışını difraktogramları.....	93
Şekil 5. 47: 180 günlük magnezyum sülfat maruziyetinden sonra %50 BZ numunenin X-ışını difraktogramları.....	94
Şekil 5. 48: Sülfat çözeltisine maruz bırakılmadan önce kontrol numunesinin EDS spektroskopisi.....	95
Şekil 5.49: Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra kontrol numune.....	96
Şekil 5.50: Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakıldıktan sonar %50% BZ numune.....	96
Şekil 5.51: Magnezyum sülfat çözeltisine (1: alçıtaşı) maruz bırakıldıktan sonar %50 LS numune.....	97
Şekil 5.52: Sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakıldıktan sonar %50 LS numune..	97

KIRMIZI ÇAMUR VE METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, metakaolin ve kırmızı çamur esaslı geopolimer numuneleri ile birlikte dere kumu ve üç farklı kategori (kireçtaşı tozu, mermer tozu ve bazalt tozu) dolgu malzemeleri kullanılarak farklı oranlarda dere kumu ile değiştirilerek üretilen %25, %50, ve %75, sodyum silikattan (Na_2SiO_3) oluşan bir aktivatör ile karışım yapılmıştır. Üretilen geopolimer harcının dayanıklılık özelliklerini araştırmak amacıyla, numuneler 180 devir donma-çözülme etkisine, 200, 400, 600, 800 ° C'de yüksek sıcaklık etkilerine ve %10 magnezyum ve sodyum sülfat çözeltilerine maruz bırakıldı. Mikroyapı özelliklerini incelemek için görsel incelemenin yanı sıra SEM analizleri de yapılmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra bazalt tozu üretilen geopolimer harcının kireçtaşı ve mermer tozu numunelerine göre daha yüksek mukavemet özellikleri sağladığı gözlenmiştir. Donma-çözülme etkisi için, bazalt toz serisi, basınç dayanımı sonuçları eğilme mukavemeti sonuçlarından daha yüksek çıkmıştır. Kireçtaşı toz serisi de 180 döngüde yetkinliğini arttırmıştır. Sülfat etkisinin deneysel olarak elde edilen sonuçları, hazırlanan geopolimer harçın mukavemet özelliklerinin tüm karışımlar için 60 günde arttığını ortaya çıkarırken, 180 günde, geopolimer harç önemli ölçüde kayıp göstermiştir. Ayrıca, mekanik özellikler hakkında 7, 28 ve 56 günlerde basınç ve eğilme dayanımları, ultrases geçiş hızı, boşluk oranı, aşınma ve yarma-çekme testleri incelenmiştir. Deneysel test sonuçları metakaolin ve kırmızı çamur geopolimeri üzerinde dolgu maddesi kullanımının, bazalt tozu için sırasıyla 75.63 MPa ve 14.24 MPa ile basınç ve eğilme mukavemeti özellikleri üzerinde olumlu bir şekilde arttığını göstermiştir. Ayrıca, farklı dolgu maddelerinin kullanımlarının boşluk oranı, su emme ve yarma-çekme gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu çalışmayı değerlendirmek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) ve X-ışını Kırınım (XRD) yöntemleri kullanıldı.

Anahtar Kelimeler: *Geopolimer, Bağlayıcı, Metakaolin, Kırmızı Çamur, SEM, XRD.*

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF RED MUD AND METAKAOLIN BASED GEOPOLYMER MORTARS

ABSTRACT

The current work, Metakaolin and Red-Mud based geopolymer specimens produced with control sample using river sand and three categories by substitution of different filler materials (limestone powder, marble powder and basalt powder), by replacing it with river sand in different ratios 25%, 50%, and 75% wished to the mixture with an activator which consists the sodium silicate (Na_2SiO_3). To investigate the durability properties of the manufactured geopolymer mortar, the samples were exposed to 180 cycles of the freezing-thawing effect, high-temperature effects at 200, 400, 600, 800 °C, and to 10% of magnesium and sodium sulfate solutions for various periods of 60, 120, and 180. Moreover, to examine the microstructure properties, SEM analyses were performed as well as a visual inspection. It has been observed that basalt powder series after exposure to high temperatures have been yielding higher strength properties than in limestone and marble powder samples. For the freezing-thawing effect, basalt powder series sustain the higher results for compressive strength while about flexural strength results; limestone powder series improved its competence in terms of 180 cycles, on other hand the experimentally obtained results of sulfate attack uncover that the prepared geopolymer mortar's strength properties increase at 60 days for all the proposed mixes, while at 180 days, the geopolymer mortar suffers a significant loss. Furthermore, about mechanical properties; compressive and flexural strengths at 7, 28, and 56 days, ultrasonic pulse velocity, void ratio, aşınma, and splitting-tensile tests were examined. Experimental test results indicated that the use of filler materials on Metakaolin and Red-Mud geopolymer enhance positively on compressive and flexural strength properties with 75.63 MPa and 14.24 MPa respectively for basalt powder. Besides, the uses of different filler materials have a significant impact on void ratio, water absorption, and splitting tensile. Theresa, to evaluate this work, the Scanning Electron Microscopy and X-ray Diffraction methods were investigated.

Keywords: *Geopolymer, Binder, Metakaolin, Red-Mud, SEM, XRD.*

1. GİRİŞ

Günümüzde, inşaat sektöründe, en yaygın kullanılan malzeme Portland Çimento (PÇ) tabanlı betondur. Bununla birlikte, PÇ' nin olumsuz faktörleri; hammaddesinin üretimi yapılırken yakıt tüketimi sırasında CO_2 üretmesidir. Bu yüzden çimento tarafından üretilen kirlilik, dünyanın % 17' sini kapsamaktadır. Aynı zamanda sürekli gelişen bir çevresel kirlilik oluşturmaktadır (Singh and Middendorf 2020).

Bu bağlamda, bazı araştırmacılar geopolimerler adı verilen çimentolu malzemelerin yeşil varyasyonlarını incelemeye başlamıştır. Geopolimerler terimi yeni bir tür inorganik alümina silikat polimerik malzemeler olarak ortaya çıkmıştır. 1970' lerde geopolimerler terimi gelecekteki çimento olarak görülmüş ve bunların evrimi Davidovits aracılığıyla ortaya çıkmış ve desteklenmiştir (Villa, Pecina et al. 2010). Yapılan araştırmalar; geopolimerlerin, normal Portland Çimento testleriyle zıtlık özellikleri, bileşik etkileri, yüksek sıcaklık ve kimyasal etki konusunda baskın olduğunu göstermiştir (Ryu, Lee et al. 2013, Nath and Sarker 2014).

Geopolimerler, yeni bir malzeme, yeni bir bağlayıcı ve yeni bir beton çimentosu olarak kullanılması düşünülmektedir. Bu malzemenin avantajlı özelliklerinden dolayı, doğal ham maddeler ve endüstriyel atıklar ile bir siliko-alüminat bileşimine sahip birçok bilimsel ve endüstriyel disiplinde kullanılır. Geopolimerler, yarı kristal üç boyutlu siliko-alüminat malzemelerden oluşmuştur (Duxson, Fernández-Jiménez et al. 2007, El-Gamal and Selim 2017, Geraldo, Fernandes et al. 2017). Alümino-silikat kaynağı, alkalın çözeltisi, bağlar arasındaki ilişkiye ek olarak (Si-O-Al-O) polimerik oluşumuna başlayarak bir geopolimer bağlayıcı oluşturmak için baskın bir bileşendir. Öte yandan, geopolimerler üretmek amacıyla uygun olan çok çeşitli ham maddeler bulunmaktadır (Huseien, Mirza et al. 2017). Örnekleri; uçucu kül, fırın cürufu ve silis dumanıdır (He, Zhang et al. 2012, Ye, Yang et al. 2014, Hu, Nie et al. 2018).

Geopolimerlerin çok çeşitli uygulamaları arasında yangına dayanıklı malzemeler, ısı izolasyonları, yapıştırıcılar ve kaplamalar vb bulunmaktadır (Duxson, Fernández-Jiménez et al. 2007). Ayrıca, kimyasal yapının termal evrimi test edildiğinde geopolimer PÇ'den daha yüksek yangın direncine sahiptir (Rickard and Van Riessen 2014, Zhang, Kodur et al. 2016, Pan, Tao et al. 2018). Metakaolin, makul bir sıcaklıkta (650 °C -800 °C) kalsinasyon yoluyla kaolinit mineralinin dehidroksilasyonu yoluyla işlenen yüksek puzzolanik özelliklere sahip sıradan bir ham maddedir. Metakaolin $Al_2Si_2O_7$, kaolinitin büyük ölçüde amorf dehidrasyon ürünüdür $Al_2(OH)_4Si_2O_5$. Termal olarak dehidroksite olduğunda güçlü puzzolanik aktivite sergiler ve bu durum metakaolini iyi bir hale getirmektedir. Ayrıca, mikroyapısal kompozisyon mekanik özellikleri ve dayanıklılık yönlerini de birçok araştırmacılar çalışmıştır (Abdollahnejad, Pacheco-Torgal et al. 2015, Wardhono, Gunasekara et al. 2017).

Çeşitli araştırma türlerinden sonra, MK-750'nin tanıtılmasında terminolojinin değiştirilmesine, endüstriyel üretim için kalsinasyon parametrelerini üç örnek oluşturmaktadır (MK-750, MK-750 A ve MK-750 B). Sonuçlar, MK-750 A 'nın AL (VI) 'da en yüksek ve AL (V) 'de en düşük miktara sahip olduğunu, bu da endüstriyel döner fırınlarda olduğu gibi konteynır içindeki yüksek buhar basıncı yoluyla yetersiz dehidroksilasyona işaret ettiğini göstermiştir (Davidovits, 1996) (Zhuang, Chen et al. 2016). Davidovits, metakaolin ve cürufla yüksek mekanik ve durabilite sonuçları elde etmektedir (Davidovits 2013). Atık malzemeler, uçucu kül ve metakaolin hariç, geopolimerlerin üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmaktadır (Sevim 2011). Bu çalışmada kırmızı çamur, bir yan ürün olarak alümina üretiminin boksitinden bir kalıntı olarak şekillendirilen endüstriyel bir atık olan metakaolin ile Al, V, Na ve Fe gibi değerli malzemelerden kullanılmıştır. İşlem çoğunlukla alümina, silika ve demir oksit fazlarından oluşmaktadır (Hajjaji, Andrejkovičová et al. 2013, Ye, Yang et al. 2014). Ayrıca, birçok yarı endüstriyel çalışma, alüminosilikat malzemelerin çözünürlüğü üzerinde ince bir etkisi olan kalsinasyon ile kırmızı çamurun dahil edilmesini gerçekleştirmiştir [20]. Aynı zamanda, inceliği ve muazzam alkalın doğası onu tehlikeli bir malzeme haline getirmektedir (Long, Gong et al. 2011, Liu, Chen et al. 2013). Son zamanlarda kırmızı çamur, geopolimerizasyon

yönteminde bir ham madde olarak elde edilebilirliğini içeren araştırmalardan ilgi çekmeye başlamıştır (Steveson and Sagoe-Crentsil 2005, Sawan, Zawrah et al. 2020).

İlk 30 dakikada sıcaklığın etkisi altında PÇ, 800°C' lik bir sıcaklığa ulaşıldığında sıcaklık artış hızı azalırken PÇ, 1000°C ve 1100°C arasında 2.0-2.5 saat sabit kalmıştır (Park, Abolmaali et al. 2016). Davidovits, sodyum ve potasyum aktivatörü kullanarak 1200°C'lik yangına karşı direncin elde edildiğini kanıtlamıştır (Davidovits 2013). 100°C ila 200°C arasında su kaybı ve 250°C ila 800°C arasında büzülme olurken, uzamsal değişiklik olmamıştır. Bu büzüşme de 880°C ve 900°C arasında aniden sona ermektedir. Numuneler 1000°C - 1300°C sıcaklıklarında erimeden önce kararlı bir yapıya sahiptir. PÇ, Martin ve ark. tarafından uçucu kül bazlı geopolimerler ile karşılaştırılmıştır (Barbosa and MacKenzie 2003). 600°C 'den sonra PÇ numuneleri dayanımı kaybetmeştir (Martin, Pastor et al. 2015). Bazı F sınıfı uçucu kül örnekleri incelenmiş ve yüksek sıcaklık etkilerinin neden olduğu kayıpları bulmak için Kong ve Sanjayan tarafından 800°C 'ye tabi tutulmuştur (Saavedra and de Gutiérrez 2017).

Donma direnci üzerinde önemli bir etkisi vardır (Kong and Sanjayan 2008). Chul-Woo ve diđ, betonların silis dumanı ve uçucu kül ile birleřtirilmiř olması azalma modunda olduđu gözlenmiřtir (Łaźniewska-Piekarczyk 2012). Donma-çözülme etkileri için, Yawei ve ark cüruf betonunun hasar mekaniđi modellerini arařtırmıřtır (Chung, Shon et al. 2010). Sertleřen ortam kořullarında, donma-çözülme'ye maruz kalan uçucu külün direnci, Peijiang ve ark. (Fu, Cai et al. 2011), Susan ve ark metakaolin ve cüruf beton özelliklerini incelemiřtir (Bernal, de Gutiérrez et al. 2012).

Beton yapıların dayanıklılığı ile ilgili olarak, sülfat etkisi, genleşme, parçalanma ve yumuşama nedeniyle çimento hamurunun bozulmasına neden olan faktörlerden biridir. Önceki bazı araştırmalara göre, PÇ sülfat etkisine maruz kaldığında ciddi hasar göstermiştir (Hekal, Kishar et al. 2002, Santhanam, Cohen et al. 2002). PÇ üzerindeki sülfat etkisi altında, çimento harcı alüminat bileşeni ile C-S-H (Bonen and Cohen 1992, Singh and Middendorf 2020) arasındaki kimyasal reaksiyon, etrengit ve alçıtaşı oluşumuna neden olmaktadır. Aynı zamanda C-S-H' nin yok edilmesi, ve betonun

parçalanmasına ve yumuşamasına neden olur (Singh, Ishwarya et al. 2015, Singh and Middendorf 2020).

Bilindiği üzere geopolimer harçlar çok düşük CO_2 emisyonuna sahiptir (Palomo, Grutzeck et al. 1999). Ayrıca, atık malzemeler, metakaolin, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanan geopolimer harçlar, sülfat etkisinin etkileri altında sürdürülebilirlik sağlamaktadır. Davidovits aracılığıyla, gelecekte geopolimerler terimi yeni çimento olarak ön görülmüştür. İyi mekanik özellikleri, düşük geçirgenliği ve mükemmel dayanıklılık özellikleri nedeniyle evrimleri ortaya çıkmış ve desteklenmiştir (Mulapeer 2016). Önceki araştırmalar, mukavemet özelliklerinin ve hidrasyon ürünlerinin geliştirilmesi küreleşmenin etkilerini ortaya çıkarır. Alkali çözeltinin bileşimi, su ve bağlayıcı oranı, alkalın çözelti (El-Hachem, Rozière et al. 2012, Sata, Sathonsaowaphak et al. 2012), genellikle sodyum silikat, sodyum hidroksit içermektedir (Bakharev 2005, Iacobescu, Angelopoulos et al. 2016). Geopolimer bağlayıcı malzemeler, PC'ye göre daha düşük maliyetlere ve CO_2 emisyonlarında daha yüksek bir azalmaya sahiptir.

Bundan başka, bağlayıcı ve alkali çözelti arasındaki kimyasal reaksiyonu hızlandıran küreleme hidrotermal nedeniyle geopolimer numunelerinin basınç dayanımı 40-70 MPa arasındadır (Scrivener and Young 1997). Asit etkisi durumunda, önceki araştırmalar geopolimer malzemelerin dayanıklılığını işlenmesini ve karakterizasyonunu sunmak için araştırmaktadır (Fernández-Jiménez, García-Lodeiro et al. 2007). Yüksek kalsiyum fazlarının olmaması nedeniyle, geopolimer malzemeler sülfat çözeltileri etkisinin altında mükemmel dirence sahiptir. Günümüzde beton yapıların dayanıklılığı ve bakımı kritik bir konu haline gelmektedir. Çünkü tasarım ömürleri en az 50 yıl iken, 20-30 yıl sonra bozulmaya başlamaktadır. Deniz suyu, kanalizasyon, tünel ve derin temellerle temas eden yapılar dış kimyasal etkisine maruz kalmaktadır (Testing and Cement 2013). Çevrede sülfat etkisine maruz kaldığında, C-H, C-S-H ve çimentonun alüminat bileşeninin ilgili reaksiyonları nedeniyle betonda bozulma vakaları göstermektedir; bu nedenle geopolimer atık malzemeler için sülfat etkisini hayati bir dayanıklılık sorunudur. Cüruf gibi üretilen geopolimer betonun mukavemet özelliklerini artırmak için serval katkı maddeleri kullanılmaktadır. Sülfat çözeltilerinin etkilerine maruz kaldığında, düşük kalsiyum bazlı geopolimer numuneleri mükemmel dayanıklılık ve mukavemet

özellikleri göstermiştir [30]. PÇ dayanıklılık problemlerinin yanı sıra ana aşamaları da ilişkilidir; kalsiyum içeriği, sülfat iyonlarına maruz kaldığında etrengit ve alçıtaşı, $Ca(HO_2)$ varlığında oluşacaktır. Böylece betonun bozucu genişlemesi ve bozulması, kohezif olmayan kütle nedeniyle meydana gelir. Geopolimerler, düşük sünme ve düşük büzülme ve düşük kalsiyum fazı nedeniyle sülfat etkisinin etkileri altında yüksek dayanıklılık ve mukavemet özellikleri direnci göstermiştir. Ayrıca, geopolimer aktive edici çözelti, özellikle NaOH, bağlayıcı oluşumu sırasında etrengit ve karbon-hidrojen oluşumunu engelleyen ve reaksiyonun erken yaşlarında daha yüksek mukavemetleri destekleyen kimyasal çözünmeyi hızlandırır. Bununla birlikte, yüksek NaOH konsantrasyonları, aşırı OH-çözeltisi nedeniyle üretilen geopolimer numunelerinin istenmeyen morfolojisine ve homojen olmamasına neden olmuştur.

1.1 Tezin Amacı

Tezin ana hedefi kırmızı çamur ve farklı dolgu atık malzemeleri eklenmesiyle metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerinin performansını araştırmaktır;

1. Dolgu atık malzemeleri ; kireç taşı, mermer ve bazalt tozu olarak 25%, 50%, ve 75% farklı oranlarda dere kumu ile değiştirilerek incelenmesi.
2. Farklı dolgu atık malzemeleri ile üretilen geopolimer kompozitlerin sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri (12mol) ile aktive edilmesi.
3. Kireç taşı, mermer ve bazalt tozu dolgu atık malzemeleri ile üretilen kırmızı çamur ve metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerinin mekanik ve dayanıklılık özellikleri incelenmesi.
4. Üretilen geopolimer kompozitlerin, farklı dolgu atık malzemeleri ile mukavemet özellikleri, Ultrasonik Geçiş Hızı (UPV), boşluk oranı ve yarma çekme direncinin tespit edilmesi.
5. Farklı dolgu atık malzemeleri ile üretilen geopolimer kompozitlerin aşınma ve yüksek sıcaklık etkisine karşı direncinin tespit edilmesi.
6. Farklı dolgu atık malzemeleri ile üretilen geopolimer kompozitlerin, donma çözülme etkisine (-20°C, +20°C) karşı direncinin tespit edilmesi.

7. Farklı dolgu atık malzemeleri üretilen geopolimer kompozitlerin magnezyum ve sodyum sülfat etkisine karşı direncinin tespit edilmesi.

8. Farklı dolgu atık malzemeleri üretilen geopolimer kompozitlerin taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ve XRD analizleri ile birlikte mikroyapısal analizin incelenmesi.

Bu araştırma, atık malzemeleri sonucu olarak, dere kumunu farklı oranlarla değiştiren bir dolgu maddesi olarak, kompozitin özellikle de kontrol kompozitlerine ilişkin bazalt tozunun dayanıklılık ve mekanik özelliklerinin ve mikroyapısal davranışlarının gelişmesine katkıda bulunmuştur. Ayrıca bir bağlayıcı madde olarak metakaolin ve kırmızı çamur oranına (50% -50%) diğer oranlara göre en iyi sonuçlar verilmiştir ve bu yüzde ile metakaolin ve kırmızı çamur daha dayanıklı ve kullanılabilir hale getirmiştir. Son olarak, bu şekilde kırmızı çamur inşaatla kullanılabilmesi uygundur.

1.2 Literatür Araştırması

Metakaolin bir bağlayıcı malzeme olarak yüksek oranda puzzolanik özelliğe sahip olarak bilinmektedir. Kireç taşı, mermer tozu ve bazalt tozu çok ince taneli olmasından dolayı mekanik özelliği artıran bir malzemedir. Kireç taşı ve mermer tozu ise kalsiyum oranı yüksek ve farklı alanlarda kullanım kapasitesine sahip bir üründür. Bazalt tozu ise silisyum dioksit ve alüminyum oksit oranı yüksek ve sülfat etkisi alanlarda kullanım kapasitesine sahip bir üründür. Kırmızı çamur, yüksek sıcaklığı karşı iyi bir performans gösterebilmektedir. Farklı oranlarda kireç taşı, mermer ve bazalt tozu dolgu malzeme olarak kullanılarak metakaolin tabanlı geopolimer harç numunelerinin mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Atık malzeme olarak kırmızı çamur, metakaolin tabanlı geopolimer harç ile değerlendirmek için kullanılmıştır. Bazalt tozu katkı malzemelerinin, metakaolin tabanlı geopolymer harç numunelerin matris özelliklerini etkileyerek dayanım artışı sağladığı varsayılmıştır.

2. GEOPOLİMERLER

2.1 Geopolimerler ve Terminolojisi

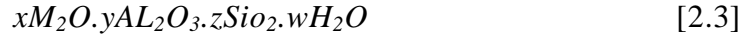
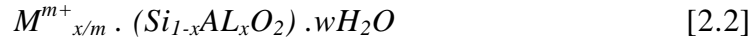
Geopolimerizasyon, alüminosilikatları gelişmiş inorganik bağlayıcılara, yani geopolimerlere (GP) dönüştüren, geleneksel bağlayıcılara göre performans avantajları gösteren bir teknolojidir; normal Portland Çimento (PÇ). Avantajlar asit ve sülfat etkisine karşı daha iyi direnç, termal kararlılık, ağır metallerin kapsüllenmesi, dayanıklılık, vb. örneğin çöp depolama alanlarına atılması amaçlanan endüstriyel atıkları geri dönüştürmektedir. Geopolimerlerin özellikleri ve uygulamaları Bölüm 2.3'te ayrıca ele alınacaktır.

Yapısal açıdan bakıldığında GP, yoğunlaştırılmış silika ve alümina tetrahedranın atomik kafesinden, alüminyum üzerindeki negatif yükü dengeleyen alkali katyonlarından oluşur (Davidovits 1988, Izquierdo, Querol et al. 2009). Aslında, GP ve PÇ arasındaki temel fark ağ oluşturucu'nin doğasına dayanır: PÇ' de ana ağ oluşturucu kalsiyumdur, GP' de ise silikon ve alüminyumdur. Kalsiyum GP'de de bulunabilir, ancak bu durumda bir yük dengeleme rolü vardır. Kalsiyum elektronegatifliği 1.00 olan bir metal olduğundan, çoğunlukla oksijen ile iyonik bağ oluşturur. Silisyum ve alüminyum, bunun yerine sırasıyla 1,90 ve 1,61 elektronegatifliği olan semimetallerdir, bu nedenle çoğunlukla oksijenlerle kovalent bağlar oluştururlar. Bir geopolimerin genel ampirik formülü denklem [2.1]' de olduğu gibi ifade edilebilir (Davidovits 1989).



M, K + veya Na + gibi bir alkali metal katyondur, “n” polikondensasyon derecesidir, “z” genellikle 1 ile 3 arasında değişir ve “w” su içeriğidir. Bu formül, tetrahedral koordinasyondaki alümini, yani Al^{O_2-} ve yük dengeli bir bileşimin doğru stokiyometrisini açıkça ifade eder.

Bu formül, zeolitlerden birine, daha sonra tarif edilecek olan bir sulu alüminosilikat çerçevelerine benzer ve bunların formülleri denklem 2.1 ve 2.2 'de olduğu gibi yazılabilir (Newsam 1992).



Denklem 2.2 ve 2.3, geopolimerin kimyasal formülünü polikondensasyon derecesinden bağımsız olarak ifade etmenin alternatif bir yolunu temsil eder; burada x, y, z ve w, alkalin oksit, silika, alümina ve su molleridir (De Silva, Sagoe-Crenstil et al. 2007). Bu kimyasal formül, bu çalışmada farklı geopolimer bileşimlerini tanımlamak ve karşılaştırmak için kullanılacaktır. Çoğu GP, katı alüminosilikat tozu ve genellikle aktive edici çözelti, alkalin çözeltisi veya sertleştirici olarak adlandırılan bir alkalin çözeltisi içeren 2 bileşenli sistemlerden hazırlanır. Karıştırmak suretiyle akıcı karışım, T≈0 °C ila T=85 °C arasındaki sıcaklıklarda polimerize olur (sertleşir). Tek bileşenli geopolimerler de araştırılmıştır, ancak bu çalışmada ele alınmayacaktır. Geopolimerizasyon için uygun alümino silikat tozları kabaca iki sınıfa ayrılabilir: 1) Özellikle kaolin içeren kil mineralleri de dahil olmak üzere, özellikle değil, termal olarak aktifleştirilmiş alümino silikatlar (Ruiz-Santaquiteria, Fernández-Jiménez et al. 2013); 2) Alümina ve silika içeren atıkların yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığı ve sonra aniden oda sıcaklığına soğutulduğu endüstriyel yan ürünlerdir. GP uygulamalarında en çok kullanılan iki endüstriyel yan ürün, kömürle çalışan enerji santrallerinin ürettiği öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve uçucu kül'dir (Duxson and Provis 2008). PÇ' nin aksine, geopolimerin katı bileşenleri, CO₂ emisyonlarıyla ilişkili karbonat taşıyan minerallerin kalsinasyonunu gerektirmez. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, bunları üreten yüksek sıcaklık süreçleri nedeniyle zaten termal olarak aktifleştirilmiş olarak kabul edilebilir. Geopolimerizasyon için ilk kavramsal mekanizma 1959 yılında Glukhovsky tarafından geliştirdiği yeni bağlayıcıların oluşumundaki reaksiyonları açıklamak için geliştirildi. "Toprak çimento" olarak adlandırılmış ve öğütülmüş alüminosilikat ve zengin alkali endüstriyel atıklardan elde edilmiştir (Glukhovsky 1959). Glukhovsky modeli, geopolimerizasyon reaksiyonlarını üç aşamada tanımlamıştır:

1. Yıkım - pıhtılaşma

2. Pıhtılaşma - yoğunlaşma

3. Yoğunlaşma - kristalleşme

Bu aşamalar tanımlanamadıkları için çok tanımlanmıştır; örneğin çözünme reaksiyonu, jel oluşumu ve polikondansasyon ayar reaksiyonları ile eşzamanlı olarak ilerler. Başka bir deyişle, ilk adım tozun Si-O-Al bağlarının hidrolizini ve alkalın çözeltisinde küçük oligomerlerin salınımını temsil ederken, ikinci adım bu küçük oligomerlerin bir 3D silika ağı oluşturmak için yoğunlaşmasını temsil eder (Duxson, Fernández-Jiménez et al. 2007). Bir çok araştırmacı geopolimerleri “alkali aktifleştirilmiş alüminosilikatlar” olarak tanımlamaktadır ve bu nedenle geopolimerizasyon “alüminosilikatların alkali aktivasyonu” olarak tanımlanabilir. Bununla birlikte, geopolimerin kesin tanımı ve geopolimerler ile nongeopolimerler arasındaki sınırlar günümüzde GP'lerin bilim adamları arasında hala tartışma konusudur.

Ek olarak, bu malzeme sınıfına başka bazı sınıflar verilmiştir (Provis and Van Deventer 2009): alkalın çimentolar, alkali aktifleştirilmiş malzemeler, alkali bağlı seramikler, geopolimer çimentolar, geopolimerik çimentolu bileşikler, poli (sialatlar), mineral polimerler, inorganik polimer betonları, hidroseramikler, vb. (Davidovits 2005, Duxson, Fernández-Jiménez et al. 2007). Bazı araştırmacılar geopolimer terimini ancak reaksiyon ürünü, şekilsiz ila yarı kristal özellikli bir zeolit olduğunda kullanmıştır (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes et al. 2008). Geopolimerizasyon, kalsiyum hidroksit ile reaktif silika arasındaki asit-baz reaksiyonu olan puzzolanik reaksiyonlarla karşılaştırıldığında daha fazla karışıklık ortaya çıkmıştır. Geopolimer terimi Joseph Davidovits tarafından üretilmiştir. Onları ilk olarak GP'lerle ilgili ilk patentinde polisialatlar olarak tanımladı: Polymère Minéral FR 79.22041, daha sonra “Mineral polimerler ve bunları yapma yöntemi” olarak tercüme edildi (Davidovits 1982). Daha sonra bu malzeme sınıfını geopolimerler olarak yeniden adlandırdı (Van Jaarsveld, Van Deventer et al. 1997): “Siliko alüminatlara dayanan geopolimerin kimyasal tanımı için poli (sialat) önerdik. [...] Poli (sialatlar) şu ampirik formüle sahiptir: $M_x (-SiO_2)_z - AL_2O_n$, wH_2O , burada “z” 1,2 veya 3; ... ”(Davidovits 1989). 1979'da ailesiyle Fransız özel araştırma şirketi “Cordi-Géopolymère” nin kurucu ortaklığını yaptı ve 1979'da GP bilim iletişimine odaklanan geopolymer Enstitüsü'nü kurdu ve bu kesinlikle terminolojisinin yayılmasına yardımcı oldu.

O zamandan beri geopolimer terimini kullanan bilimsel makale sayısı katlanarak artmaktadır.

Davidovits daha sonra geopolimerin alkalikle aktive edilmiş bir alümino silikat değil, geopolimerizasyon işlemi ile oluşturulan tekrar birimlerinden oluşan bir mineral bileşiği olduğunu öne sürmüştür (Davidovits 2013). Bu tanım, geopolimerizasyon sürecinin kendisine olan ilgiyi değiştirdi; bu da, küçük molekülleri, yani oligomerleri, bazik veya asit ortamında, bir kovalent bağlı ağa birleştirme işlemi olarak tanımladı. Bu daha genel tanım, inorganik oksit ve bir asit fosfat arasındaki asit-baz reaksiyonlarının ürünleri olan fosfat bazlı geopolimerlerin dahil edilmesine izin verir. Tablo 2.1, geopolimer sistemlerinin çeşitli bileşenlerini tanımlamak için kullanılan terminolojiyi derlemektedir (Davidovits 2013). Kimyasal birim blokları küçük zincirler veya halkalar oluşturduğunda, bileşiğin adında "oligo" ön eki ve ardından yapı bloğunun adı bulunur (ör.oligosialate). Birim bloklar büyük makromoleküller oluşturduğunda, bileşiğin adında "poly" ön eki ve ardından yapı bloğunun adı bulunur; poli (sialate-disiloxo).

Çizelge 2.1: Geopolimer adlandırması

Kimyasal birim	terminoloji
Si-O-Si-O	siloxo
Si-O-Al-O	sialate
Si-O-Al-O-Si-O	sialate siloxo
Si-O-Al-O-Si-O-Si-O	sialate disiloxo
P-O-P-O	phosphate
P-O-Si-O-P-O	phospho siloxo
P-O-Si-O-Al-O-P-O	phospho sialate
R-O-Si-O-Si-O-R-O	organosiloxo
Al-O-P-O	alumino phosphate
Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O	ferro sialate

GP terminolojisi hakkında süregelen bir tartışma var. Bu çalışmada, aksi belirtilmedikçe, geopolimer, alüminyum üzerindeki negatif yükü dengeleyen alkali katyonlu yoğunlaştırılmış silika ve alümina tetrahedradan oluşan bir

Si/AL_3 ile düşük kalsiyumlu alkali aktifleştirilmiş alüminosilikat çimento olarak kabul edilecektir. Dolayısıyla, (Davidovits 1988) 'te belirtildiği gibi geopolimerleri tanımlayan alüminyumun dört katlı koordinasyonu ve tetraavalansıdır.

2.2 Alüminosilikat Geopolimer Çeşitleri

Alümino silikat GP'ler, kimyasal olarak bağlı seramiklerdir ve iki bileşen kullanılarak işlenirler: katı bileşen asidiktir ve tipik olarak silika ve alüminadan oluşur, oysa sıvı bileşen alkalidir ve sertleştirici (veya "aktive edici çözelti") olarak adlandırılabilir. Prensipte olarak silika ve alümina içeren tüm malzemeler geopolimerizasyon için uygundur. Uygulamada, silika ve alümina, geopolimerizasyon reaksiyonunun anlamlı olabilmesi için yeterince reaktif olmalıdır; alümina ve silika içeren bileşen ne kadar reaktif ise geopolimere dönüşüm o kadar hızlı olur. Bu nedenle, ham maddelerin kimyasal analizi yeterli değildir ve alüminosilikat katı öncüllerindeki şekilsiz ve dolayısıyla daha reaktif fazların miktarını belirlemek için XRD kullanılmalıdır (Xu and Van Deventer 2000). Kristalli materyaller geopolimerizasyon reaksiyonlarına daha dirençlidir (Autef, Joussein et al. 2012). Aktive edici çözeltiler esas olarak sodyum hidroksit NaOH ve potasyum hidroksitler KOH gibi konsantre alkaline metal hidroksitler çözeltilerinden veya sodyum veya potasyumun konsantre çözünür silikat çözeltilerinden oluşur. Daha önce belirtildiği gibi GP'ler ve GP olmayan sistemler genellikle basit değildir ve bir kez daha kalsiyum tartışmanın merkezinde yer almaktadır. RILEM teknik komitesine göre (Provis, Brice et al. 2014) GP'ler, düşük kalsiyum içeriğine ve yüksek alümina içeriğine sahip Alkali Aktif Malzemeler (AAM)'lerin bir alt kategorisidir. Davidovits bu sınıflandırmaya katılmamıştır ve ona göre: geopolimerler jel veya çökelti değil, polimerlerdir ve bu nedenle bilim camiası polisiyalat terminolojisini takip etmelidir (Davidovits 1989); AAM'ler petrole sodyum girmezken, GP'ler içermez. Ayrıca "GP'nin bir ürün değil bir kavram olduğunu" vurguladı (Xu and Van Deventer 2000). Tartışma Davidovits'in bilimsel dergilerde aktif olarak yayınlamaması, daha ziyade geopolimer Enstitüsü'nün medyaları aracılığıyla iletişim kurması nedeniyle karmaşıktır.

Davidovits ayrıca bir alkali aktif cüruf ve cüruf bazlı bir GP arasındaki farkın, ikinci materyalin metakaolin $AL_2Si_2O_7$ içerdiğini öne sürmüştür. Bu esasen RILEM komitesi tarafından verilen açıklama ile aynıdır. AAM'lerin çoğu reaksiyon ürünü olarak C-S-H'ye sahipken, GP'ler reaksiyon ürünleri 3D alümino silikat ağından yapılıdır, AAM'lerden sodyumun ayrıştırılması, kristalin zeolit içeren GP'lerin katyon değişim özelliklerine eşdeğerdir. Alümina içeriği ne kadar yüksek olursa, AAM'lerin çözeltide Na^+ 'yı H^+ ile değiştirme yeteneği o kadar yüksek olur (Munthali, Elsheikh et al. 2014). NaOH ve MK bazlı poli (sialat), bu düşük Si/Al geopolimer kategorisine aittir. AAM'lerle ilgili çeşitli kapsamlı incelemeler mevcuttur (Roy 1999). Örneğin, Shi (Shi, Jiménez et al. 2011) bu sistemlerin karmaşıklığını ve ham maddelerin olası permütasyonlarını tanımlamıştır. Ham madde olarak farklı endüstriyel atıkları benimseyen birçok başka geopolimer türü çalışılmıştır [46]. Pirinç kabuğu külleri, hurma yağı yakıt külleri, çamurların yakma ürünleri, kömür dip külleri, siliko-manganez cürufu, kırmızı çamur gibi mineral işleme atıkları ve maden atıkları, petrol rafinerilerinden katalizör artıkları, atık camları ve seramikler. Davidovits kitabında (Davidovits 2013) GP'leri kaolinit, metakaolin, cürufli metakaolin, kaya bazlı geopolimer (Fe_2O_3) içeren kalsine killere dayalı, silika esaslı geopolimerler (pirinç kabuğu veya silis dumanına dayalı), uçucu kül bazlı geopolimerlere göre sınıflandırdı. Bir çok araştırmacının AAM terimini kullanmamayı tercih etmesinin nedeni, agrega ve kalsiyum hidroksit arasındaki genişleme, çatlak oluşumu ve beton bozulmasına yol açan PC betonundaki bir reaksiyon da dahil olmak üzere alkali silika reaksiyonları ile ilişkiden kaçınmaktır. Bununla birlikte, agrega ile alkali silika reaksiyonları AAM ve GP betonunda görülmez [38]. Alkali hidroksitler üzerinde çözünür bir silikatın avantajı, malzemelerin taşınmasını kolaylaştıran nispeten düşük pH'ta yatmaktadır. Bu konseptte dayanarak AAM'ler kullanıcı dostu (pH = 11 ila 13) veya kullanıcı dostu (pH = 13 ila 14.2) olarak ayrılabilir. Bu konuda, $SiO_2/Na_2O > 1.28$ oranında çözünebilir silikatlar kullanan GP'lerde yeni bir "Uçucu kül bazlı ve kullanımı zararsız geopolimer çimento" (Davidovits, Davidovits et al. 2012) verilmiştir. Bu yazıda alkali ile aktive edilen metakaolin'i GP'ler olarak ele alınacaktır. Genel olarak, alkaline hidroksitler veya silikatlar tarafından yüksek pH altında aktive edilen alüminosilikat bağlayıcı malzemeler koşullar geopolimerler olarak sınıflandırılır (Provis and Van Deventer 2009).

2.3 Geopolimer Bileşenleri

Bildirilen GP bileşimlerinin ve işleme koşullarının geniş aralığı, olası geniş uygulama aralıklarını yansıtır. GP ucuz, yangına dayanıklı, PC ile karşılaştırıldığında düşük miktarda CO_2 işleme sırasında yayılabilir, hızlı bir şekilde oda sıcaklığında yüksek basınç mukavemeti ayarlayabilir ve geliştirebilir, düşük geçirgenlik ve düşük termal iletkenlik, aside dayanıklı, düşük büzölmeye sahip olabilir, kation değişim kapasitesi yüksektir (Juenger, Winnefeld et al. 2011). Bununla birlikte, GP' nin bileşimi ve hazırlanmasının, uygulamaya bağlı olarak istenen özellikleri en üst düzeye çıkarmak için uyarlanması ve çoğu zaman taviz verilmesi gerekmektedir. Duxson'un gözlemlendiği gibi: “İnorganik polimerler, tüm malzeme seçim problemleri için evrensel bir her derde deva olarak düşünülmemeli, daha ziyade doğru karışım ve işleme tasarımı ile uyarlanabilecek bir çözüm olmalıdır”. Davidovits'e göre geopolimerlerin özelliklerini düzenleyen ana parametre, silika-alümina oranıdır (Davidovits 2002). Düşük ve yüksek mukavemetli beton, tuğla ve fayanslar, ateş ve aside dayanıklı kaplama ve madencilik ve nükleer atık kapsülleme için bağlayıcılar gibi alternatif yapı malzemeleri olarak uygulamalar bulunmaktadır. Yüksek Si / Al oranı, kalıplama için seramik, yangına dayanıklılık ve ısıya dayanıklı kompozit gibi uygulamalarla yüksek sıcaklıkta ve yangında stabiliteye sahip geopolimere yol açmaktadır. Örneğin, metakaolin, çürük ve potasyum silikatlara dayanan GP' ler aşağıdaki uygulamalarda kullanılabilir (Davidovits 2002). Örneğin; Yangına dayanıklı ahşap paneller, yalıtımlı paneller ve duvarlar, dekoratif taş eserler, ısı yalıtımı için köpüklü (genişletilmiş) geopolimer paneller, düşük teknoloji yapı malzemeleri, enerji düşük seramik karolar, refrakter ürünler, termal şok refrakter, alüminyum döküm uygulaması, geopolimer çimento ve beton, altyapı onarım ve güçlendirme için yangına dayanıklı ve yangına dayanıklı kompozit, yanmaz yüksek teknoloji uygulamaları ve kaplamaları, uçak iç, otomobil ve yüksek teknoloji reçine sistemleri. Geopolimer teknolojisi, kırmızı çamur ve maden atıkları gibi endüstriyel yan ürünlerin geri dönüşümü ile bağlantılı olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Kil mineralleri içeren tehlikeli endüstriyel yan ürün, stabilizasyon amacıyla bir öncü malzeme (Ahmari, Zhang et al. 2012) üretmek veya çimentolu harcı dolgusu için bir bağlayıcı olarak kullanılmak üzere orta

sıcaklıklarda kalsine edilebilir ve aktive edilebilir . Son olarak GP'ler, geopolimer yapıların ve eserlerin 3D baskısı gibi gelecekteki teknolojilerde Portland çimentosunun yerini alabilir. Geopolimer köpükler iyi ısı yalıtım özelliklerine sahiptir (Prud'Homme, Michaud et al. 2011); ayrıca, atık sudan bakır ve amonyak gidermek için de kullanılabilir (Bai, Franchin et al. 2017).

Farklı ham maddeler kullanılarak elde edilen GP' lerin ve farklı bağlayıcıların seçilmiş özelliklerini göstermektedir (Duxson, Provis et al. 2005)'da derlenen veriler nicel değil, birbirleriyle karşılaştırıldığında malzeme performansının bir göstergesidir. PC' lerin temel avantajları düşük maliyetleri, işlenebilirlikleri ve düşük sıcaklık reaktiviteleri; aksine GP' lere kıyasla düşük dayanıklılığa ve kimyasal dirence sahiptir (Palomo, Blanco-Varela et al. 1999) ve nispeten düşük sıcaklık direncine sahiptirler. Cüruf bazlı GP' ler oda sıcaklığında hızla sertleşebilir ve tipik olarak 30 ila 70 MPa aralığında nispeten yüksek serbest basınç dayanımına sahip olabilir. Ancak kimyasal dirençleri düşük kalsiyum GP' lerinden daha düşüktür ve önemli fonksiyonel özellikleri yoktur. Ana uygulamaları düşük CO_2 sağlayan çimento ve beton olup Wagner gibi şirketler “Toprak Dostu Çimento” olarak bilinen bu malzemeyi geliştirip başarıyla uygulamaktadır. Cüruf ve uçucu kül gibi endüstriyel atık ürünü kullanan GP' ler, termal olarak aktif killer kullanan GP' lerden genellikle daha ucuzdur. Çünkü kalsinasyon işlemi yoktur. GP ham maddelerinin en yüksek maliyeti genellikle aktive edici çözeltilerdir, özellikle sodyum silikat sodyum hidroksitten çok daha pahalıdır (yani tipik olarak 800\$/ton ve 125\$/ton) ve sentezi daha yüksek CO_2 emisyon değerleri ile ilişkilidir. Çözünür silikatlar sodyum hidroksitler ile karşılaştırıldığında düşük sıcaklıklarda sertleşme reaksiyonunu geciktirebilse de (De Silva, Sagoe-Crenstil et al. 2007), daha yoğun bir mikro yapıya ve ortaya çıkan GP' nin daha yüksek serbest basınç dayanımına yol açtıkları ve kimyasal direncini arttırdıkları yaygın olarak kabul edilmektedir. Öte yandan, çözünür silikatın kullanılması GP'lerin kristalliğini azaltır, katyon değişim kapasitelerini azaltır ve erime noktalarını yaklaşık 1256 °C' den 1065 °C' ye düşürür, Genellikle geopolimerler albit ve nefelin kristal fazları içermez, şekilsizdir veya zeolitler olarak kristalleşir. Bununla birlikte, bu iki faz geopolimerler yüksek sıcaklıklarda, T= 800°C ısıtıldığında oluşabilir. Uçucu kül bazlı GP'ler genellikle küresel morfolojisi nedeniyle işlenmesi en

kolay yöntemken, metakaolin bazlı GP' ler daha yüksek viskoziteye sahiptir ve bu nedenle işlenecek ek su veya çözelti gerektirir (örn. Dökme), bu da genellikle gözenekliliği artırır ve nihai ürünü zayıflatır (Palomo, Blanco-Varela et al. 1999). Sentetik zeolitler, yüksek oranda seyreltilmiş çözeltiler halinde hazırlandıkları ve dolayısıyla bağlayıcı özelliklere sahip olmadıkları için çimento değildir.

GP' lerin çimentolarının ve betonlarının PC' ye düşük bir CO_2 oluşum alternatifi olarak yaygın kullanımının önündeki ana engellerden biri, düzenleyici kurumlardan, yani PC' in kullanımını zorunlu kılan ASTM C150 ve ASTM C595'in koruyucu niteliğinden kaynaklanmaktadır. Avrupa'da EN 206-1 ve EN 197-1 standardında da durum böyledir. GP'lerin ve AAM'ların kullanımına izin veren tek mevcut standart, ABD'deki 50 eyaletten sadece 5'inde kabul edilen performansa dayalı ASTM C1157 (Juenger, Winnefeld et al. 2011) 'dur (Provis, Brice et al. 2014).

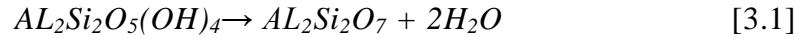
3. DENEY MALZEMELERİ

3.1 Ana Malzemeler

3.1.1 Metakaolin (MK)

Metakaolinit olarak da adlandırılan metakaolin, kaolinit olarak da adlandırılan kaolin kalsinasyonu 600°C ila 750°C'de 'de ısıtım işlemi (Fabbri, Gualtieri et al. 2013) ile elde edilen amorf reaktif bir alümin silikattır. Dehidroksilasyon reaksiyonu aşağıdaki forma sahiptir:

Kimyasal reaksiyon



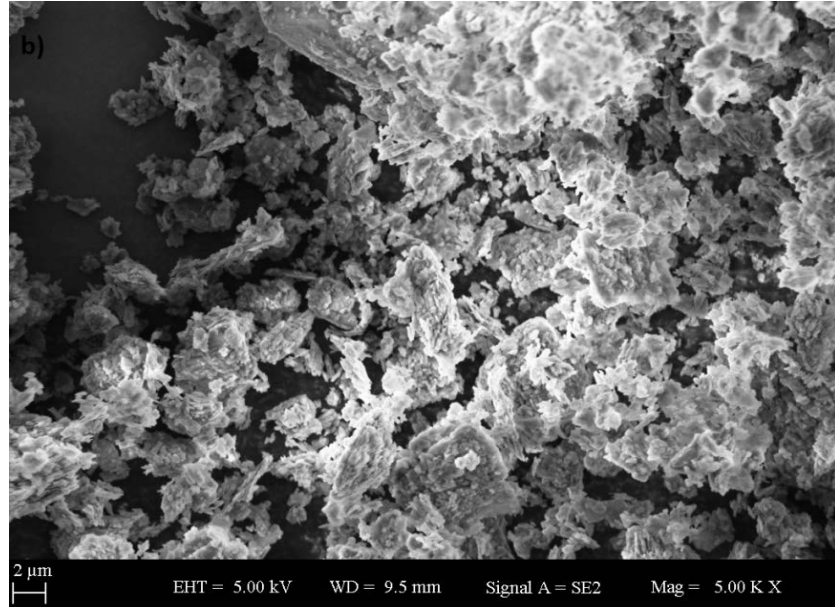
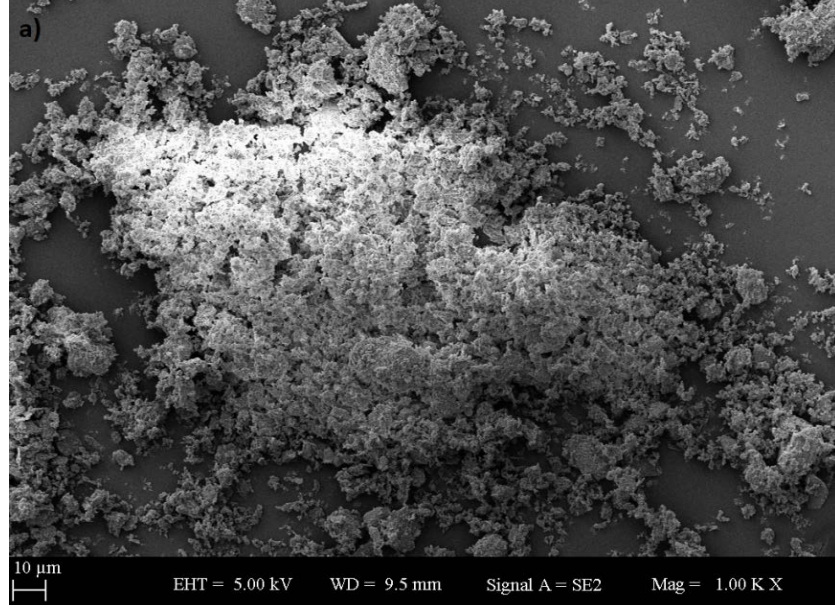
Reaksiyon kinetiği hem fırın teknolojisine hem de çalışma sıcaklığına bağlıdır. Kaolinin hidrosillenmesi termogravimetrik analiz (TGA)-diferansiyel termal analiz (DTA) ile incelenmiştir ve reaksiyonun maksimum hızı 530°C ' dadir; bununla birlikte XRD analizi, sıcaklık 650°C 'den yüksek olduğunda kaolinitin tamamen reaksiyona girdiğini gösterir. Spesifik yüzey alanı 750°C 'de maksimuma ulaşır, daha sonra metakaolin parçacıklarının sinterlenmesi meydana gelir ve böylece reaktiviteleri azalır. Kalsinasyon sıcaklığı 980°C 'den yüksekse, metakaolin alüminasilika spinel $AL_4Si_3O_{12}$, mullit $AL_6Si_2O_{13}$ ve silikaya ayrışır (MacKenzie, Brown et al. 1985). Dolayısıyla, iyi metakaolin reaktivitesi için optimum kalsinasyon sıcaklığı 750°C ± 100°C 'dir; daha düşük veya daha yüksek sıcaklık kullanımı, daha düşük reaktivite maddelerine ve daha düşük kaliteli geopolimerlere yol açar.

Metakaolinin farklı reaktivitesi, alüminyum atomlarının koordinasyonuna göre açıklanabilir. Dehidroksilasyon sırasında oktahedral alüminyum iki farklı konfigürasyona bürünebilir, dehidroksilasyon mekanizmasına bağlı olarak tetra koordineli veya penta koordineli olabilir. Üçlü koordineli alüminyum atomlarının küçük bir yüzdesinin varlığı da gözlenmiştir. X-ışını ve nötron çifti dağılım fonksiyonu verileri ve yoğunluk fonksiyonel modellemesi ayrıca tokalı

alümina tabakasının silika tabakasında nasıl bozulmaya neden olduğunu göstermiştir (MacKenzie, Bowden et al. 1991) (Davidovits 2013). Kaolinitin mineral yataklarının çoğu, çoğunlukla kuvars SiO_2 , halloysit $AL_2Si_2O_5(OH)_4$ ve TiO_2 olmak üzere en az 5% safsızlık içerir. Geopolimerizasyon işlemi sırasında safsızlıkların etkisini en aza indirmek için sentetik metakaolin hazırlanabilir. Bu, TEOS ve alüminyum nitrat veya alüminyum izopropoksit, kullanılarak sol-jel yoluyla ve sterik yakalama yöntemi ile elde edilebilir (Tsai, Hanna et al. 2010) (Bernal, Krivenko et al. 2014). Bu yaklaşımların diğer avantajları, MK'nin farklı stokiometriye ve döküm için daha az su gerektiren bir morfolojiye sahip olmasını sağlar. Bununla birlikte, sentetik MK kendi yan ürünlerini içermekteydi, bu nedenle MK tabanlı GP ile ilgili çoğu çalışma safsızlıkları içerir; etkileri bilinmemektedir, ancak alkali çözeltilerde çözülmemesi gerektiği için ihmal edilebilir olarak kabul edilmektedir. Kaolin, Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. İnç. (İstanbul / Türkiye), özgül ağırlığı 2.52 g/cm^3 'tür, bu kaolin tozu 700°C dört saat boyunca $1^\circ\text{C} / \text{dk}$ ısıtma hızında kalsine edilerek şaşırtıcı derecede reaktif bir metakaolin elde edilmiştir. Silika + alümina + demir oksit oranı $=\% 97.18 > \% 70$, ayrıca metakaolin reaksiyonu arttıran ince taneciklere sahiptir.

Çizelge 3.1: Metakaolinin kimyasal bileşenlerinin analizi

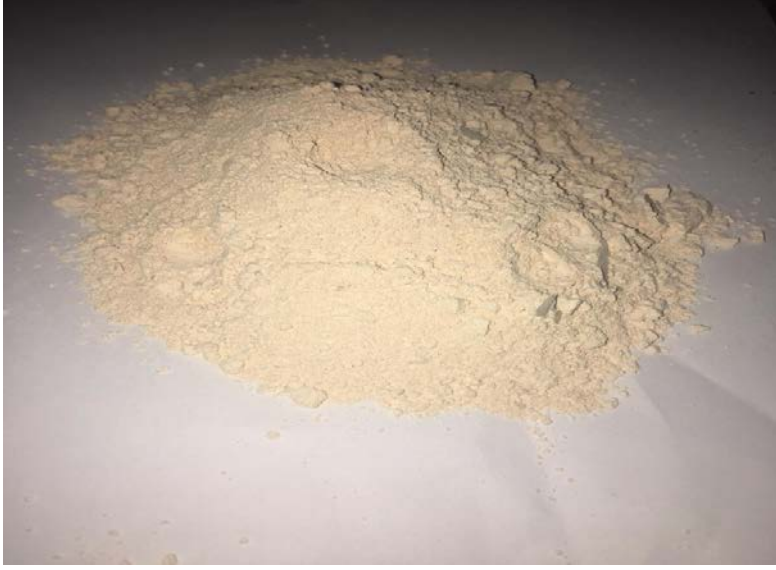
Kimyasal analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Metakaolin (MK)	56,1	40,2	0,85	0,55	0,1	0,16	0,5	0,24	-



Şekil 3.1: Metakaolin numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş

Çizelge 3.2: Metakaolinin fiziksel özellikleri

No	Özellikler	Test sonuçları
1	Metakaolinin özgül ağırlığı g/mm ³	2,52
2	İncelik, yüzde 45 µm elek üzerinden geçen	%99,3
3	İncelik, yüzde 20 µm elek üzerinden geçen	%96,9



Şekil 3.2: Metakaolin

3.1.2 Kırmızı çamur (KÇ)

Kırmızı çamur, Bayer prosesi ile boksitten alümina üretiminden kalan tortudur. Bu tortular, hematit ve goetit karışımları formunda ağırlıkça %20 ila %50 arasında demir oksit içerir. Bu nedenle demir üretimi için bir kaynak olabilirler ve bu nedenle cevherlerden geleneksel üretim yöntemine bir alternatif olabilirler. XRD analizi, boksit kalıntılarını oluşturan mineralojik fazları tanımlamayı mümkün kılmıştır (Tablo 3.3). İkincisi, Bayer işlemi sırasında oluştu veya orijinal cevherde mevcuttu ve bu nedenle süreçte reaksiyona girmemiştir. Kalıntıların bileşimi Rietveld'in saflaştırılması ile belirlenmiştir. Arıtma yöntemi, kullanımdaki mineralojik fazlar için piklerin konumunun ve hatların yoğunluğunun yorumlanmasından oluşur. Böylece, simülasyonu gerçekleştirmek için kullanılan fazlar ve oranlar şunlardır:

- Hematit (Fe_2O_3) ve goetit ($FeO(OH)$), kütle olarak sırasıyla % 22.7 ve % 22 içerikte.
- - Anataz (TiO_2) ve perovskit ($CaTiO_3$) formunda titanyum dioksit, kütlece sırasıyla % 4 ve % 5.3.
- -Son olarak alüminosilikatlar kansrinit formunda olacaktır ($Na_3(Al_6Si_6)O_{24})(OH)_{2,04}(H_2O)_{2,66}$), kütle olarak % 30 mertebesinde içerik.

Kullanılan kırmızı çamur Seydişehir Alüminyum Fabrikası'ndan (Konya / Türkiye) getirilmiştir. Örnekler (Şekil 3.3) doğrudan depolama alanından alınmıştır. Kimyasal bileşimleri Tablo 3.3 'de sunulmaktadır.

Çizelge 3.3: Kırmızı çamurun kimyasal bileşenlerinin analizi

Kimyasal analiz (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Kırmızı çamur (KÇ)	17,38	24,52	35,25	-	3,22	0,42	0,43	8,45	-



Şekil 3.3: Kırmızı çamur

3.1.3 Granüle yüksek fırın cürufu (GYFC)

Yüksek fırın cürufu en çok kullanılan cürüflardandır. ASTM Standardına göre, yüksek fırın cürufu esas olarak demir ile erimiş bir durumda bir yüksek fırın içinde üretilen kalsiyum silikatlar ve kalsiyum alümino silikatlardan oluşan metalik olmayan bir üründür.

- - Bir elektrik ark ocağında, hurdadan çelik üretimi sırasında elektrik çelik işlerinden elde edilen cüruf.
- - Pik çelikteki bir pik dönüştürücüde pik demirin çeliğe dönüşmesinden kaynaklanan dönüşüm cürufu.

Çelik üretim cürufunun kimyasal bileşimi, büyük ölçüde kullanılan ham maddeler (pik demir, hurda, vb.) üretim süreci sırasında eklenen kimyasal ürünlere veya bileşiklere bağlıdır. Sektöre bağlı olarak, bu malzemeler farklı özelliklere sahip olabilir. Çelik üreticileri tarafından en sık kullanılan ürünler

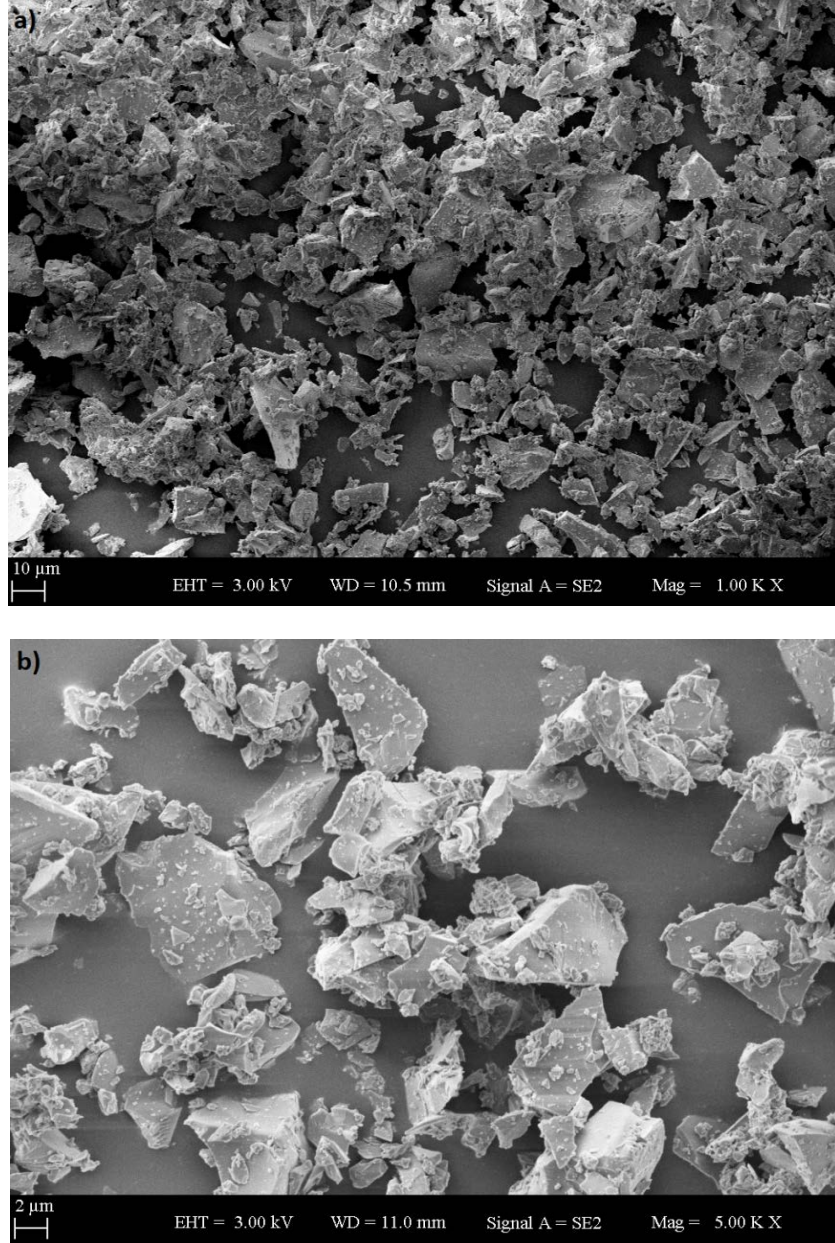
şunlardır: genellikle çiğ gıdaların pişirme yeteneğini geliştirmek için kullanılan florit CaF_2 ; boksit veya haddehane kamışlarıdır. Erimiş banyoda istenen karbon seviyesine ulaşıldığında, istenen çelik derecesini elde etmek için dönüştürücüye çeşitli kimyasal ilaveler eklenir. Dolayısıyla dönüşüm çeliği cürufu, ilk eriyikte bulunan mineralleri ve rafine edilmiş çelik gölgeyi elde etmek için kullanılan kimyasal ilavelerin mineral fraksiyonunu içerir. Dönüşümün sonunda, cüruf yoğunluk farkıyla çelikten ayrılır. Daha sonra yavaşça soğuduğu açık çukurlara dökülür. Bazen gerçekten bir söndürme olmadan su serpilir. Maksimum hurda miktarı daha sonra mekanik veya manyetik olarak geri kazanılır ve elde edilen kaya ezilir ve elenir. Tonlarca çelik başına ortalama 100 ila 200 kg cüruf üretilir. Cürufunun ortalama kimyasal bileşimi CaO'da %45 ila %60, SiO_2 ' de %10 ila %15, Al_2O_3 ' te %1 ila %5, FeO' da %7 ila %20 ve MgO' da %3 ila %13 'tür. Çimentoların karakteristiği olan üç oksit CaO, SiO_2 ve Al_2O_3 tutularak, klinkerin yakınındaki üçlü diyagrama yerleştirilirler. Bununla birlikte, demir bakımından daha zengindirler ve kireç sadece kısmen birleştirilir; bu nedenle, önemli miktarda serbest kireç içeren klinkerden farklı bir mineralojiye sahiptirler. Cürufun özgül ağırlığı $2.91g/cm^3$ 'tür ve 45 mikron elek üzerinde kalan miktar %1,4' tür ve karışımın %13' ünde kullanılmıştır.

Çizelge 3.4: Cürufun kimyasal bileşenlerinin analizi

Kimyasal analizi	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
Cüruf (%)	40,55	12,83	1,1	-	32,58	5,87	-	0,79	0,18



Şekil 3.4: Cüruf



Şekil 3.5: Cüruf numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş

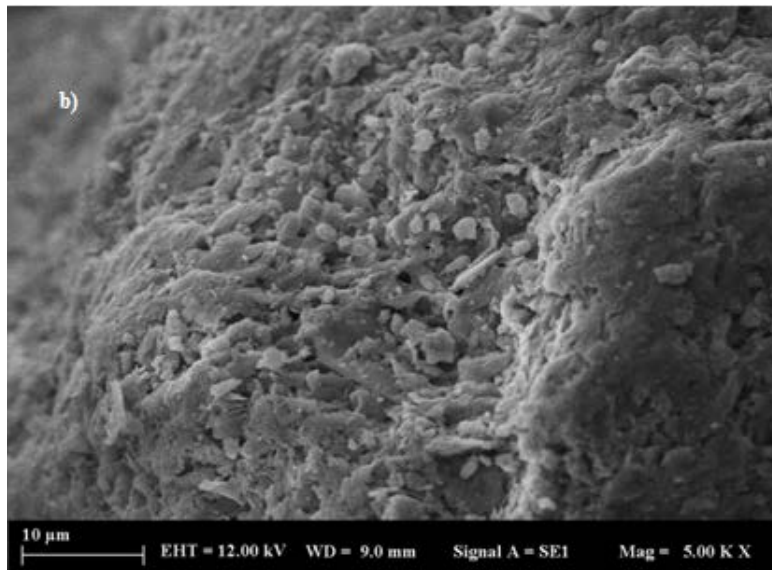
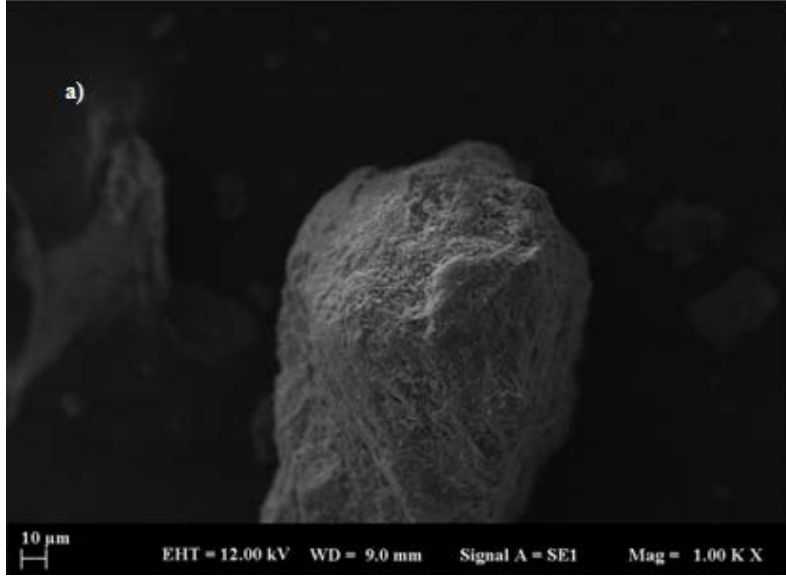
3.2 Dolgu Malzemeleri

3.2.1 Dere kumu

Bu çalışmada agrega olarak yapılan TS 706 EN 12620'ye karşılık gelen 0,25 mm'den daha küçük parçacık çapına sahip dere kumu kullanılmıştır.



Şekil 3.6: Dere kumu



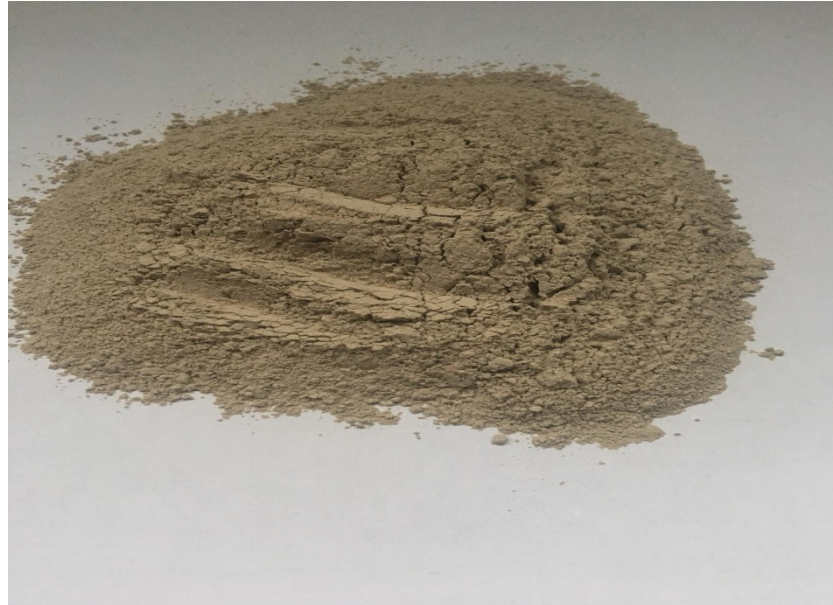
Şekil 3.7: Dere kumu numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş

3.2.2 Kireçtaşı

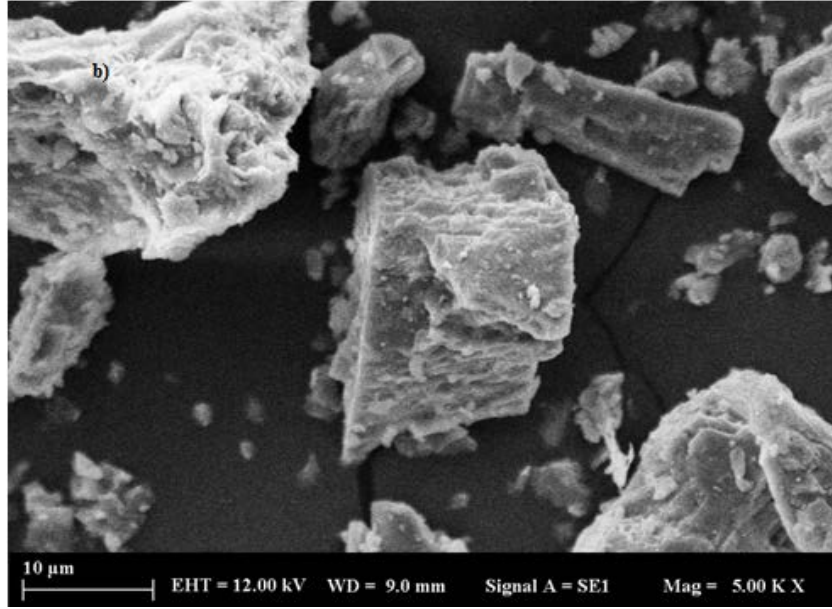
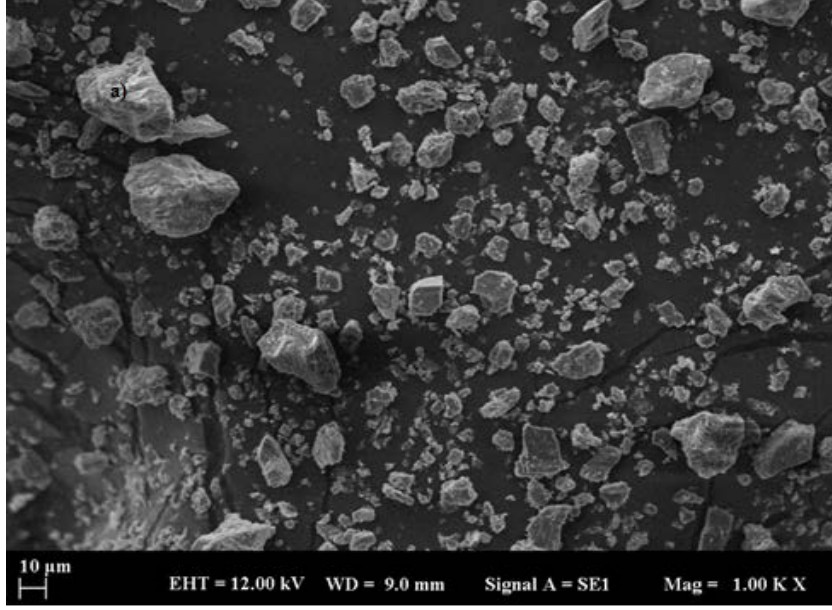
Kireçtaşı düşündüğünüzden daha fazla günlük ürünlerde kullanılır. Kireçtaşı, kabuklar veya iskeletler gibi çok uzun süre sıkıştırılmış inorganik kalıntılardan oluşan tortul bir kayadır. Kireçtaşında bulunan ana element kalsiyum karbonattır, ancak beyazlığı ve sertliği etkileyen magnezyum, demir veya manganez de içerebilir. Kireçtaşı, inşaat malzemelerinde kullanılan ana bileşenlerden biridir, ancak günlük hayatta da birçok kullanım alanı vardır. Kireçtaşı hemen hemen tüm yapı malzemelerinde kullanılır. Kireçtaşı kil ile eklenir ve kum ve su ilave edilerek harç haline getirilebilen çimento oluşturmak üzere ısıtılır. Harç, tuğlaları ayarlamak ve kurduğunda yapıştırıcı görevi yapmak için kullanılır. Kireçtaşı beton ve asfalt dolgularda da kullanılır. Kireçtaşı tozu Gebze Rock Quarry' dan (Gebze / Türkiye) temin edilmiştir.

Çizelge 3.5: Kireçtaşı özellikleri

Kimyasal analizi (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	CaO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Kireçtaşı (LS)	3,3	0,82	0,58	-	-	92,9	-	-	1,18



Şekil 3.8: Kireçtaşı



Şekil 3.9: Kireçtaşı numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş

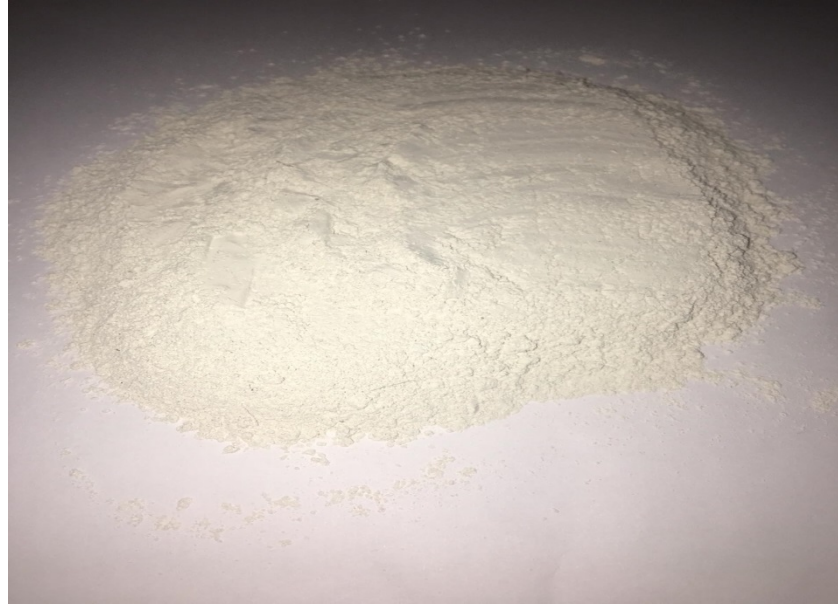
3.2.3 Mermer tozu

Mermer tozu, inşaat mühendisliği ve inşaat malzemeleri de dahil olmak üzere bir dizi disiplini kapsayan en aktif araştırma alanlarından biridir. Mermer endüstrisi, üretim süreçlerinde ortaya çıkan gelişmelerden bağımsız olarak kaçınılmaz olarak atık üretmektedir. Mermer endüstrisinde yaklaşık %50 ila %60 üretim atığı oluşmaktadır. Bu atıklar günümüzde toplumda birçok çevresel toz sorunu oluşmaktadır. Sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için uygun bir yönetim şekline ihtiyaç duyulmaktadır. Mermer tozu, Türkan şirketinden

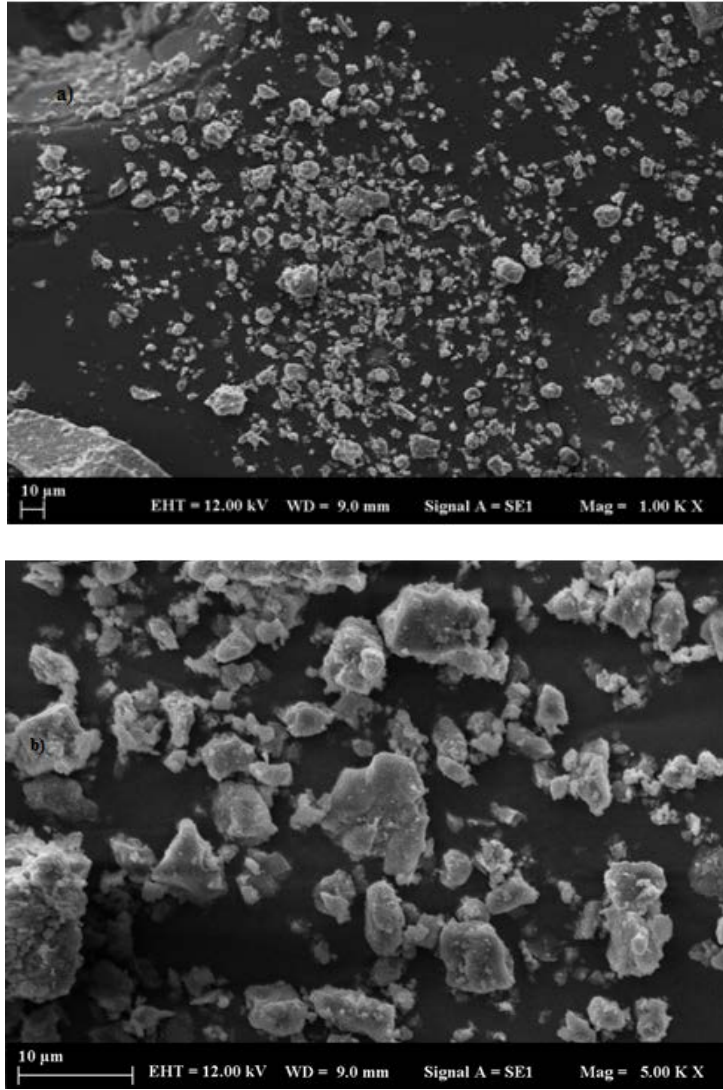
(Alibeyköy / İstanbul) temin edilmiştir ve 24 saat boyunca 105 °C' de kurutulmuştur.

Çizelge 3.6: Mermer tozu özellikleri

Kimyasal analizi (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	CaO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Mermer tozu (MR)	1,12	0,73	0,05	-	-	83,22	-	-	0,56



Şekil 3.10: Mermer tozu



Şekil 3.11: Mermer tozu numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş

3.2.4 Bazalt tozu

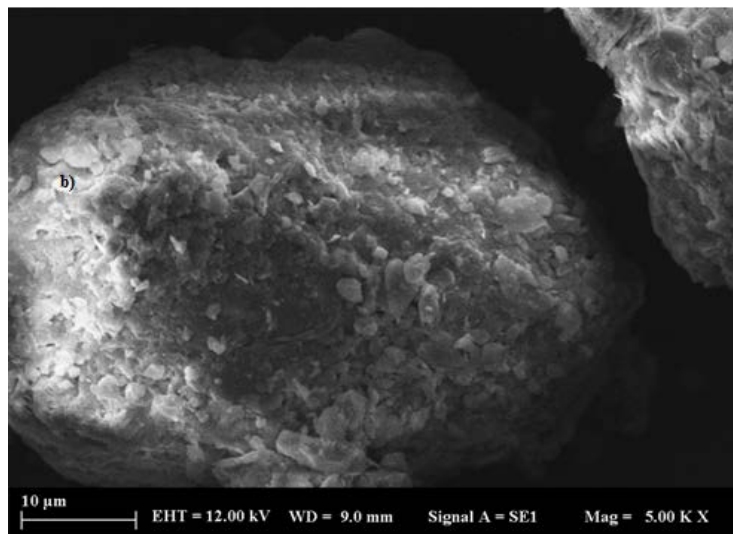
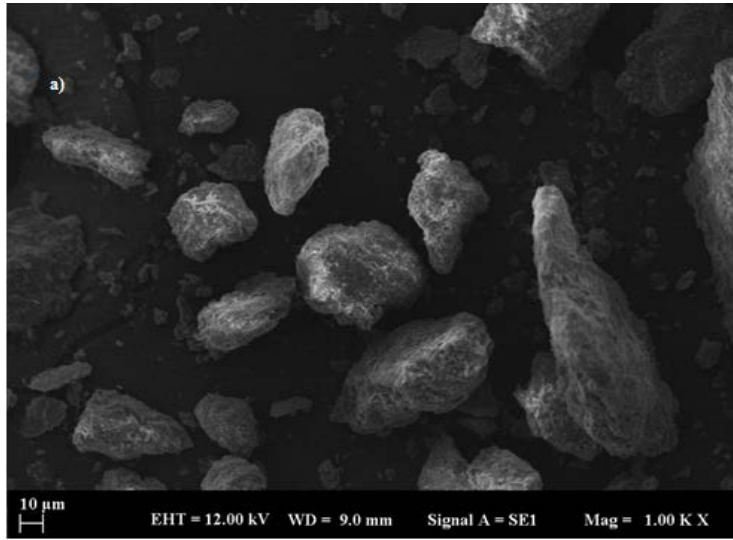
Bazalt tozu, taş ocaklarında taş kırmanın bir yan ürünüdür. Toplanan tozların yüksek miktarları, bertaraf, çevre kirliliği ve sağlık riskleri açısından büyük bir sorundur. Mineral tozların betonda katkı maddesi olarak kullanılması bu problemlerin çözülmesine katkıda bulunabilir. bazalt örnekleri homojenleştirilip, 105 °C' de 24 saat kurutulmuştur. INCI Group şirket'ten (Sakarya / Türkiye) bazalt tozu temin edilmiştir.

Çizelge 3.7: Bazalt tozu özellikleri

Kimyasal analizi (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	CaO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Bazalt tozu (BZ)	56,9	17,6	8,1	0,9	7	-	1,9	3,8	-



Şekil 3.12: Bazalt tozu



Şekil 3.13: Bazalt tozu numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş

3.3 Aktivatör çözeltileri

Aktivasyon işleminde kullanılan alkali çözelti, sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat çözeltileri karıştırılarak hazırlanmıştır. Merck firmasından alınan NaOH çözeltisi 12M'lik konsantrasyonla damıtılmış su içinde NaOH parçacıklarının (% 99 saflıkta) eritilmesi ile hazırlanmıştır. $NaSi_2O_3$ çözeltisi, $SiO_2/Na_2O=3.29$ molar oranına sahip olup Merck firmasından temin edilmiştir ($Na_2O = \%8.2$, $SiO_2=\%27.0$). Tez çalışmasında, sodyum silikat çözeltisi/sodium hidroksit çözeltisi oranı 2 olarak karışım yapılmıştır. Sodyum hidroksitin ve sodyum silikatın kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 3.8.-3.9.'de verilmiştir.

Çizelge 3.8: Sodyum hidroksitin özellikleri

NaOH	Na ₂ CO ₃	Cl	SO ₄	Al	Fe
99,1	0,3	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,002	≤ 0,002

Çizelge 3.9: Sodyum silikatın özellikleri

Na ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	Yoğunluk (20°C)	(gr/ml)	Fe (%)	Ağır metaller (Pb gibi) (%)
8,2	27,0	1,360		≤ 0,005	≤ 0,005

4. YÖNTEM VE DENEYLER

4.1 Deneysel Çalışmalar

Tez kapsamında 300 x150 mm silindir 50x50x50 mm küp ve 40x40x160 mm prizma numuneler üretilmiştir. Mekanik deneyler kapsamında basınç, eğilme dayanımı, boşluk oranı, yarma çekme ve ultrases geçiş hızı deneyleri üretilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Durabilite deneyler kapsamında aşınma, yüksek sıcaklık ve donma çözülme deneyleri yapılmıştır. Mikro yapı analizi kapsamında Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) ve X-Işını Kırınım Yöntemi (XRD) analizleri de yapılmıştır.

4.1.1 Basınç dayanım testi

Geopolimer harç örnekleri, 50x50x50 mm küp üretilmiştir. TS EN 196-1, 2012'ye (Testing and Cement 2013) uygun biçimde basınç dayanımı deneyi otomatik test cihazında metal kırma başlığı ile uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyleri (7, 28 ve 56 günlük) uygulanmıştır. Araştırmada geopolimer harcın basınç dayanımını hesaplanmak için üç deney numunesinin ortalama basınç dayanımı alınmıştır. Numunelerin nihai yük ile kesit alanı arasındaki oran denklemine göre basınç dayanımı bulunmaktadır. Numune kırılıncaya kadar devam ettirilen bu işlem kırılma anında durdurulur. Kesit alanı önceden bulunmuş alan numunenin, kırılmasını sağlayan kuvvet miktarı kesit alanına oranlanarak basınç mukavemeti tesbit edilir.

$$\sigma = P/A$$

σ : Basınç dayanımı, (N/mm²),

P: Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

A: Kesit alanı



Şekil 4.1: Basınç dayanımı testinin küp numunelerde uygulanması

4.1.2 Eğilme dayanım testi

Geopolimer harç numunelerin eğilme dayanımı sonuçlarını tespit etmek için 40x40x160 mm prizma numuneler kullanılmıştır. TS EN 1015-11 (ASTM 2013)'e göre uygun olarak numuneler otomatik test makinesi ile tek noktadan yükleme testi yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyleri 7, 28, ve 56 günlük numunelerde uygulanmıştır. Eğilme dayanımını hesaplamak için üç deney numunesinin ortalama basınç dayanımı alınmıştır. Bu deney ortadan ve üçte bir noktasından yüklenmiş basit kiriş metodları ile yapılır. Ortadan yüklenmiş basit kiriş metodunda numuneye orta noktasından, tekil bir yük uygulanır, üçte bir noktasından yükleme ise numune üzerinde iki tekil yük eşit aralıklarla uygulanarak yapılır.

Eğilme dayanımı, aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır.

$$\text{Eğilme dayanımı } \sigma = 3PL/2bd^2$$

σ : Eğilme dayanımı, (N/mm²)

b: Prizma kesitinin eni (mm),

d: Prizma kesitinin yüksekliği (mm),

P: Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

L: Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm) dir.



Şekil 4.2: Eğilme dayanımı testinin prizma numulere uygulanması

4.1.3 Yarma çekme testi

Geopolimer harç numunelerin yarma çekme dayanımı sonuçlarını tespit etmek için 300x150 mm silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Silindir yarma metodunda uygulanan yük yüzeyi, uzun kenar (30 cm'lik boy kısmıdır) olmaktadır. Özel bir düzenele yük uygulanan bu yüzeyin kırılması için gerekli yük miktarı tespitine dayanır.

$$\sigma = P/A$$

σ : Basınç dayanımı, (N/mm²),

P: Silindirin kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

A: Kesit alanı



Şekil 4.3:Yarma çekme dayanımı testinin silindir numulere uygulanması

4.1.4 Ultrases geçiş hızı testi

Ultrases Geçiş Hızı Yönteminde (UPV-Ultrasonic Pulse Velocity), test edilmek istenen geopolimer harç bir yüzüne ses üstü atım uygulanarak, Geopolimer harç içerisinde basınç dalgaları oluşturulur. Ultrason Geçiş Hızı Yönteminde kullanılan test cihazı, ses üstü dalgaların, gönderilen yüzey ile alındığı yüzey arasındaki mesafeyi ne kadar sürede kat ettiğini belirlemektedir. Böylece, ses üstü dalgaların geopolimer harç numune içerisinde geçiş hızı hesaplanabilmekte ve buradan da, geopolimer harç dayanımı ve bazı diğer özellikleri hakkında yorum yapılabilmektedir. Geopolimer harç kalitesinin sismik yöntemlerden, ultrasonik P ve S dalga hızları ile geopolimer harç dayanım değerleri arasında deneysel ilişkiler kurulabilmesi ve bu dalga hızlarından elastik parametrelerin hesaplanabildiği bilinmektedir. Bu amaçla yoğunlukları $2,2-2,6 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişen, standart numunelerle ve yapılardan alınan silindirik ya da kübik geopolimer harç örnekleri üzerinde basınç dayanımı deneyi yapılmadan önce basınç (P) ve kayma (S) dalga hızları belirlenir.



Şekil 4.4: Ultrases geçiş hızı testi cihazı

4.1.5 Boşluk oranı, su emme ve birim hacim ağırlık deneyleri

Geopolimer harç üretilen numuneleri 50x50x50 mm boyutlarındaki 48 saat süresince etüde tutularak değişmez ağırlığa getirilip fırın kuru ağırlığı (A) tespit edilmiştir. Daha sonra 48 saat boyunca su içinde bekletilip oda sıcaklık koşullarında bekletilmektedir. Çıkarıldıktan sonra doymun kuru yüzey ağırlığı (B) bulunmuştur. Su içindeki ağırlığı (C) Arşimed prensibine göre tespit edilmiştir. Birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme sonuçları aşağıdaki bağıntılar vasıtasıyla belirlenmiştir.

$$\text{Birim hacim ağırlık (g/cm}^3\text{)} = A/(A-C)$$

$$\text{Boşluk oranı (\%)} = [(B-A)/(B-C)] \times 100$$

$$\text{Ağırlıkça su emme oranı (\%)} = [(B-A)/(A)] \times 100$$

A= Kuru haldeki tespit edilen ağırlığı

B=Doygun kuru yüzey halde tespit edilen ağırlığı

C= Su içinde tespit edilen ağırlığı



Şekil 4.5: Arşimed deney düzeneği

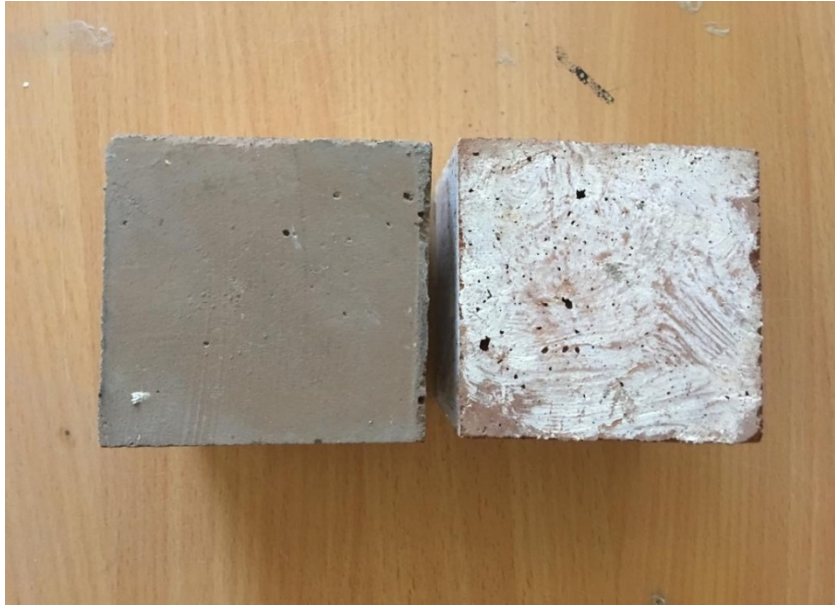
4.1.6 Aşınma dayanım testi

Geopolimer harç numunelerin aşınma nedeniyle ağırlık kaybı tespit edilmiştir. ASTM C944'e (ASTM 2013) göre test yapılmıştır. Bu deney için 71x71x71 mm küp numuneler üretilmiştir ve döner kesici aşınma makinesi kullanılmıştır. Aşınma Dayanım Testinin prosedür olarak, her bir aşınma iki dakika sürmek üzere, toplamda üç kere tekrarlandıktan sonra her bir aşınma için ağırlık kaybı ölçülmüştür. İlk aşınmadan sonra ortalama aşınma kaybı değerleri hesaplanmıştır.

1. Test adımları için numuneler yerleştirilmeden önce, disk üzerine 20 ± 0.5 g standart aşındırıcı suni korundum tozu (Şekil 4.8.) serpilmiştir. Daha sonra numuneye yük uygulanmış ve belirtilen prosedür, her bir devir sonunda düşey eksen yönünde saat yönünde 90° döndürülmüştür. Böylece diğer yüzeyler de 22 devire maruz bırakılarak toplam 4 periyot tamamlanır. Her periyot sonunda korundum tozu yenilenir. Toplam 16 periyot sonunda aşınma nedeniyle ağırlık kaybı ve mm biriminden boy azalması değişimi hesaplanmıştır.



Şekil 4.6: Böhme aşındırma aleti



Şekil 4.7: Aşınma öncesi ve sonrası durum



Şekil 4.8: Korondum tozu

4.1.7 Yüksek sıcaklık dayanım testi

Tüm üretilmiş geopolimer harç numuneleri 28 günden sonra yüksek sıcaklık fırınında 200, 400, 600 ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Deney öncesi numuneler etüvde 24 saat kurutulmuştur. Yüksek sıcaklık fırınında 5°C/dak'lık bir sıcaklık artış hızı ayarlanmıştır. İstenilen sıcaklık dereceye ulaşıldıktan sonra 1 saat boyunca sıcaklıkta geopolimer harç numuneleri tutulmuştur. Deney bittikten sonra tutulan numuneleri termik şoka uğramaması için soğumasına kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 4.9: Yüksek sıcaklık fırını



Şekil 4.10: Fırına konulan numuneler

4.1.8 Donma çözülme dayanım testi

Tüm üretilmiş geopolimer harç numuneleri 28 günden sonra donma - çözülme deneyine maruz bırakılmıştır. Her döngüde, donma periyodu 12 saat, çözülme periyodu 12 saat olarak belirlenmiş, ayrıca altı ay boyunca deneyin sıcaklık aralığı -18°C ile 4°C olarak ayarlanmıştır. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 4.11: Donma çözülme cihazı

4.1.9 Magnezyum ve sodyum sülfat etkisinin incelenmesi

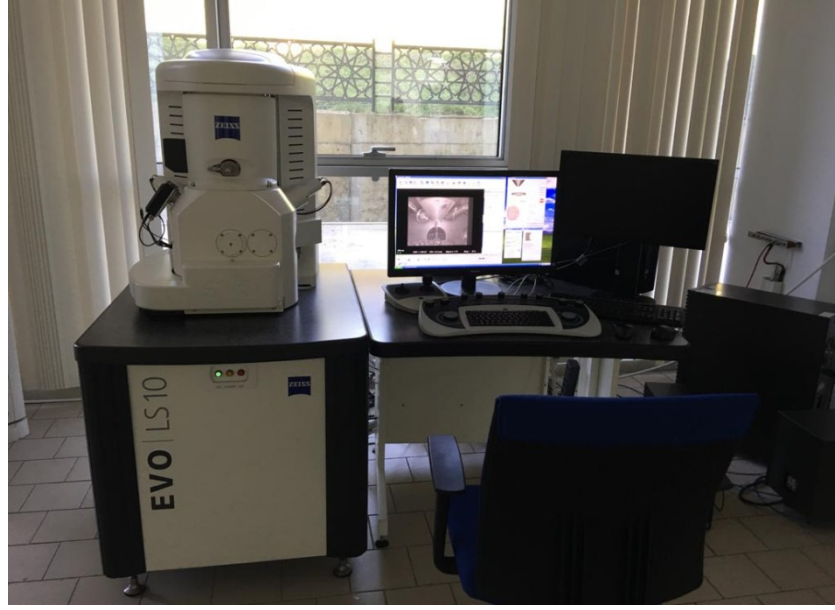
Tüm üretilmiş geopolimer harç numuneleri 28 günden sonra %10 magnezyum ve %10 sodyum sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Deney için her seriden 6 tane numune kullanılmıştır. Her iki ay magnezyum ve sodyum sülfat çözeltileri değiştirilip ve yeni çözeltiler konulmuştur. Altı ay boyunca, iki, dört ve altı ay analiz edilmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ağırlık kaybı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 4.12: Çözeltiye konulan numuneler

4.1.10 SEM analizi

SEM analizi YTÜ Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezin'de gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş geopolimer harçların durabilite öncesi ve sonrası SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizlerin görüntü dengesizliği olmadığından emin olmak için analiz öncesi bir mikro/paladyum püskürtmeli kaplayıcı cihazı vasıtasıyla numuneler kaplatılmıştır. Kaplama işlemi yaklaşık 15 dakika civarı sürmüştür. SEM analizinin çalışma prensibi, geleneksel ışık mikroskoplardan farklı olarak elektronlarla değiştirilmesine dayanmaktadır. Numunelerin SEM analizi her bir numune için sırasıyla üç dakika ve bir saat civarı sürmüştür.



Şekil 4.13: SEM cihazı



Şekil 4.14: SEM kaplama cihazı

4.1.11 XRD analizi

XRD analizi YTÜ Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezin’de gerçekleştirilmiştir. XRD cihazı, X-ışınları toz kırınım ölçümü yöntemi kullanılarak kristal tanelerinin sahip olduğu mineralojik bileşimlerinin bulunması prensibine göre çalışmaktadır.

4.1.12 Kullanılan harçın karışım özellikleri

Bu çalışmada, geopolimer uygulamasına ilişkin geopolimer performans kriterleri olarak metakaolin ve kırmızı çamur tabanlı geopolimerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı seçilmiştir. Bu çalışmada geopolimerin performansını kontrol eden ve etkileyen parametreler; kiriş taşına, mermer tozuna, ve bazalt tozuna farklı oranlarda dere kumu eklenmesi ile elde edilmiştir. Bu çalışmada incelenen karışımlar Tablo 4.1 ve 4.2' de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.1: Harçın kontrol numune karışım oranları (gr)

Metakaolin	Kırmızı Çamur	Cüruf	Na ₂ SiO ₃	NaOH (12 mol)	Dere Kumu
500	500	133	667	333	2000

Çizelge 4.2: Harçın karışım oranları (gr)

Metakaolin	Kırmızı Çamur	Cüruf	Na ₂ SiO ₃	NaOH (12 mol)	Dere Kumu	LS veya MR veya BZ tozu
500	500	133	667	333	1500	500
					1000	1000
					500	1500

Çizelge 4.3: Geopolimerin harçın karışım tanıtımı

HARÇ İSMİ	Kırmızı Çamur	Metak aolin	S.H ve S.S	CÜR UF	DERE KUM	KİREÇ TAŞI TOZU	MERMER TOZU	BAZALT TOZU	HARÇI N NO
Kontrol	50%	50%	%33- %67	13%	100%	-	-	-	1 ve 11
%25 LS	50%	50%	%33- %68	13%	75%	25%	-	-	2 ve 12
%50 LS	50%	50%	%33- %69	13%	50%	50%	-	-	3 ve 13
%75 LS	50%	50%	%33- %70	13%	25%	75%	-	-	4 ve 14
%25 MR	50%	50%	%33- %71	13%	75%	-	25%	-	5 ve 15
%50 MR	50%	50%	%33- %72	13%	50%	-	50%	-	6 ve 16
%75 MR	50%	50%	%33- %73	13%	25%	-	75%	-	7 ve 17
%25 BZ	50%	50%	%33- %74	13%	75%	-	-	25%	8 ve 18
%50 BZ	50%	50%	%33- %75	13%	50%	-	-	50%	9 ve 19
%75 BZ	50%	50%	%33- %76	13%	25%	-	-	75%	10 ve 20

4.1.13 Alkali çözeltilerin hazırlanması

Aktivatör çözeltisini hazırlamak için sodyum hidroksit peletleri bir gün önce damıtılmış saf suda çözündürülmüş, oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu, molarite cinsinden ifade edilir. Bu çalışmada kullanılan NaOH çözeltisinin molaritesi 12 Mol olmuştur (1 litre su başına $12 \times 40 = 480$ gram NaOH katı miktarı). Alkali çözeltisinin hazırlanması, $NaSi_2O_3$ çözeltisinin NaOH çözeltisi ile kütle olarak 2 kat' e eşit bir oranla karıştırılmasıyla, geopolimer üretim gününde yapılmıştır.

4.1.14 Taze geopolimer üretimi

Üretim süreci birçok aşamaya sahiptir, başlangıçta metakaolin matkap karıştırıcı kullanılarak alkali çözeltiyle karıştırılmış, daha sonra kırmızı çamur ve cüruf karışıma ilave edilmiş ve daha sonra kum ve kireç taşı ya da mermer tozu ya da bazalt tozu eklenmiş ve homojen karışım elde edilene kadar karıştırmaya devam

edilmiştir. Sulu harç, 50x50x50 mm' lik küp kalıplara, 40x40x160 mm prizmatik kalıplara, 71x71x71 küp kalıplara ve 300x150 silinder kalıplara dökülmüştür. Matkap karıştırıcı (Şekil 4.15) ile karışım yapılıp kalıplara döküldükten sonra vibrasyon masası (Şekil 4.16), sürüklenmiş havayı serbest bırakmak için döküm sırasında kullanılmıştır.



Şekil 4.15: Matkap karıştırıcı



Şekil 4.16: Titreşim masası



Şekil 4.17: 50 x 50 x 50 mm küp ve 40 x 40 x 160 mm prizma kalıplar

4.1.15 Karışımların kür yöntemi

Karıştırma işleminden sonra, numuneler 2 saat süreyle sertleşmeye bırakılmış, daha sonra kalıptan çıkarılmış ve oda sıcaklığında [23 ± 2 °C] ve [% 50 ± 4] bağıl nemde 24 saat boyunca sertleşmeye bırakılmıştır. 80°C 'de 48 saat süreyle ısı ile sertleştirilmesinden önce, numuneler, geopolimerizasyon işlemi sırasında su buharlaşmasını önlemek için yanmaz fırın poşetlerine konulmuştur (Şekil 4.18).

Sertleştikten sonra, numuneler plastik torbalardan çıkarılmış ve kapalı plastik kutulara konulmuştur. Numuneler bu çalışmanın amaçlanan testleri için 7, 28 ve 56 günlüğe kadar saklanmıştır.



Şekil 4.18: Yanmaz fırın poşetli numunelerinin fırına konulması

5. TARTIŞMA VE BULGULAR

5.1 Mekanik Özellikleri

Bu çalışmada incelenen numuneler Şekil 1'de gösterilmiştir. Kireç taşı, mermer tozu ve bazalt tozu serileri sırasıyla (% 25, % 50 ve % 75), oranlarında dere kumu olarak ikame eklenecek kontrol numuneleri toplam 10 karışım olarak hazırlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 5.1: Yanmaz fırın poşetli numunelerinin fırına konulması

5.1.1 Basınç ve eğilme dayanım sonuçları

Bu çalışmada kullanılan malzemelere göre basınç ve eğilme dayanım özellikleri belirlenmiş, elde edilen sonuçlar Tablo 5.1 ve 5.2 ve Şekil 5.2 ve 5.3'te verilmiştir. Basınç dayanımı ile ilgili olarak, bazalt tozu, dere kumu ile ikame edilerek karışımlar kontrol numunesi ve diğer kategorilerden alınan numunelerle karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar vermiştir. Bazalt tozu serilerin karışımı, 7,

28, ve 56 gün arasında değişken bir performans göstermiştir ve dayanım bakımından en iyi sonuçları vermiştir.

7, 28, ve 56. günlük basınç dayanımı sonuçları %50 BZ için sırasıyla kontrol karışımına kıyasla %26.20, %18.82 ve %16.91 oranında artmıştır. Bundan başka %25, %50 ve %75' lik mermer tozu içerikli karışımlar, gün ilerlemesi ile belirli bir dayanım kazanmasına rağmen, kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında performansları düşük kalmıştır. Diğer taraftan kireç taşı içerikli karışımlar, %25 LS karışımında gün ilerlemesi ile belirli bir dayanım kazanmıştır ve kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında yüksek bir performans göstermiştir. Buna rağmen 50% ve 75% LS karışımında kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında performansları düşük kalmıştır.

Eğilme dayanımı açısından, %50 LS seri, 7, 28, ve 56 günlük sırasıyla kontrol karışımına göre %28.57, %25.39 ve %23.62 oranında büyüme yüzdesi bir artış göstermiştir. %50 MR serilere göre, 7, 28, ve 56 günlük sırasıyla kontrol karışımına göre %19.59, %14.42 ve %14.44 oranında büyüme yüzdesi bir artış göstermiştir. Ayrıca 7, 28, ve 56 günlük %50 BZ serileri için %8,88, %7.71, ve %7.49 oranında büyüme yüzdesi kontrol karışımına göre bir artış göstermiştir. Diğer taraftan, %25 BZ ve %50 BZ oranındaki karışımları eğilme dayanımı kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında performansları düşük kalmıştır. %25, %50, ve %75 LS serileri, kontrol numunesi, MR, ve BZ karışımlarına kıyasla daha güçlü bir performans göstermiştir. Bu durum, kullandığımız atık malzemelerin belirli bir içeriğe kadar geopolimer bağlayıcıların üretiminde potansiyel olarak kullanılabilceği başarılı bir ikame malzemesi olduğunu göstermiştir.

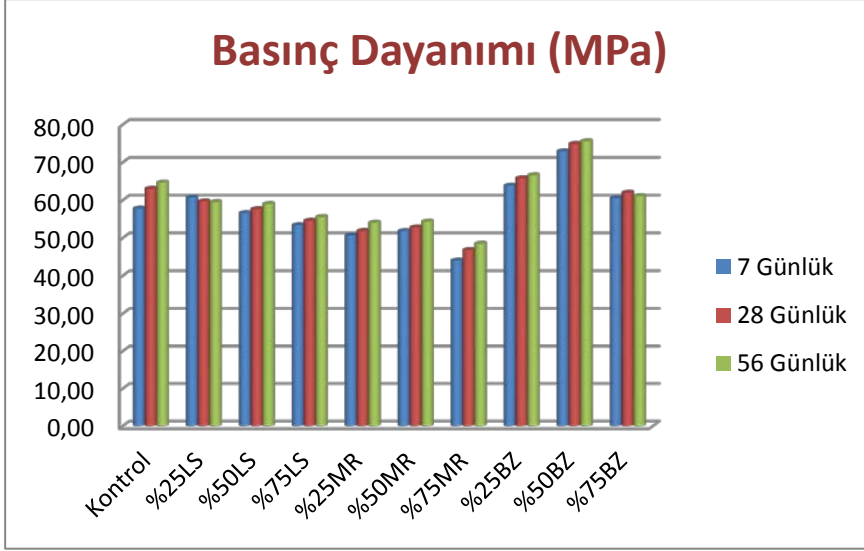
Çizelge 5.1: GP harç numuneleri 7, 28, ve 56 günlük basınç dayanımı sonuçları

	7 Günlük		28 Günlük		56 Günlük	
	Dayanım (MPa)	AO (%)	Dayanım (MPa)	AO (%)	Dayanım (MPa)	AO (%)
Kontrol	57,82	-	63,07	-	64,69	-
%25 LS	60,74	5,05	59,72	-5,31	59,53	-7,98
%50 LS	56,63	-2,06	57,68	-8,55	59,01	-8,78
%75 LS	53,43	-7,59	54,6	-13,43	55,56	-14,11
%25 MR	50,71	-12,30	51,91	-17,69	54,07	-16,42
%50 MR	51,87	-10,29	52,83	-16,24	54,36	-15,97
%75 MR	44,07	-23,78	46,86	-25,70	48,51	-25,01
%25 BZ	63,87	10,46	65,87	4,44	66,62	2,98
%50 BZ	72,97	26,20	74,94	18,82	75,63	16,91
%75 BZ	60,57	4,76	63,33	0,41	65,13	0,68

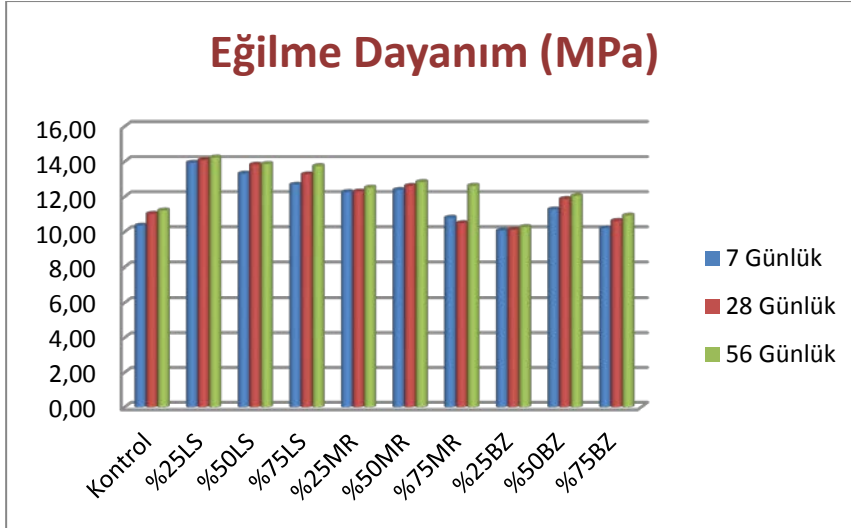
Çizelge 5.2: GP harç numunelerin 7, 28, ve 56 günlük eğilme dayanımı sonuçları

	7 Günlük		28 Günlük		56 Günlük	
	Dayanım (MPa)	AO (%)	Dayanım (MPa)	AO (%)	Dayanım (MPa)	AO (%)
Kontrol	10,36	-	11,03	-	11,22	-
%25 LS	13,94	34,56	14,10	27,83	14,24	26,92
%50 LS	13,32	28,57	13,83	25,39	13,87	23,62
%75 LS	12,69	22,49	13,28	20,40	13,75	22,55
%25 MR	12,27	18,44	12,30	11,51	12,52	11,59
%50 MR	12,39	19,59	12,62	14,42	12,84	14,44
%75 MR	10,81	4,34	10,50	-4,81	12,63	12,57
%25 BZ	10,08	-2,70	10,13	-8,16	10,28	-8,38
%50 BZ	11,28	8,88	11,88	7,71	12,06	7,49
%75 BZ	10,21	-1,45	10,63	-3,63	10,93	-2,58

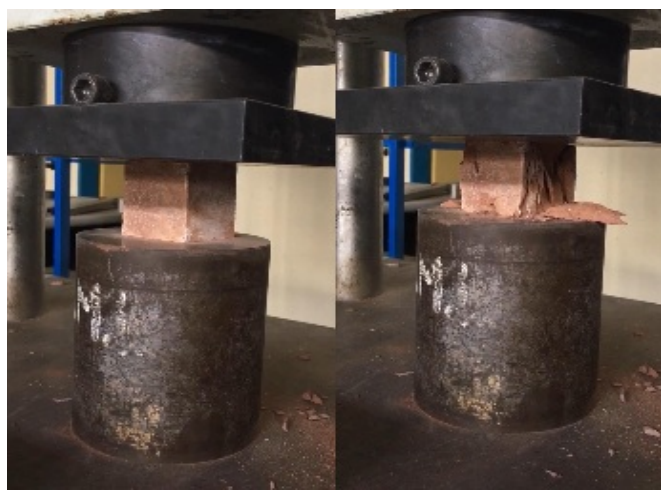
Not: AO (Artış Oranı) (%) = [(numunenin dayanımı – kontrol numunesinin dayanımı)/kontrol numunesinin dayanımı] × %100.



Şekil 5.2: İncelenen karışımların basınç dayanımı değerleri



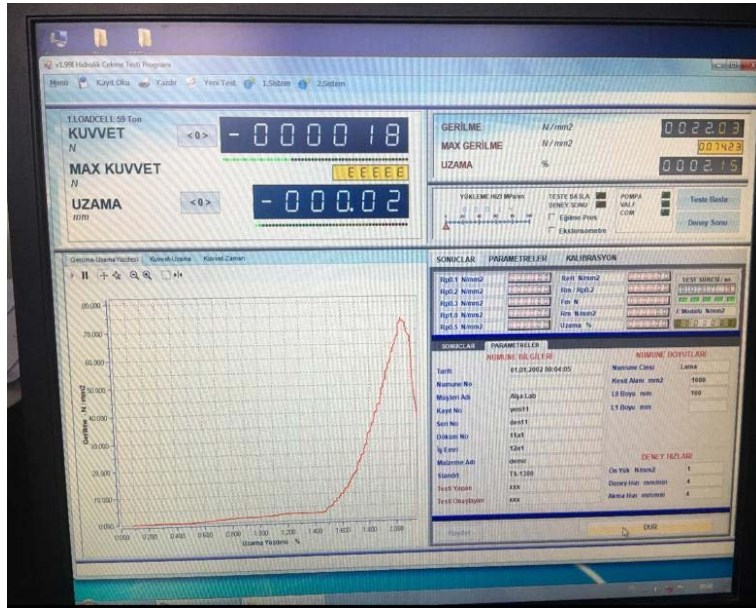
Şekil 5.3: İncelenen karışımların eğilme dayanımı değerleri



Şekil 5.4: Harç numunelerin basınç dayanımı testi



Şekil 5.5: Harç numunelerin eğilme dayanımı testi



Şekil 5.6: Basınç dayanım testi

5.1.2 Birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme sonuçları

Üretilen numunelerin Tablo 5.3'de birim hacim ağırlık, boşluk oranı ve ağırlıkça su emme sonuçları gösterilmektedir. Genel olarak, fiziksel özellikler açısından tüm üretilen numunelerin iyi bir performans sağladığı görülmektedir. %50 LS ve %50 BZ serileri, ağırlıkça su emme açısından %8.38 ve %7.74 ve boşluk oranı bakımından %16.90 ve %15.69 oranla kontrol numunesine kıyasla

daha iyi sonuçlar vermiştir. MR serileri incelendikçe ve kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir bir performans göstermiştir. LS ve BZ geopolimer serilerin, iyi bir fiziksel özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

Çizelge 5.3: GP harç numunelerin ağırlıkça su emme, birim hacim ağırlık boşluk oranı sonuçları

	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Birim hacim ağırlık (g/cm ³)
Kontrol	8,99	2,31
%25 LS	8,41	2,40
%50 LS	8,38	2,43
%75 LS	8,46	2,39
%25 MR	8,77	2,45
%50 MR	9,37	2,27
%75 MR	9,42	2,35
%25 BZ	7,91	2,39
%50 BZ	7,74	2,40
%75 BZ	7,99	2,42

5.1.3 Ultrases geçiş hızı sonuçları

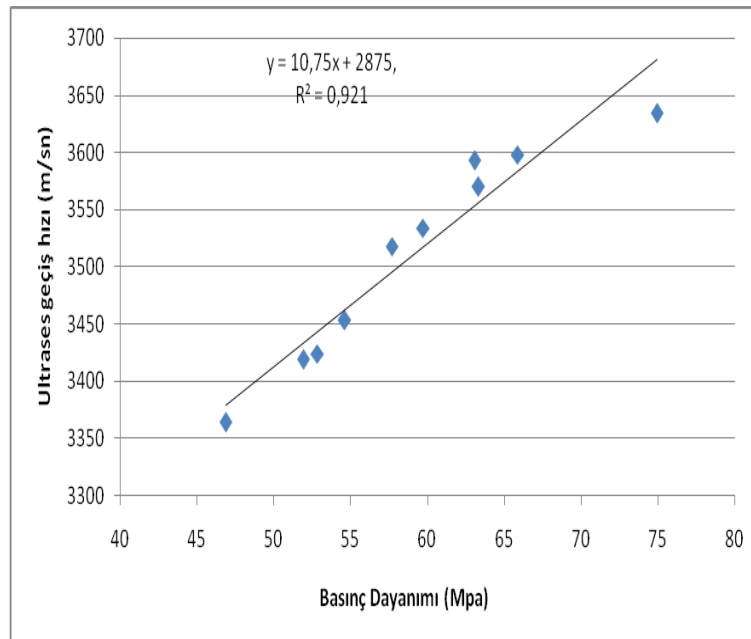
Matrisin homojenliğini araştırmak için, ultrasonik geçiş hızı testi uygulanmıştır. 50%BZ numunelerde; hızda belirli bir patlama oluşturduğu doğrulanmıştır. Bunun yanı sıra diğer karışımların aksine daha yüksek etkiler vermiştir. %25 LS ve %75 MR karışımları 7 ila 28 günlük arasında %3.032 ve %3.69' luk bir artış payı göstermiştir. MR karışımları, kontrol örneğinin aksine 28 günlük %1.59, %1.44 ve 0.85%' lik tempo değerlerinde bir azalma olduğu doğrulanmıştır. Kireç taşı serisinin karışımlarının sonuçları, mukavemet sonuçlarıyla karşılaştırdığında, diğer yandan %25 BZ ve %75 BZ sonuçları 7 günlük ve 28 günlük arasında %2.26 ve %2.07 artmıştır. Ayrıca, %75 LS ve %25 MR karışımları daha düşük değerler vermiştir.

Çizelge 5.4: Ultrasonik geçiş hızı sonuçları

	7 Günlük	28 Günlük
kontrol	3500	3593
%25 LS	3504	3534
%50 LS	3485	3518
%75 LS	3406	3453
%25 MR	3389	3419
%50 MR	3404	3424
%75 MR	3314	3364
%25 BZ	3547	3598
%50 BZ	3604	3634
%75 BZ	3518	3570

Deney sonuçlarında görüldüğü üzere; uygunluk derecesini incelediğimizde sonuçlar arasında korelasyonlar bulunmuştur. Korelasyon faktörü olan R2 de uygunluk dereceleri görülmüştür. R2 nin yüksekliği korelasyonun yüksek olduğunu gösterir. Bu değer 0.8 den büyük olması gerekmektedir.

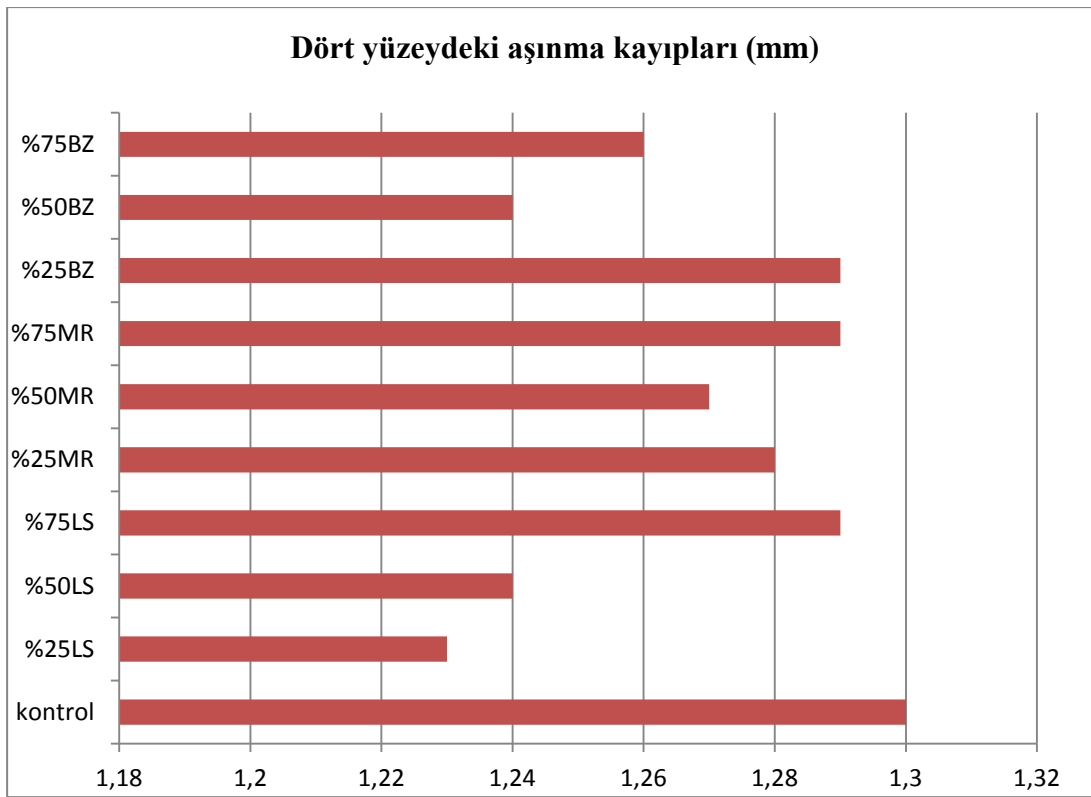
Bu çalışmada, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçları arasında korelasyon yapılmıştır. Şekil 39 da görüldüğü gibi, iyi bir korelasyon derecesi elde edilmiştir. Basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçlarının korelasyon faktörü 0.921'dir.



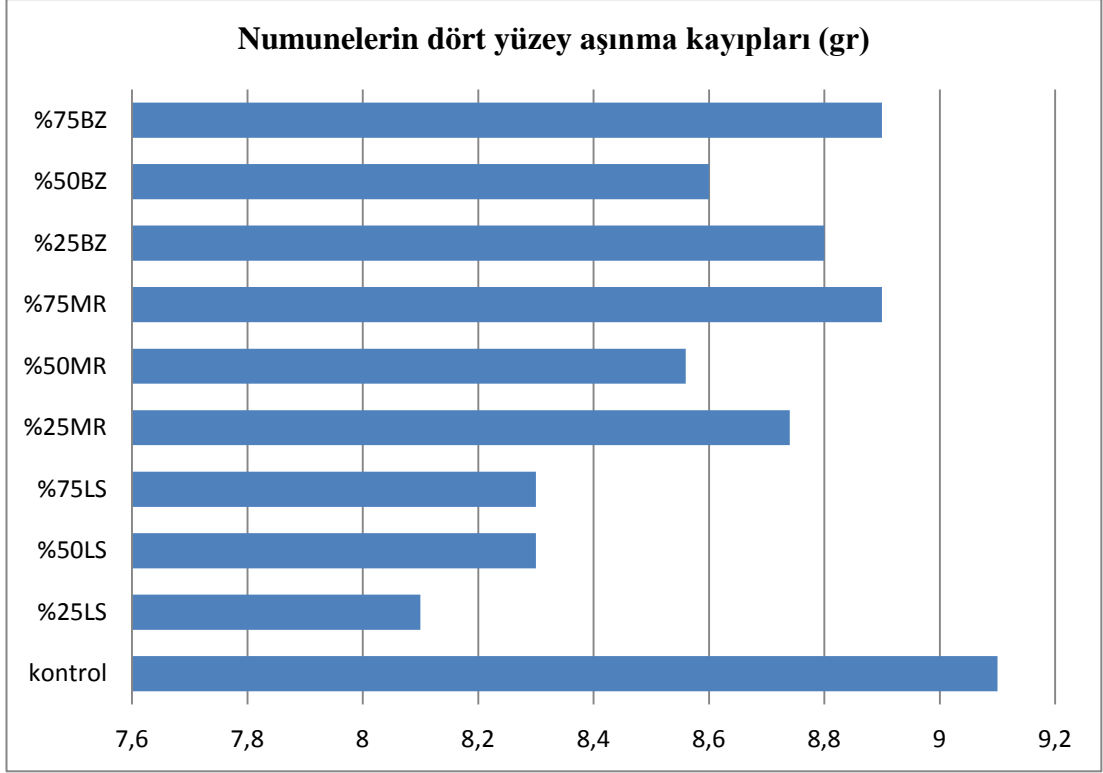
Şekil 5.7: Ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

5.1.4 Aşınma dayanım sonuçları

Üretilen harç numuneleri için aşınmaya göre ağırlık kayıpları Şekil 11 ve 12'de verilmektedir. Ayrıca, kireçtaşı tozunun %25 ve %75' lik malzemenin kontrol numune ile karşılaştırıldığında iyi olduğunu gözlenmiştir. Ağırlık kaybı aşınmaya bağlı olarak iyi bir performans sağlamıştır. Ağırlık kaybı yüzdeleri %25 LS ve %75 LS için %10.98 ve 8.79% arasında azalmıştır. Bazalt tozu ve mermer tozu ilavesi, ağırlık kaybı açısından aşınmaya bağlı olarak bir iyileşme sağlamıştır. Ağırlık kaybı yüzdeleri %50 BZ ve %50 MR için %5.49 ve %5.93 arasında değişmiştir (Topçu, Demirel et al. 2017).



Şekil 5.8: İncelenen karışımların (gr) değerleri başına aşınma kayıpları



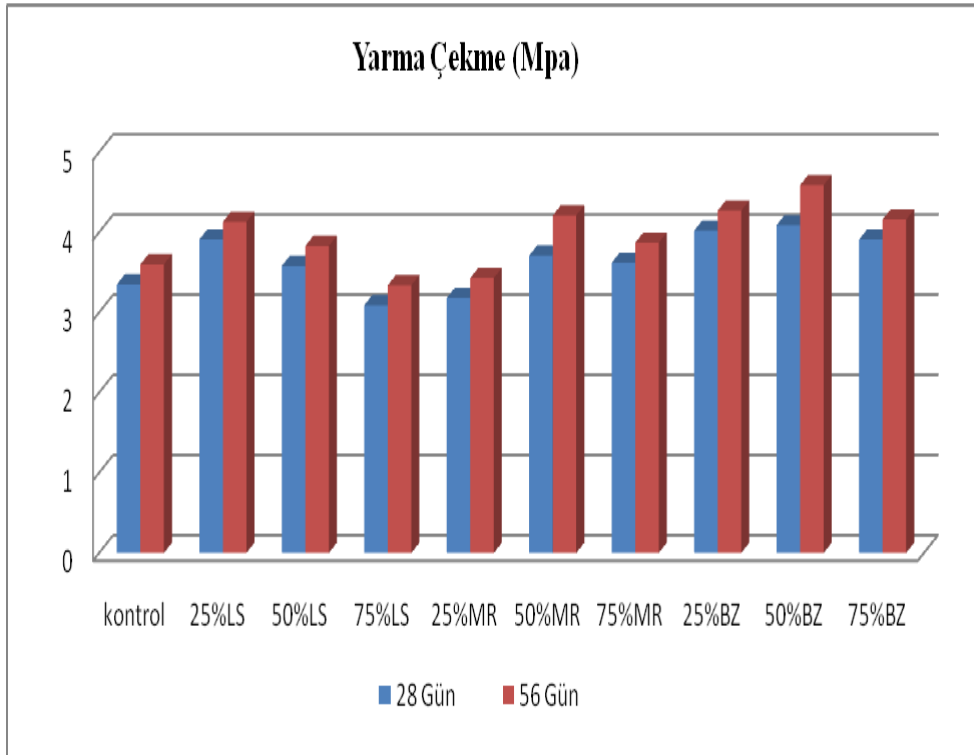
Şekil 5.9: İncelenen karışımların (mm) değerleri başına aşınma kayıpları



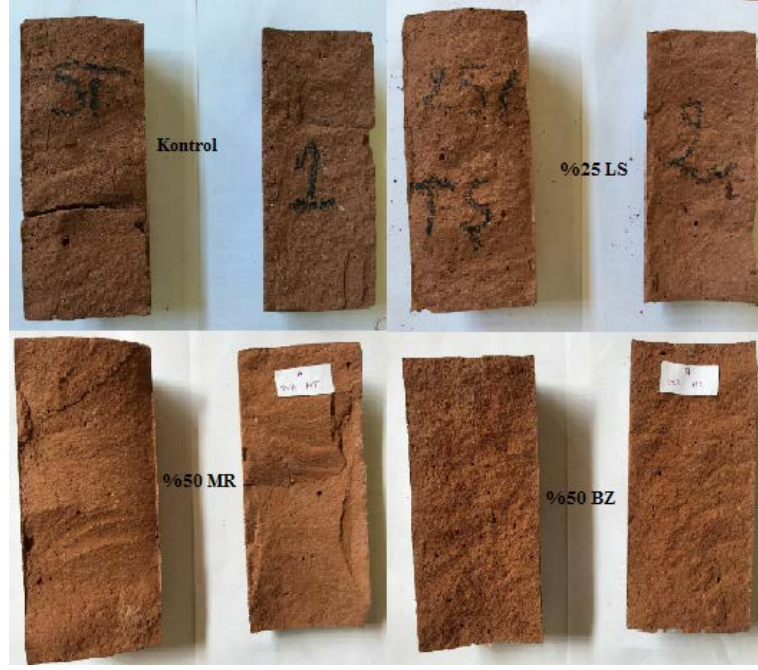
Şekil 5.10: Aşınma testinden sonra incelenen numuneler.

5.1.5 Yarma çekme sonuçları

28 ve 56 günlük ilişkin geopolimer harcının yarma çekme mukavemeti değişimi Şekil 43'te gösterilmiştir. Çubuk diyagramından, %50 BZ ile harmanlanmış geopolimer harcının, 4.09 Mpa ve 4.59 Mpa ile diğer karışımlardan maksimum bölünmüş gerilme mukavemeti değerleri gösterdiği açıktır. Bu çalışmadan, tüm geri kalan karışımlar için yarma çekme mukavemetinin yaşla birlikte kademeli olarak -eğer 28 ve 56 günlük arasında- %25 LS alırsak %13.47 ve %50 alırsak %5.62 oranında arttığı gözlenmiştir. Diğer yandan, kontrol karışımı yarma çekme mukavemeti ile ilgili olarak, % 25 ve %50 oranları için kireçtaşı tozu ile aynı oran için dere kumunun bazalt tozu ile değiştirilmesi daha iyi bir değer, % 50 ve %75 oranları için mermer tozu ve %75 LS ve % 25 MR, sırasıyla %7.22 ve %4.72 oranında bir azalma vermiştir.



Şekil 5.11: Yarma Çekme Sonuçları

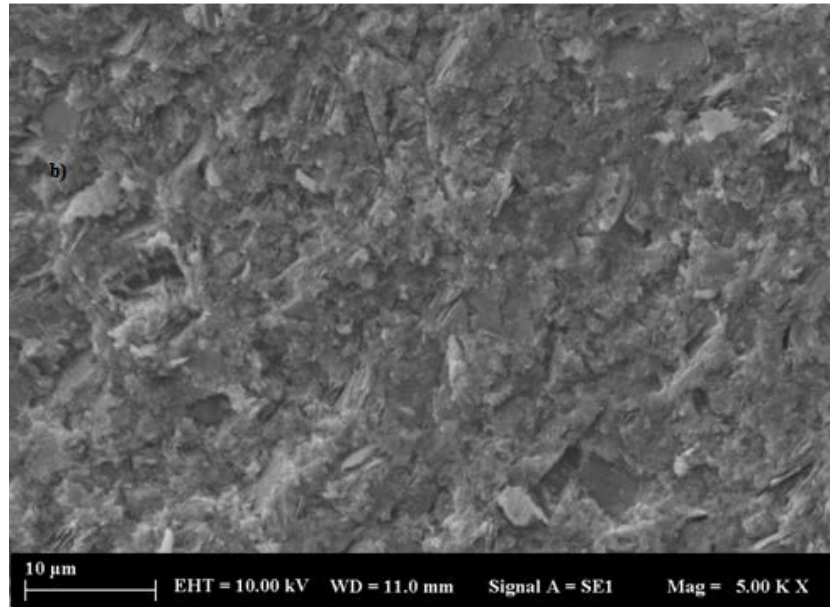
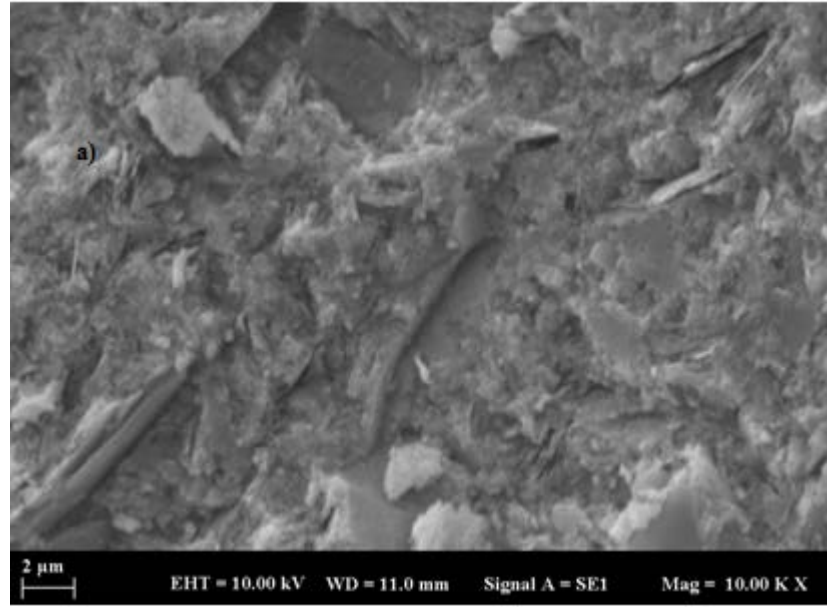


Şekil 5.12: Yarma çekme testiden sonra incelenen numuneleri.

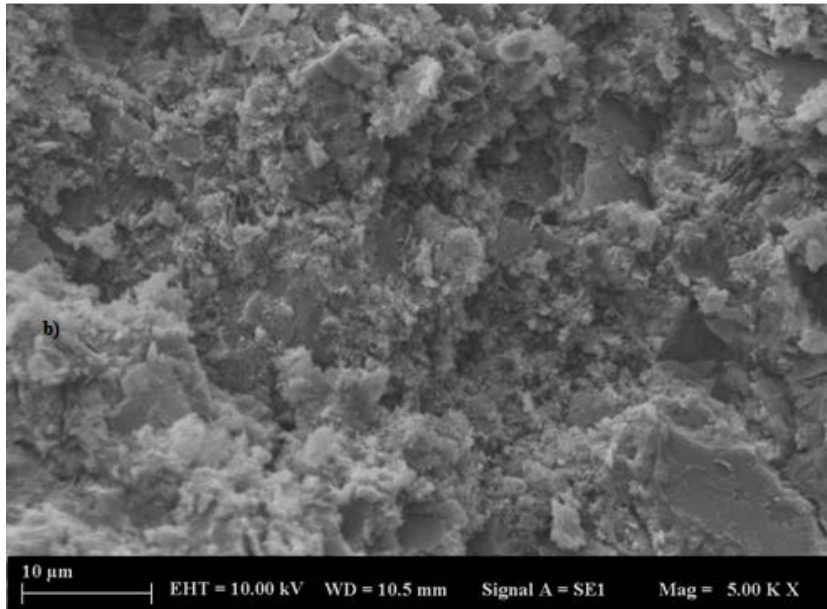
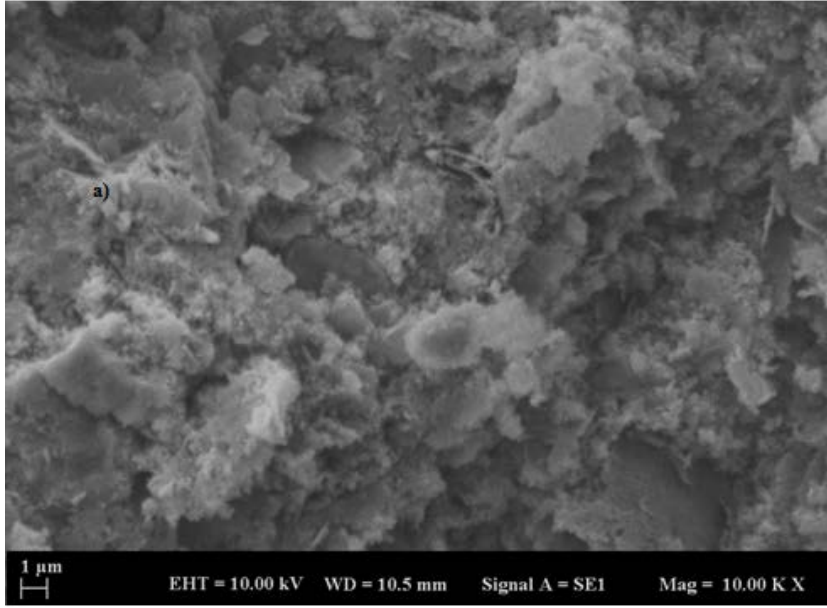
5.1.6 SEM analizi

Bu çalışmada, dolgu malzemesinin etkisini, geopolimer matris ve üretilen kompozitlerin mikro yapısını gözlemlemek amacıyla (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Amorf fazlar AL_2O_3 ve SiO_2 metakaolin bağlayıcı partikülleri temel bileşenidir. Yüksek mekanik ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Martin, Pastor et al. 2015). Reaksiyona girmeyen bazı MK partiküllerinin mevcut olması, basınç dayanımı yönünden etkisi önemlidir. Kontrol numunesi ve kullanılan malzemelere; kireç taşı, mermer tozu ve bazalt tozu numunesi için SEM mikrografları ve EDS spektroskopileri alınmış ve Şekil 4.12-4.14' de gösterilmiştir. Kontrol numunesinin Şekil (a)'da, homojen bir matris olduğu gösterilmiştir. Ayrıca bazı metakaolin partiküllerin reaksiyona girmediği fark edilmektedir. Kuartz varlığının içinde zengin silis bölgesi olduğu tespit edilmiş ve XRD grafiğinde de gösterilmiştir (Hamaideh, Al-Qarallah et al. 2014). Geopolimerizasyon jeli (N-A-S-H) sadece alkalin ile aktive edilen saf MK tarafından oluşturulmuştur. SEM görüntüsü Şekil 11 ve Şekil 13 incelendiğinde, geopolimer işleminde kireçtaşı, mermer tozu ve bazalt tozunun kullanımının basınç dayanımı etkisine iyi bir bağ oluşturduğu sonucuna varılmıştır (Kong and Sanjayan 2008). Bazı reaksiyona girmemiş MK geopolimerik matrisi, mermer dolgu tozu ile önemli

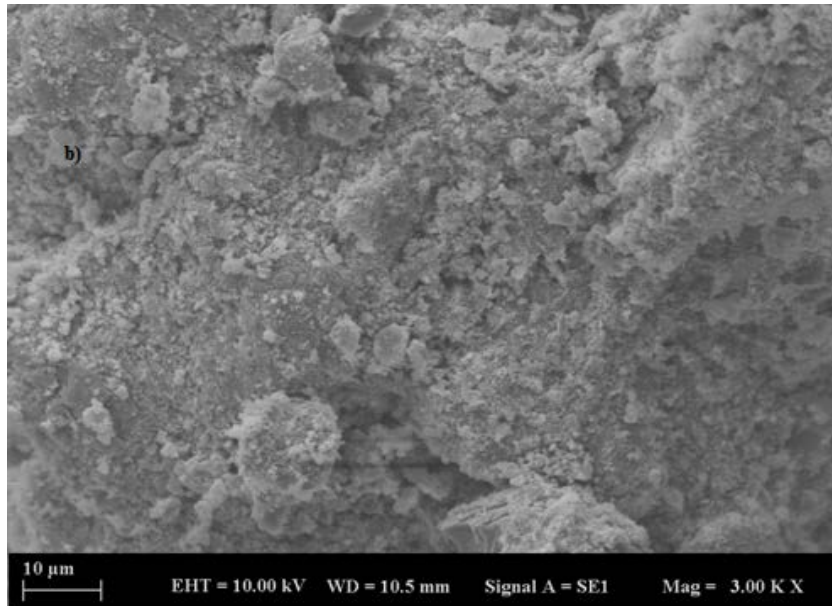
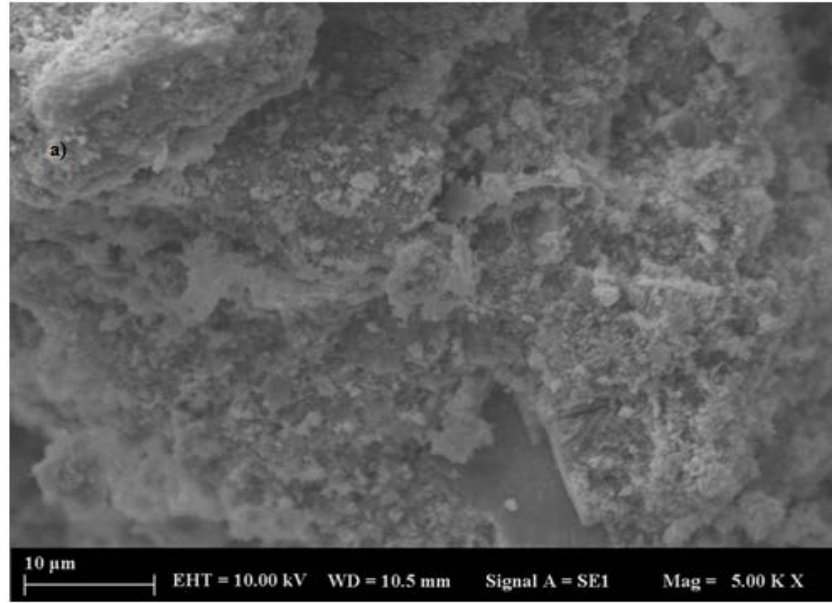
bir ara yüzey bağı oluşturmuştur. Bu da örneklerin küçük apron çökmesini, Şekil 12'de gösterildiği gibi daha fazla gözeneklerin mevcut olmasını sağlamıştır. Sonuç olarak; bu etkiyi makul hale getirmiştir. Şekil 4.11(b) 'de kireçtaşı numunesine ait, iyi bir bağlanma derecesi elde edilmiştir. Bazı mikro çatlaklar ve reaksiyona girmemiş metakaolin partikülleri tespit edilmiştir. Çatlakların yayılmasının hava kabarcıkları ve gözenekleri takip ettiğini ortaya çıkarmıştır (Tchakouté, Rüscher et al. 2016). Mermer tozu numunesinin mikrografları Şekil 4.11'deki gösterilmiştir. Gözenekleri ve reaksiyona girmemiş metakaolin partikülleri ortaya çıkmıştır. Mikrografları Şekil 4.11(e) bazalt numunesine ait, iyi bir bağlanma derecesi, kompakt ve süreklilik bir matris olduğu göstermiştir. Aynı şekilde ve diğer numuneleri gibi bazı gözenekler fark edilememiştir. EDS analizi kontrol, %50 LS, %50 MR, ve %50 BZ numunelerin matrisleri içindeki elementlerin incelemek için yapılmıştır (Şekil 4.12-4.14). Bazalt ve kontrol numuneleri gibi Si ve Al iyi korelasyon sağlayan bir elemanlardır.



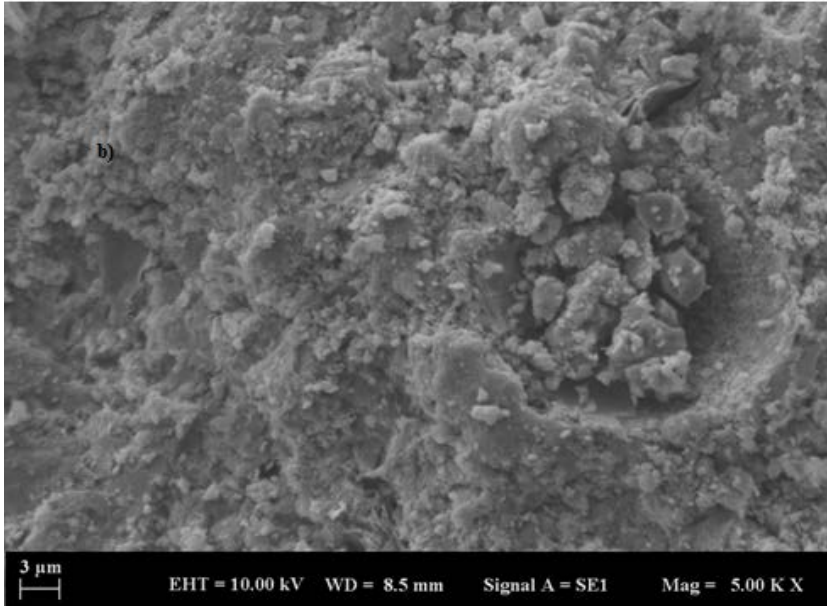
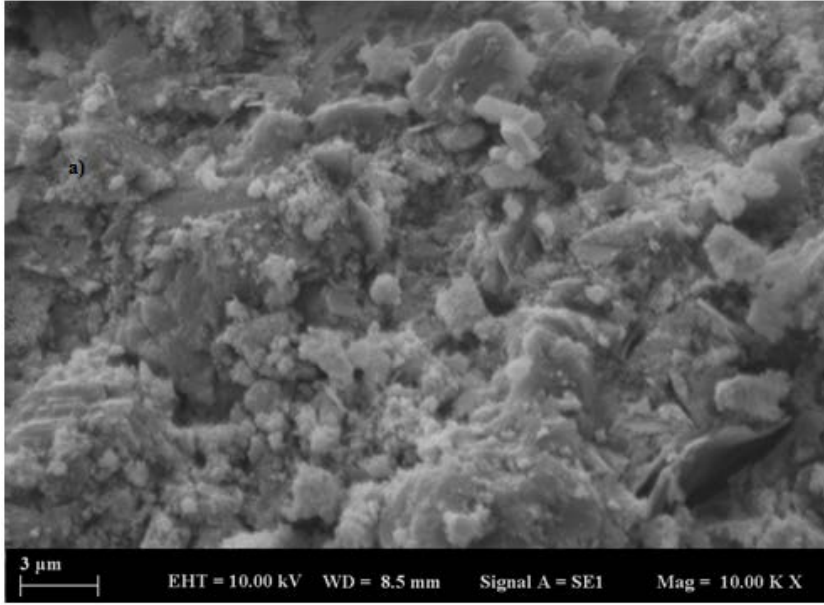
Şekil 5.13: Kontrol numunesinin SEM görüntüleri: a) 10000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş



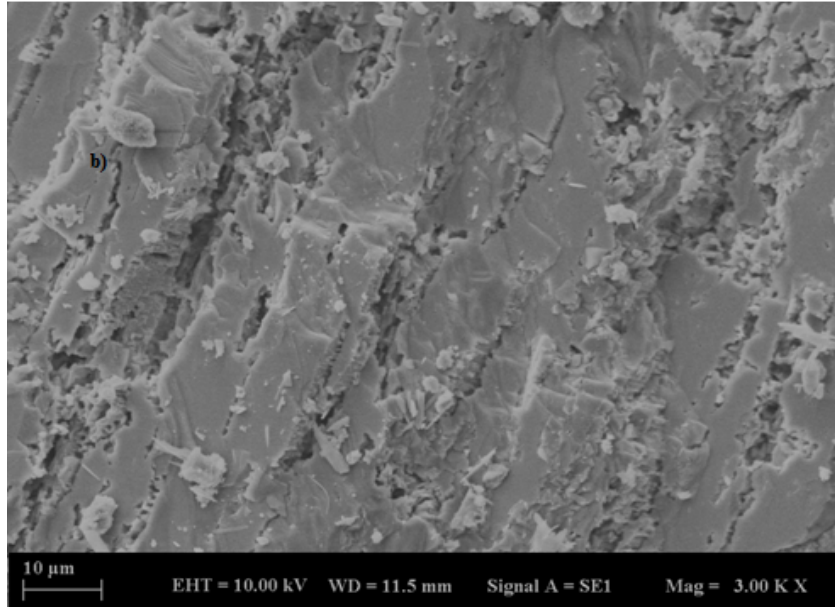
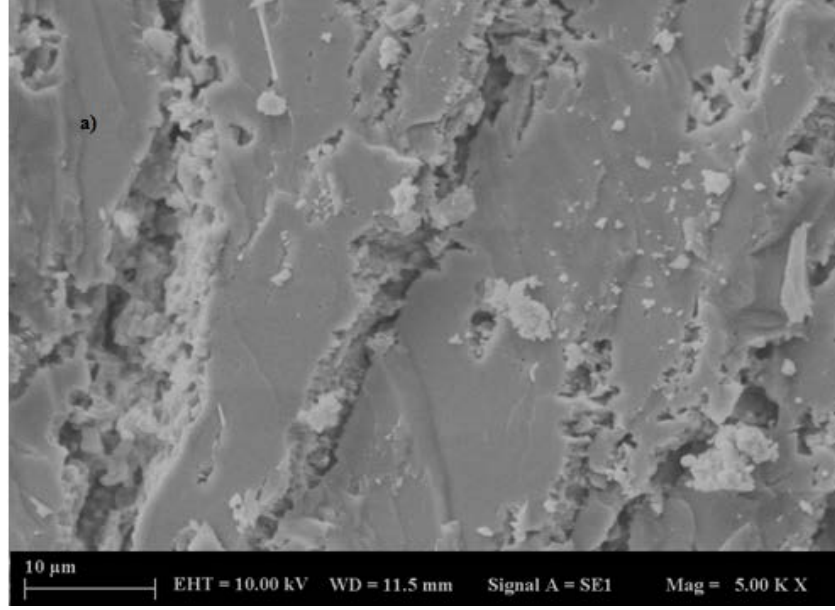
Şekil 5.14: %25 LS numunesinin SEM görüntüleri: a) 10000 kez büyütülmüş
b) 5000 kez büyütülmüş



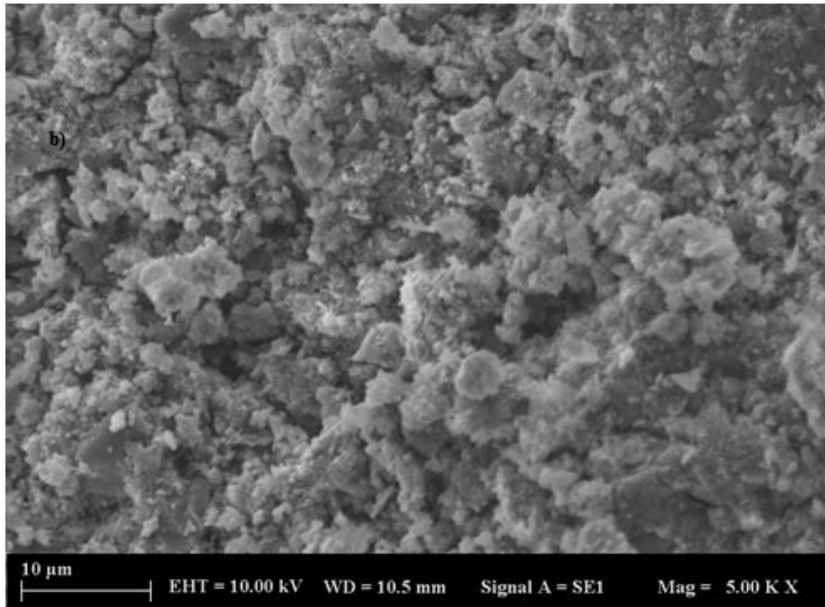
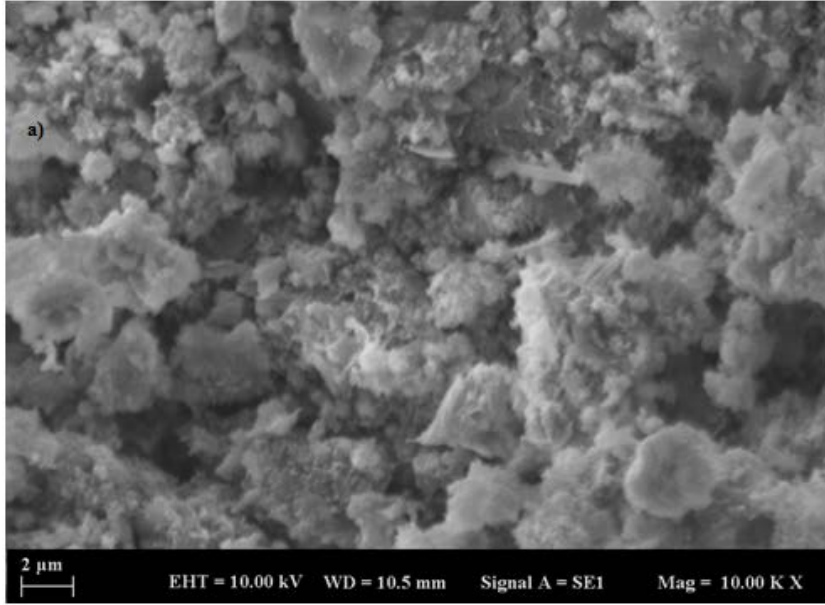
Şekil 5.15: %50 LS numunesinin SEM görüntüleri: a) 5000 kez büyütülmüş b) 3000 kez büyütülmüş



Şekil 5.16: %50 MR numunesinin SEM görüntüleri: a) 10000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş



Şekil 5.17: %50 BZ numunesinin SEM görüntüleri: a) 5000 kez büyütülmüş b)3000 kez büyütülmüş



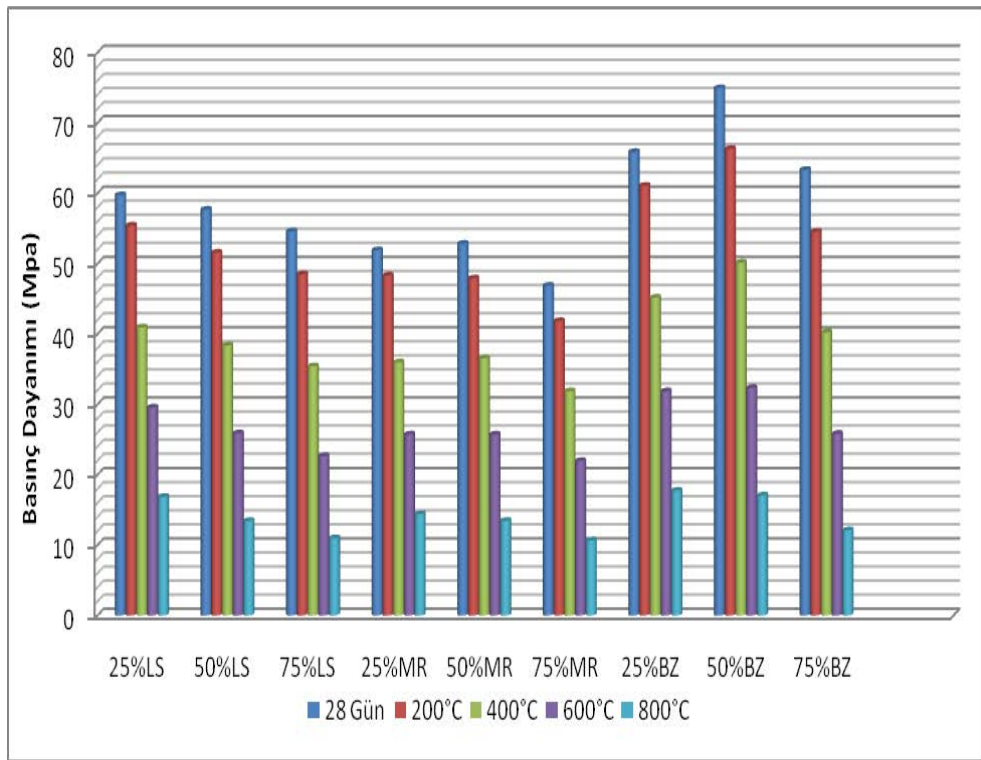
Şekil 5.18: %75 BZ numunesinin SEM görüntüleri: a) 10000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş

5.2 Durabilite Özellikler

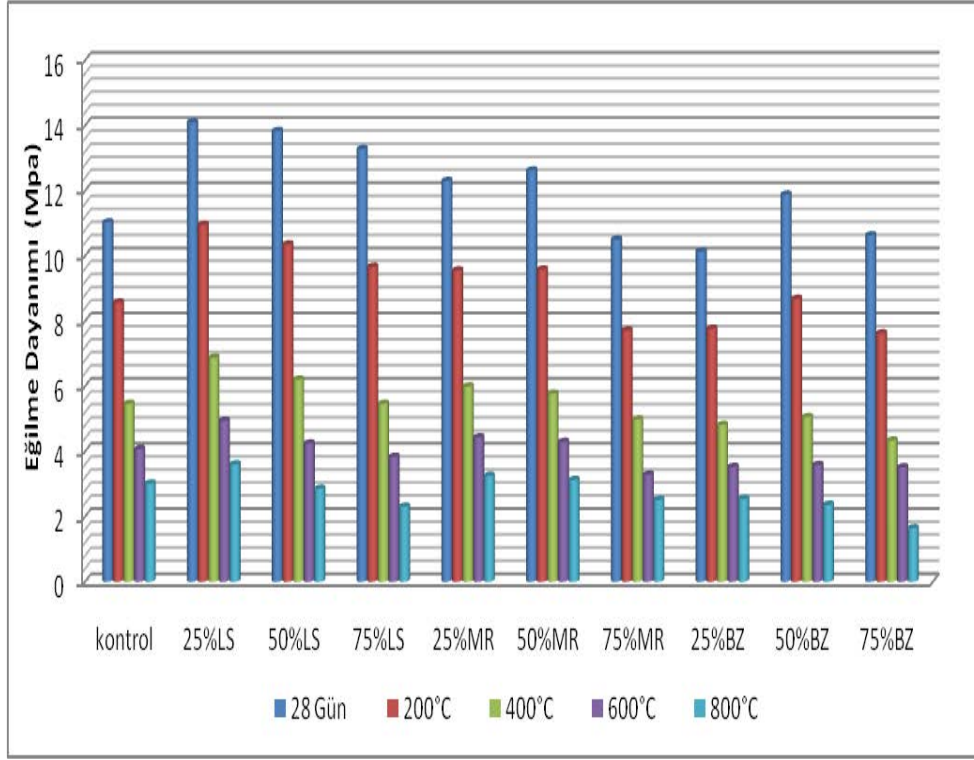
5.2.1 Yüksek sıcaklık deneyleri

Geopolimer harç numuneleri 28 gün sonra kuru pozisyona getirilmek için etüve 105°C'de 24 saat süreyle konulmuştur. Daha sonra, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de yüksek sıcaklık etkisine numuneler maruz bırakılmıştır. Deney bittikten sonra basınç ve eğilme dayanımı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır.

5.2.1.1 Basınç ve eğilme dayanım sonuçları



Şekil 5.19: Yüksek sıcaklıklara maruz numunelerin basınç dayanımı sonuçları.



Şekil 5.20: Yüksek sıcaklıklara maruz numunelerin eğilme mukavemeti sonuçları.

Çizelge 5.5: Basınç dayanımı kaybı oranları (%).

	200°C	400°C	600°C	800°C
Kontrol	6,42	30,13	49,25	71,12
%25 LS	7,15	31,38	50,54	72,81
%50 LS	10,58	33,47	55,13	76,83
%75 LS	11,08	35,11	58,48	79,92
%25 MR	6,96	30,78	50,34	72,29
%50 MR	9,14	31,36	51,79	74,41
%75 MR	10,81	32,17	53,42	77,29
%25 BZ	7,27	31,46	50,64	73,05
%50 BZ	11,46	33,05	56,79	77,32
%75 BZ	13,94	36,44	59,87	80,93

Çizelge 5.6: Eğilme mukavemeti kaybı oranları (%).

	200°C	400°C	600°C	800°C
Kontrol	22,30	50,84	63,73	72,76
% 25 LS	22,79	51,86	64,77	74,87
% 50 LS	25,13	55,06	69,96	79,10
% 75 LS	27,22	58,50	71,14	83,95
% 25 MR	22,31	51,40	64,11	73,63
% 50 MR	24,28	54,32	66,23	75,11
% 75 MR	26,43	56,33	69,14	77,81
% 25 BZ	23,40	52,53	65,25	75,46
% 50 BZ	26,72	57,35	68,87	80,52
% 75 BZ	28,38	59,86	70,10	85,90

İncelenen numuneler 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisi altında tutulmuştur. Mukavemet özelliklerinin sonuçları 28 günlük sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklığın etkisine tam olarak maruz kalan numuneler tam olarak 600 °C' den sonra serbest su buharlaşması ve g geopolimer matrisinin dehidrasyonu nedeniyle mukavemet özelliklerinde (Tablo 5.5 ve 5.6) belirgin bir azalma olmuştur (Testing and Cement 2013). Yüksek sıcaklıklarda, gözenekli yapıların büyümesi ve çatlakların yayılması olan mikro yapı kusurunun duyarlılığı nedeniyle eğilme mukavemetindeki azalma daha yüksektir. Ayrıca, kontrol örneğinde kullanılan dere kumu pürüzleri su buharından kaçmak ve gözenek basıncını serbest bırakmak için bir yol oluşturmuştur. Daha yoğun mikro yapı, LS, MR ve BZ toz partikülleri, geopolimer numunesinin mikro yapısındaki iç gözenekleri doldurdukça ve yoğun bir yapı oluşturan boşluk oranını azalttığından, ince tanecikli mikro agrega dolgu maddesinden kaynaklanan geopolimer kompozitlerin dolgu malzemelerinde görülmüştür. Ayrıca, metakaolinin içindeki kalsiyum oksit ile kalsiyum hidroksit reaksiyon sonucu C-S-H jel oluşumu gözlenmiştir (ASTM

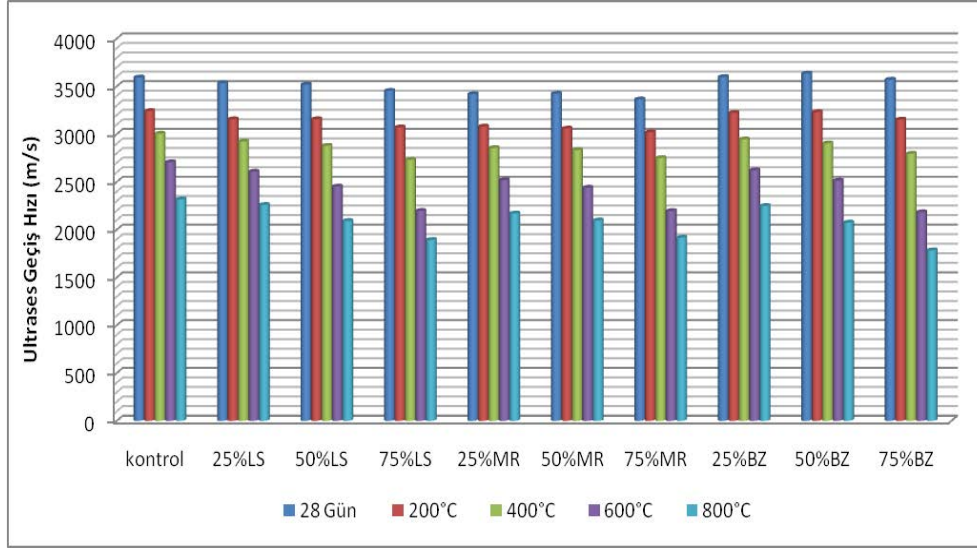
2013). Basınç dayanımları, 25% LS için 200 °C, 400 °C, 600°C ve 800°C'de sırasıyla 50.5 MPa, 40.38 MPa, 28.76 MPa ve 13.85 MPa dir.

200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de %50 LS için, Basınç dayanımları sırasıyla 44.37 MPa, 38.58 MPa, 25.88 MPa ve 11.64MPa çıkmıştır. %75 LS numuneleri için, verilen basınç dayanımları sırasıyla 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de 42.82 MPa, 36.87 MPa, 22.67 MPa ve 10.97 MPa dır. Yukarıdaki sonuçlara göre % 25 LS için eğilme mukavemeti sırasıyla 200°C, 400°C, 600°C ve 800 °C'de 8.25 MPa, 5.57 MPa, 3.84 MPa ve 2.21 MPa vermiştir. 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de %50 LS için eğilme mukavemetleri sırasıyla 7.85 MPa, 5.38 MPa, 3.74MPa ve 2.16 MPa dır. %75 LS numuneleri için, elde edilen artık eğilme mukavemetleri 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de sırasıyla 7.42 MPa, 5.26 MPa, 3.7 MPa ve 2.04 MPa dır. Ayrıca eğilme dayanımı yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımından daha fazla azalır. MR ve BZ tozunun sonuçları yukarıdaki tablo 5.5 ve 5.6 ve şekil 5.19 ve 5.20' te verilmektedir.

5.2.1.2 Ultrases geçiş hızı sonuçları

Çizelge 5.7: Ultrases geçiş hızı (UPV) kayıp oranları (%).

	200°C	400°C	600°C	800°C
Kontrol	9,76	16,45	25,55	35,30
%25 LS	10,53	17,31	26,88	36,99
%50 LS	10,85	18,43	30,49	40,14
%75 LS	11,08	20,98	37,97	46,40
%25 MR	9,96	16,68	26,43	36,19
%50 MR	10,52	17,11	29,00	39,74
%75 MR	10,77	18,25	35,69	42,55
%25 BZ	10,65	18,23	27,12	37,19
%50 BZ	11,02	20,11	31,78	42,26
%75 BZ	11,87	21,66	38,96	50,04



Şekil 5.21: Yüksek sıcaklık testinden sonra UPV sonuçları.

Yüksek sıcaklığın etkisi altında, geopolimer numuneleri su buharlaşması oluşturmaktadır. Ağırlık kaybı ve boşluklar artar ve normal koşullarda oda sıcaklığında, yüksek gözenek sağlayan yapı gözeneklerinin ve su buharlaşmasının artmasına neden olur.

Ultrasonik geçiş hızı sonuçları (Topçu, Demirel et al. 2017). Tablo 5.7 ve Şekil 5.21, yüksek sıcaklıklara tabi tutulan geopolimer numuneler UPV sonuçlarını göstermektedir. 200 °C sıcaklık etkisinden sonra; geopolimer matris numunelerinde oluşan zararları içeren ve kompozit yoğunlukta bir düşüştüğü dolaylı hızlandırıcı mikro çatlakların oluşmasına ve daha düşük bir UPV değerinde oluşan yaygın ultrasonik hız dalgalarının uzamasına izin veren dayanım özelliklerinin sonuçlarında (basınç ve eğilme) bir düşüş dikkat çekmiştir.

İnce dolgu malzemelerin (Kireçtaşı tozu, mermer tozu ve bazalt tozu) taneleri, geopolimer matris mikro yapısına dağılmış mikro agrega dolgu maddeleri olarak işlev görmüştür. UPV dalgalarının yayılmasını azaltan yoğun bir mikro yapı oluşturmuştur. 200 °C sıcaklık sonrası sonuçlar kontrol numuneleriyle aynıdır. Geopolimer harçlardaki kontrol numunesi sonuçları 200 °C' de %9.76, 400 °C' de %16.45, 600 °C' de %25.55 ve UPV kayıp oranı açısından 800 °C' de %32.30 dır. UPV sonuçları, boşluk oranını azaltan kompakt yapıları nedeniyle geopolimer kompozitlerde dolgu maddeleri ile daha yüksektir (Uysal, Yılmaz et al. 2012). Kontrol numunede UPV sonuçları sırasıyla 200 °C, 400 °C, 600 °C ve

800 °C' de 3062 m / s, 2835 m / s, 2526 m / s ve 2297m / s dir. %25 LS numunede UPV sonuçları, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C' de 3056 m / s, 2463 m / s, 1948m / s ve 1520 m / s dir. %50 LS numune sonuçları, 3058 m / s, 2518 m / s, 2052m / s ve 1672 m / s, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C iken %75 LS numune sonuçları, 3062 m / s, 2697m / s, 2117m / s ve 1693 m / s, sırasıyla 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C' de elde edilmiştir. İnce agregadan kaynaklanan kompakt yapının yukarı dalgaların yayılmasını sınırlaması yüksek sıcaklığa karşı pozitif etki göstermektedir.

5.2.1.3 Ağırlık kaybı sonuçları

Çizelge 5.8: Prizma numunelerin ağırlık kaybı (%)

	200°C	400°C	600°C	800°C
Kontrol	0,81	3,42	5,25	6,76
%25 LS	0,77	3,15	5,08	6,17
%50 LS	0,70	2,96	4,61	5,81
%75 LS	0,65	2,88	4,11	5,67
%25 MR	0,75	3,06	4,96	5,88
%50 MR	0,67	2,84	4,58	5,64
%75 MR	0,6	2,77	4,44	5,43
%25 BZ	0,73	3,17	5,18	6,23
%50 BZ	0,62	3,03	4,74	6,08
%75 BZ	0,6	2,91	4,6	5,73

Çizelge 5.9: Küp numuneleri ağırlık kaybı (%)

	200°C	400°C	600°C	800°C
Kontrol	0,74	2,13	4,19	5,06
%25 LS	0,68	2,08	3,83	4,88
%50 LS	0,61	2,01	3,76	4,76
%75 LS	0,58	1,97	3,52	4,61
%25 MR	0,64	1,95	3,63	4,74
%50 MR	0,61	1,87	3,4	4,67
%75 MR	0,59	1,73	3,12	4,42
%25 BZ	0,69	2,10	4,01	4,72
%50 BZ	0,6	2,06	3,71	4,59
%75 BZ	0,57	1,87	3,56	4,5

Amorf fazlar AL_2O_3 ve SiO_2 , bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak kullanılan MK ve KÇ'un ana bileşenleridir. Yüksek bir özgül alan, iyi mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile karakterize edilir (Cheng, Lee et al. 2012). Serbest su buharlaşmasının yüksek sıcaklığı ve termal reaksiyonu, geopolimer numunelerinin basınç dayanımının azaltılmasının ana nedenidir, çünkü dehidrasyon reaksiyonu meydana gelir (Zhang, Li et al. 2012). Ayrıca nemlendirmeler numune yüzeyinden kaçar ve bunun yanında ağırlık kaybına neden olur (Kong, Sanjayan et al. 2007). Birinci ısıtma seviyesindeki serbest su ve yapılandırılmış su, üç formdan (serbest su, adsorbe ve kimyasal olarak bağlı su) oluşan hızlı bir ağırlık kaybına neden olur (Wang, He et al. 2015). 400 °C'nin üstünde aniden geopolimer numuneleri ağırlık kaybında bir azalma gösterirken, en fazla ağırlık kaybının 400 °C ila 800 °C arasında olduğu gerçeğini doğrularken, 600 °C'nin altında serbest suyun buharlaşması bu kaybın ana sebebidir (He, Jia et al. 2010). Kimyasal olarak bağlı su, dehidrasyon başlarken 400°C'nin üzerine salınan iç gözenekleri resmileştirir. Ayrıca, geopolimerik matristeki viskoz sinterleme ve termal büzülme, yüksek sıcaklık etkisinin sonuçlarıdır (Lahoti, Wong et al. 2018). Daralan gözenekler, numunelerin parçalanma eğilimini artırır (Celik, Yilmaz et al. 2018).

Numunelerin ağırlık kaybının sonuçları Şekil 30'da verilmektedir. Kontrol numunesi için ağırlık kaybı oranları 200 °C'de 0.74%, 400 °C' de %2.13, 600 °C' de %4.19 ve 900 °C' de %5.06 dır. Dolgu malzemelerinin ağırlık kaybı sonuçları, kontrol numunesi geopolimer kompozitlerinden daha düşüktür (Uysal, Al-mashhadani et al. 2018). Bu görüş, boşluk oranının azalmasına benzer şekilde etki eden mikro-agrega dolgu LS, MR ve BZ tozunun ince tozlarına bağlı olarak doğrulanmaktadır.

5.2.1.4 Görsel inceleme ve analizler

Isıl işlem testinden sonra, yüzeydeki, renkteki ve çatlaklardaki değişiklikleri incelemek için numunelerin fotoğrafları hemen çekilmiştir. Şekil 6'da, basınç ve eğilme mukavemeti anlamına gelen 200 °C ve 400 °C azalmaya maruz kalan numuneler, kayda değer bir renk değişikliği gözlenmemiştir. 600 °C' ye maruz kalan numuneler, kırıklar ve rengin değişmesi ayrıca daha fazla mukavemet özellikleri kaybı gözlemlenmiştir. 800 °C' ye kadar, renkte tam bir değişiklik vardır. Yüksek sıcaklık etkileri altında geopolimer numunelerinin stabil koşulları koruduğu gerçeği doğrulanmıştır. Çatlaklar daha düşük bir hızda kalmıştır ve yüzey biraz daha kalınlaşmıştır (Behera, Baheti et al. 2018, Celik, Yilmaz et al. 2018).



Şekil 5.22: 200 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler



Şekil 5.23: 400 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler



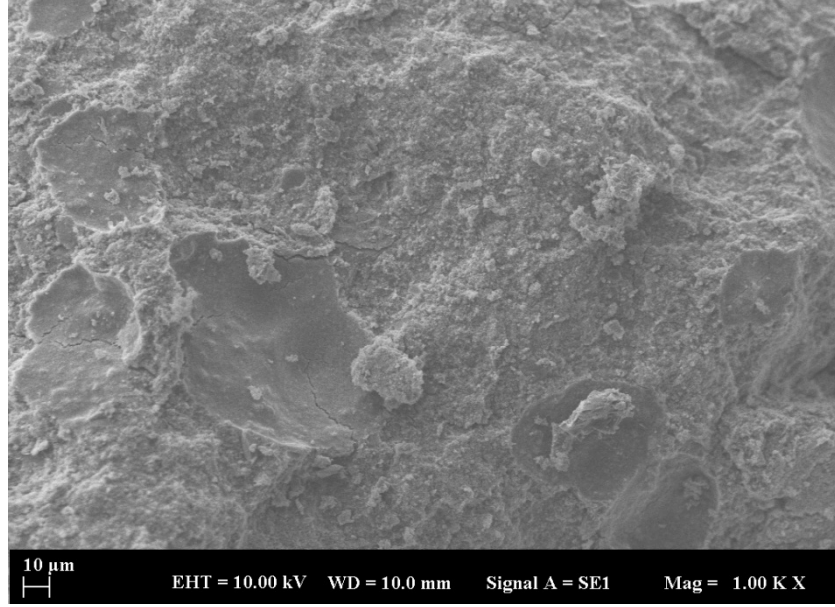
Şekil 5.24: 600 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler



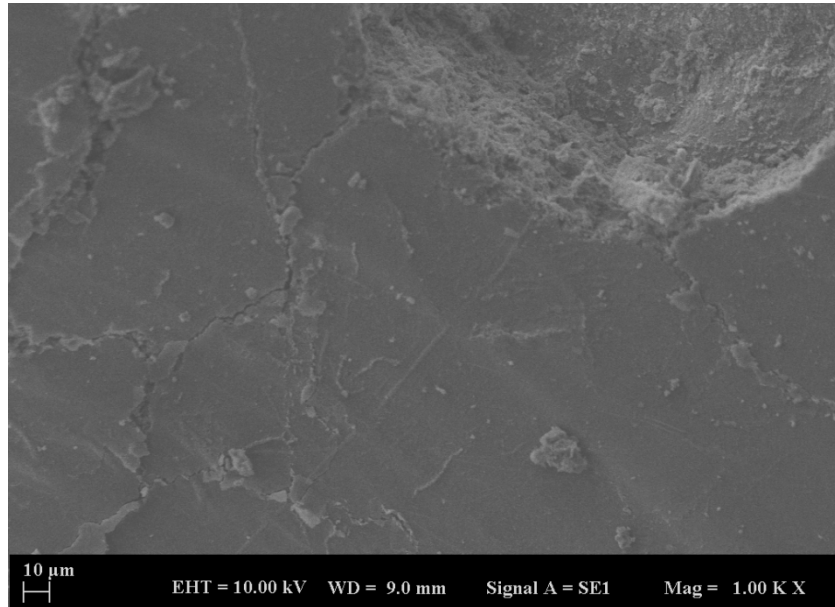
Şekil 5.25: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler

800 °C ile ısıl işlemden sonra geopolimer matris ile bağlanma derecesini ve numunelerin mikro yapıları arasındaki ilişkileri daha iyi incelemek için tarama elektron mikroskopisi (SEM) kontrol, %25 LS, %25 MR ve %25 BZ numuneleri için yapılmıştır. Isıl işlem ile ilgili mekanik özellikler Şekil 5.22-5.25, maruziyetten önce ve sonra 800 °C numuneleri göstermektedir. 800 °C yükseltilmiş sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra kontrol geopolimer numunelerinin mikro yapısı kayıp ağırlığı; böylece, gözenekli daha fazla hale gelmiştir. Matrisin ayrışması, makro-yapısal çatlak ve faz dönüşümleri Şekil 5.26-5.33' de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklıktan sonra, geopolimerik jelde reaksiyon silis bakımından zengin jeller imalatının gözenek hacminde önemli bir azalma vardır, bu da yapının yaklaşık 800 °C çökmesine ve yüksek yoğunlaşmaya neden olabilir. Yukarıdakilerden yükselen gözenek azalması, sentezlenmiş geopolimerlere neden olur. Ayrıca, Si / Al oranının artışı başlangıç yoğunlaştırma sıcaklığını azaltır [82]. Buharlaşma ve dehidroksilasyonun su kaybı nedeni ve gözenek hacminin azalması nedeniyle yüksek sıcaklıktan sonra yoğunlaşan önemli bir yapısal kusur oluşumu, termal ataktan sonra tüm bu etkiler güç kaybına katkıda bulunur. Ayrıca, bu güç kaybına, kontrol edilemeyen difüzyon nedeniyle yeni kristal fazlar oluşturan atomların yeniden

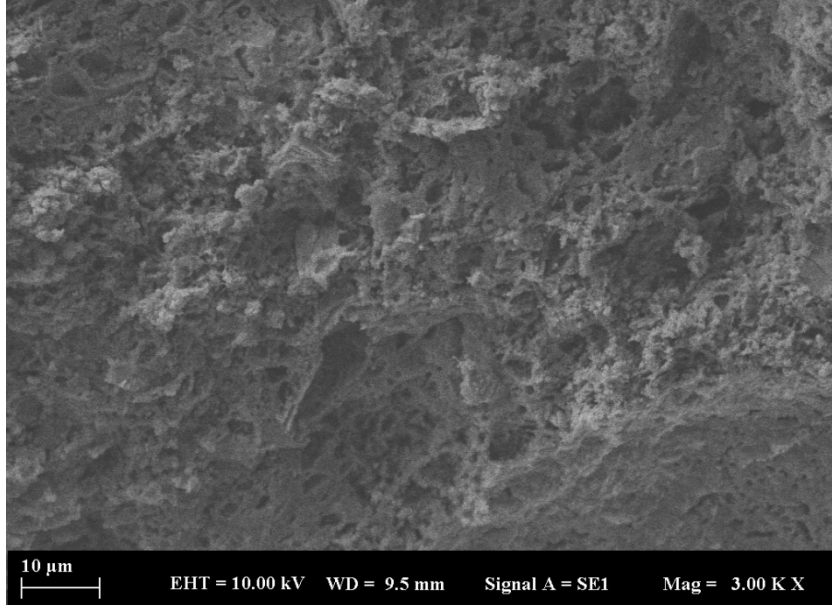
dağıtılması neden olmuştur (De Silva and Sagoe-Crenstil 2008, Gomez-Zamorano, Vega-Cordero et al. 2016).



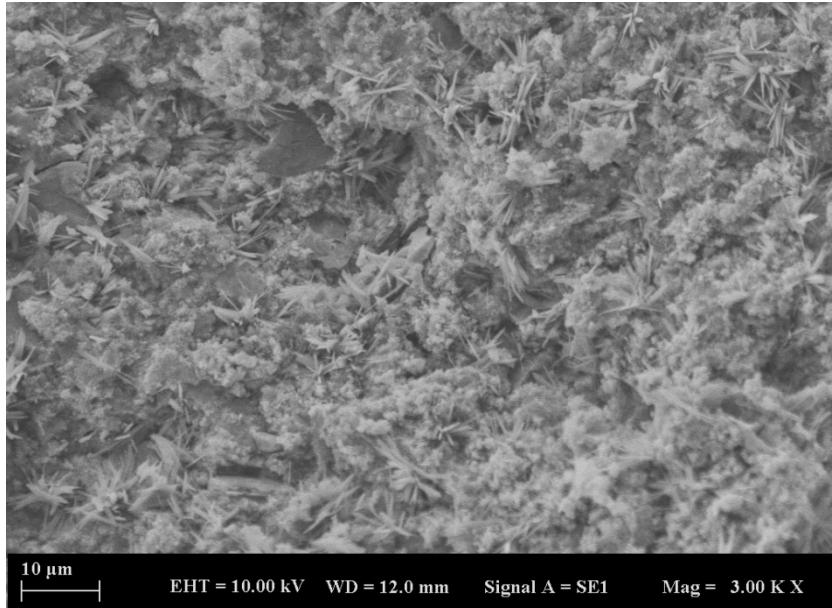
Şekil 5.26: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan kontrol numunesinin SEM görüntüleri 1000 kez büyütülmüş



Şekil 5.27: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan %25 LS numunesinin SEM görüntüleri 1000 kez büyütülmüş



Şekil 5.28: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan %50 MR numunesinin SEM görüntüleri 3000 kez büyütülmüş



Şekil 5.29: 800 °C den sonra yüksek sıcaklığa maruz kalan %50 BZ numunesinin SEM görüntüleri 3000 kez büyütülmüş

5.2.2 Donma çözülme deneyi

5.2.2.1 Basınç ve eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı sonuçları

Donma-çözülme testinden elde edilen mukavemet özelliklerinin sonuçları, imal edilen numunenin 28 günlük sonuçları ile toplanmıştır. Donma-çözülme 180 devirden sonra, ağırlık kaybı algılanırken, mukavemet özelliklerinde (Tablo

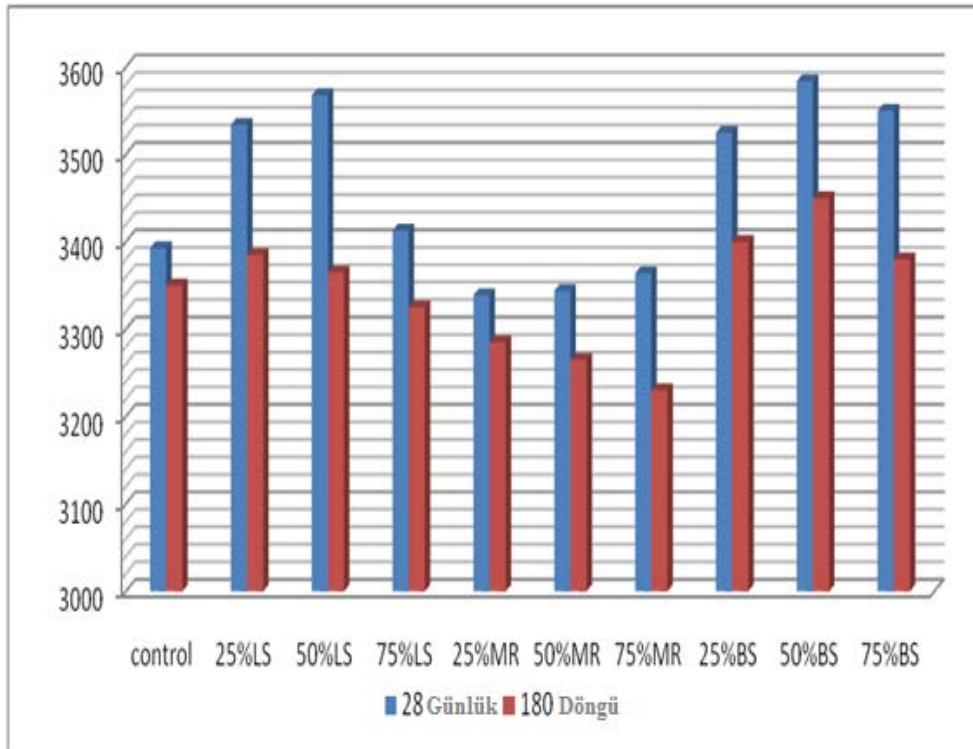
5.10 ve 5.11) ve UPV' de bir miktar azalma fark edilmiştir. En yüksek basınç ve eğilme mukavemeti sırasıyla 69.28 MPa ve 9.94 MPa ile %50 BZ numunelerinde elde edilirken, en düşük basınç ve eğilme mukavemeti sırasıyla %75 MR numunelerinde 39.09 MPa ve 6.47 MPa elde edilmiştir. Geopolimer numuneleri, numunelerin çok kompakt bir geopolimerik matrisi olduğu için donma-çözülmenin etkilerine iyi direnç göstermiştir. Donma-çözülme testi etkisi, eğilme dayanımı üzerinde daha etkilidir. Çünkü mikro çatlaklar yolu, bükülme dayanımının yüküne karşı dik iken sıkıştırma yüküne paraleldir. Kompakt matris ve geopolimer numunelerinin yüksek mukavemeti, geçirgen yapıdaki su genişemesinin hacimce %9'una genişlemesi ile oluşturulan hidrolik basınç nedeniyle, mikro çatlaklar oluşana kadar donma etkisinin basınçlarına direnmeye yardımcı olur. Numunedeki hava boşlukları, mikro çatlakların ve numunelerin bozulmasının başlıca nedeni olan dondurucu buzla dolmuştur. UPV test sonuçları incelendiğinde, 180 döngüden sonra, en yüksek değer %50 BZ' de 3450 m / s iken, elde edilen en düşük değer %75 MR' da 3230 m / s dır. Metakaolin'in yüksek aktif puzzolan karakteri ve atık dolgu malzemelerinin çok ince yapısı nedeniyle, numuneler donma-çözülme döngüsünün etkisine dayanmak için çok tatmin edici bir davranış göstermiştir.

Çizelge 5.10: Basınç dayanımı (Mpa)

	28 Günlük (Mpa)	180 Gönğü (Mpa)
Kontrol	63,07	58,215
%25 LS	59,72	52,53
%50 LS	57,68	49,66
%75 LS	54,6	45,12
%25 MR	51,91	45,615
%50 MR	52,83	45,72
%75 MR	46,86	39,095
%25 BZ	65,87	61,73
%50 BZ	74,94	69,285
%75 BZ	62,03	55,1

Çizelge 5.11: Eğilme dayanımı (Mpa)

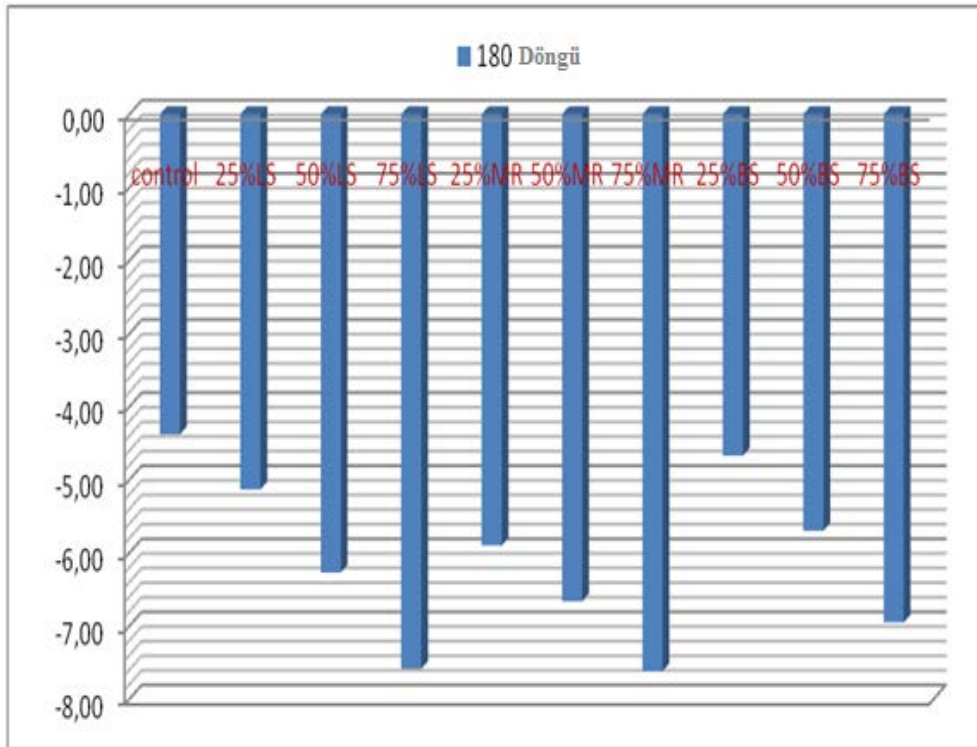
	28 Günlük (Mpa)	180 Döngü (Mpa)
Kontrol	11,03	9,51
%25 LS	14,10	9,745
%50 LS	13,83	8,935
%75 LS	13,28	8
%25 MR	12,30	8,245
%50 MR	12,62	8,175
%75 MR	10,50	6,47
%25 BZ	10,13	8,875
%50 BZ	11,88	9,94
%75 BZ	10,63	8



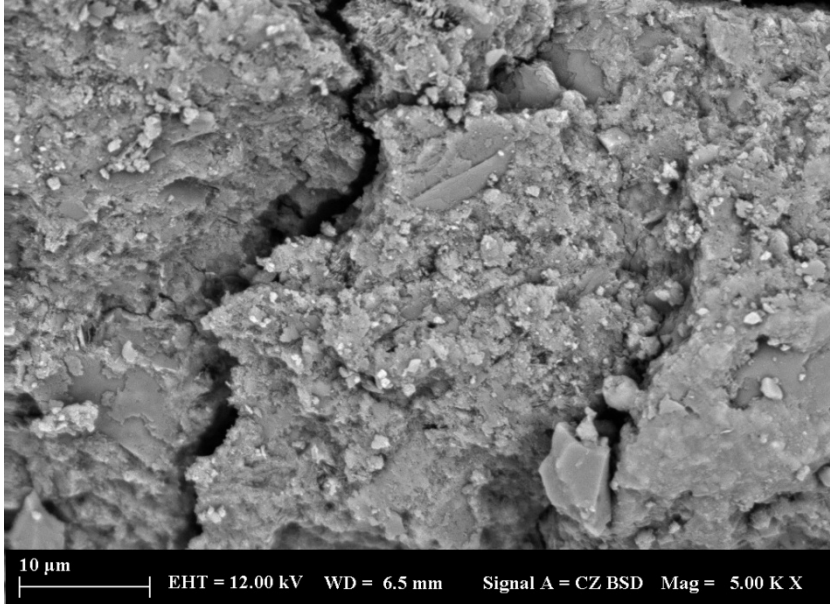
Şekil 5. 30: 180 döngü'den sonra ultrases geçiş hızı sonuçları (m/s)

5.2.2.2 Ağırlık değişimi, görsel inceleme ve analizler

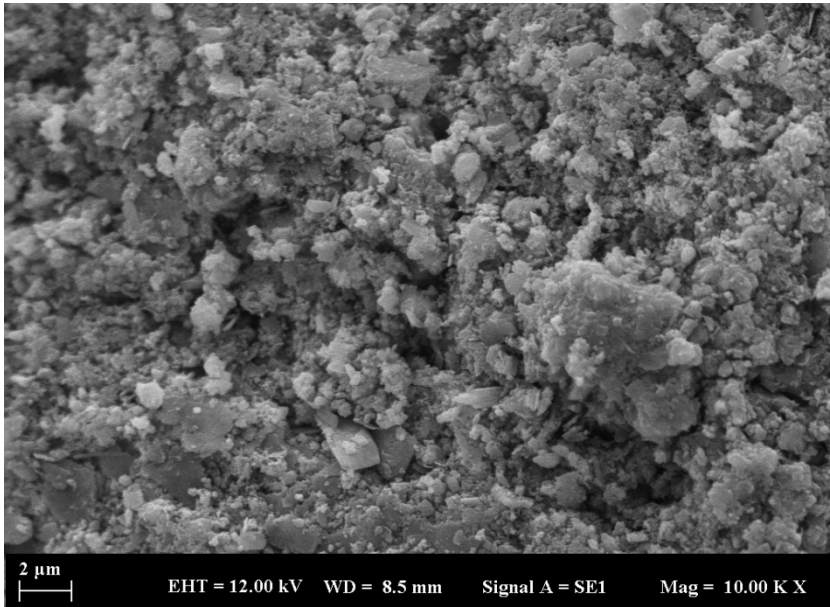
Numunelerin kompakt yapısı ve atık dolgu malzemelerinin ince agrega nedeniyle ağırlık kaybı artmıştır. En düşük ağırlık artışı kontrol numunesinde% 4.38 ve en yüksek ağırlık artışı %75 MR numunesinde 180 döngüden sonra %7.63 olmuştur. Ağırlık değişiklikleri (%) sonuçları Şekil 18'de gösterilmektedir. Numunelerin dış ve iç nemli ortam hareketi ve mikro çatlakları ağırlık değişikliğinin nedenleridir, numunelerin artan ağırlığı ise mikro- hasarlı alanlarda çatlaklar. Ayrıca, geopolimer numuneleri yüzeyinin dış görünümünde, önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Elde edilen sonuçlar diğer maddelerle tutarlıdır (Pilehvar, Szczotok et al. 2019, Zhao, Yuan et al. 2019).



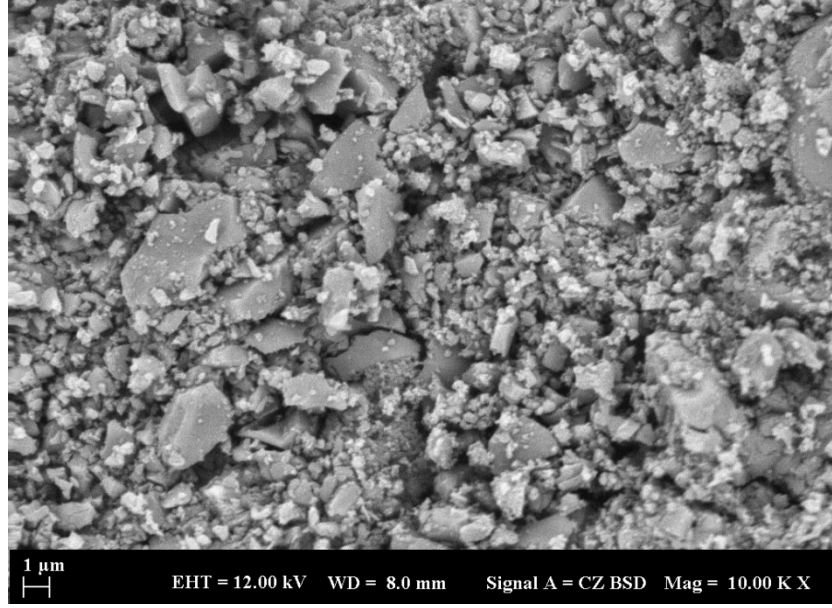
Şekil 5.31: 180 döngü'den sonra ağırlık değişimi (gr) sonuçları



Şekil 5.32: 180 döngü'den sonra maruz kalan kontrol numunesinin SEM görüntüleri 5000 kez büyütülmüş



Şekil 5.33: 180 döngü'den sonra maruz kalan %25 BZ numunesinin SEM görüntüleri 5000 kez büyütülmüş



Şekil 5. 34: 180 döngü'den sonra maruz kalan %50 BZ numunesinin SEM görüntüleri 5000 kez büyütülmüş

5.2.3 Magnezyum ve sodyum sülfat etkisinin incelenmesi

Geopolimer harç numuneleri 60 günlük, 120 günlük ve 180 günlük boyunca 10% Sodyum Sülfat (Na_2SO_4) ve 10% Magnezyum Sülfat ($MgSO_4$) çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Her numune için sonuçlar, 28 günlük sonuçlarla karşılaştırıldığında (Tablo 5.12 ve 5.13) 'de verilmiştir.

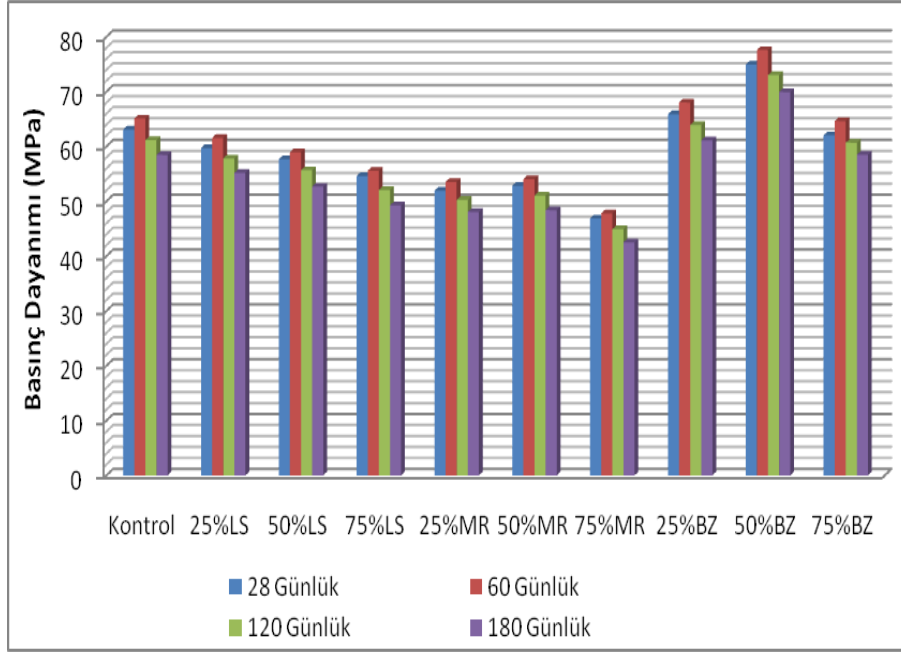
5.2.3.1 Basınç dayanım sonuçları

Çizelge 5.12: Magnezyum ve sodyum sülfat etkisi nedeniyle basınç dayanımı kayıp oranları (%).

	Magnezyum Sülfat			sodyum Sülfat		
	60 günlük	120 günlük	180 günlük	60 günlük	120 günlük	180 günlük
Kontrol	-3,20	3,044	7,33	-3,87	2,28	3,98
%25 LS	-3,08	3,215	7,59	-3,55	2,58	4,14
%50 LS	-2,18	3,519	8,69	-2,50	2,98	5,43
%75 LS	-1,79	4,634	9,82	-2,09	3,30	6,37
%25 MR	-3,12	3,198	7,42	-3,62	2,47	4,06
%50 MR	-2,31	3,407	8,42	-2,65	2,84	5,13
%75 MR	-1,98	4,140	9,28	-2,16	3,20	6,21
%25 BZ	-3,25	2,960	7,22	-3,96	2,28	3,87
%50 BZ	-3,52	2,575	6,70	-4,03	2,19	3,52
%75 BZ	-4,19	2,176	5,67	-4,48	1,81	2,97

Magnezyum sülfat etkisine göre, basınç dayanımındaki dalgalanmalar 120 güne kadar görülmüştür, meydana gelen dalgalanmalar magnezyumun alkali iyonlar karışımından çözeltiye difüzyonuna bağlı olarak oluşan matris difüzyona neden olmuştur (Topçu, Demirel et al. 2017). Ayrıca, 120 güne kadar güçte bir azalma gözlenmiştir. Mikro çatlakların varlığı ve alkali çözeltiye geopolimer geçişi 120 günde güç kaybına neden olmuştur. Oda sıcaklığında 28 günlük sonuçlara kıyasla 60 günlük sonra geopolimer numunelerinde magnezyum sülfatın basınç dayanımı artış oranı %1.79 ile %4.19 arasındadır. 120 gün sonra %2.17 ile %4.63 arasında basınç dayanımı azalması meydana gelirken, 180 gün sonra azalma 5.67% ile 9.82% arasındadır. Sonuçlar tabloda gösterilmiştir. 60 gün basınç dayanımı LS ve BZ tozu sırasıyla 58.94 MPa ve 77.58 MPa iken kontrol numunesi 65.09 MPa dır. 120 gün için sonuçlar 73.01 MPa ve 50.25 MPa arasındadır. 180 gün boyunca elde edilen sonuçlar, BZ ve MR toz numuneleri için sırasıyla 69.92 MPa ve 42.51 MPa arasındadır. Sonuçlara göre, geopolimer numunelerinin magnezyum sülfat atak etkileri altında daha iyi davranış gösterdiği görülmüştür. Magnezyum sülfat atağından 6 ay sonra kontrol, BZ ve LS numunelerinde meydana gelen mikroyapısal değişiklikler görülmüştür. Geopolimerik malzemelerin sülfatlara karşı mükemmel direnci daha düşük bir Ca içeriğine bağlı alüminosilikat polimer yapısına sahip olan kaynak malzemeye bağlıdır. Kireçtaşı tozu ve mermer tozu olarak daha yüksek bir Ca içeriğine sahip malzemelere magnezyum eklendiğinde alçıtaşı elde edilmektedir.

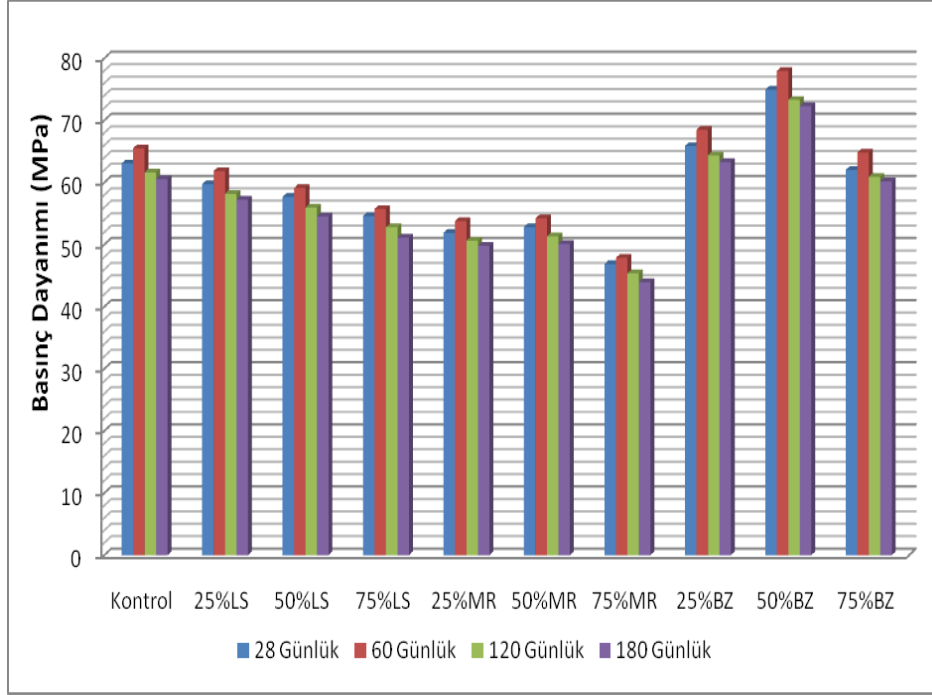
C-A-S-H ayrışmasından oluşan Ca ve $MgSO_4$, XRD ve SEM analizleri sonucu tanımlandığı görülmüştür. Ayrıca, geopolimer malzemeler standart çimento hidrasyon ürünlerine göre atak sülfatına daha az duyarlıdır. Düşük Ca içeriğinin metakaolin dayanıklılığında önemli bir özellik olduğu bulunmuştur. Bu durumda, reaksiyon üretimi, üç boyutlu bir yapıya sahip olan ve GPC hidrasyonunda oluşan hidratlanmış kalsiyum silikat jelinden önemli ölçüde farklı olan bir alkali jeldir (alüminosilikat).



Şekil 5. 35 : Magnezyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.

Geopolimer numuneleri, sodyum sülfat ile sonuçlarda basınç dayanımında 120 güne kadar dalgalanmalar göstermiştir. Geopolimerizasyon reaksiyonu, sülfata maruz kalma süresi ile devam etmiştir. Sodyum sülfatın bir aktivasyon faktörü olarak hareket etme yeteneğine sahip olması nedeniyle artan basınç mukavemeti ile sonuçlanmıştır. Sülfat ile birleştirilmiş kalsiyum (Ca) genişleme ürünleri gözenek yapısını sürekli olarak 120 güne kadar doldurmuştur. Bu süreden sonra 180 güne kadar dirençte bir azalma gözlenmiştir. Dikkat çekici çatlaklar ve 120 gün sonra yüksek gözeneklilik oranı, mukavemetin azalmasına neden olmuştur. Magnezyum sülfat, sodyum sülfattan daha agresif bir çözeltilidir. 120 gün sonra, sodyum sülfat etkisinde dayanım kaybı magnezyum sülfat etkisinden daha düşüktür. 60 gün sonra, geopolimer numunelerinin basınç dayanımındaki artış %2.09 ve %4.48 olmuştur. 120. günde dayanım 1.81% ile 3.30% arasında bir azalma olmuştur. 180 gün sonra azalma %2.87 ile %6.37 arasındadır. 61.84 MPa, 58.18 MPa ve 57.25 MPa basınç dayanımı, sırasıyla 60 gün, 120 gün ve 180 gün içinde 25LS'de elde edilmiştir. %50 BZ numunede, basınç mukavemeti 77.96 MPa, 73.36 MPa ve 72.31MPa sırasıyla 60 gün, 120 gün ve 180 gün içinde elde edilmiştir. Ayrıca, 50%MR'nin basınç mukavemeti sonuçları, 60 gün, 120 gün ve 180 gün içinde sırasıyla 54.23 MPa, 51.33 MPa ve 50.12 MPa dır. Basınç dayanımı sonuçları, Şek. 2 sonuçlara göre, geopolimer

numunelerinin sodyum sülfat altında daha iyi magnezyum sülfat altında mükemmel davranışa sahip olduğu gözlenmiştir.



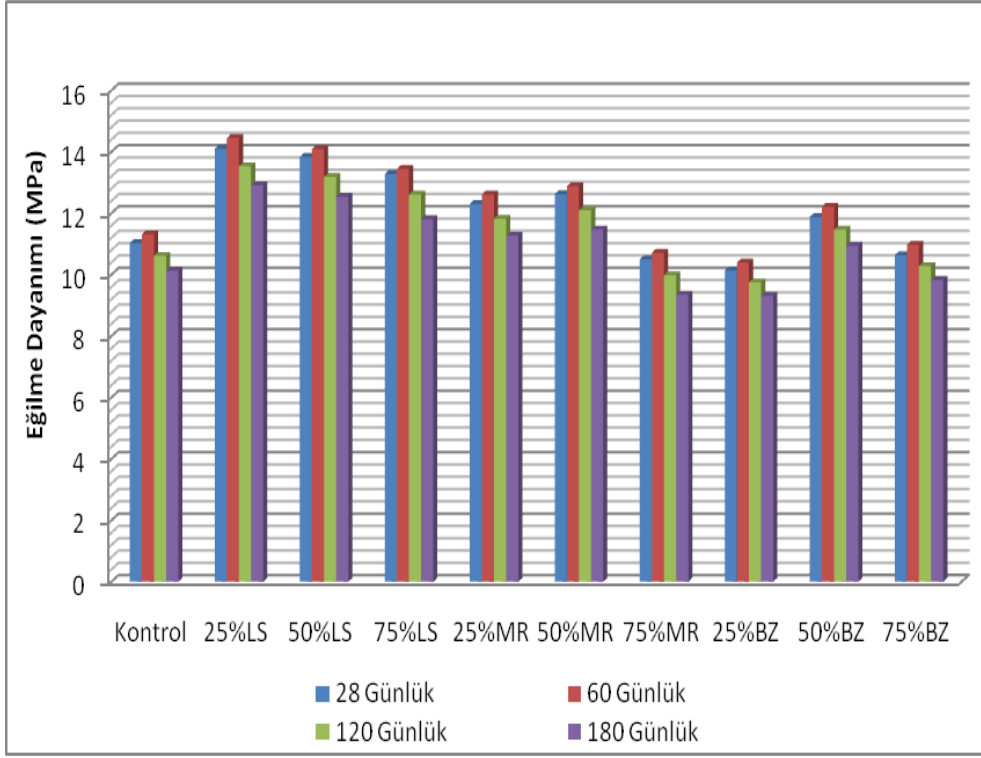
Şekil 5.36: Sodyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.

5.2.3.2 Eğilme dayanım sonuçları

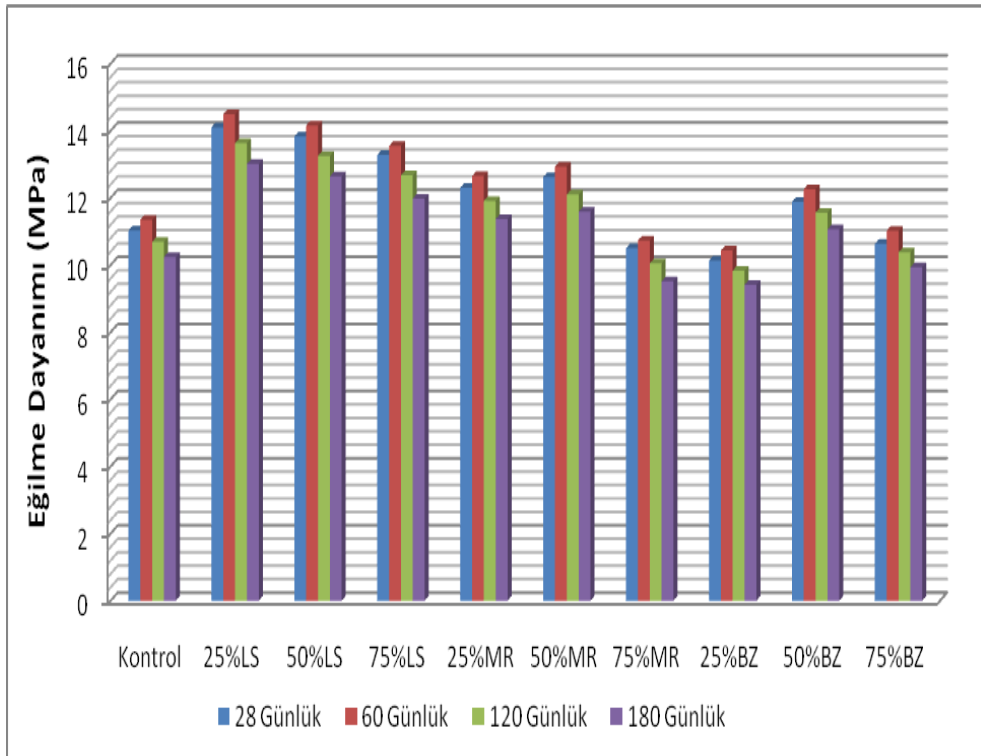
Çizelge 5. 13: Magnezyum ve sodyum sülfat etkisi nedeniyle eğilme dayanımı kayıp oranları (%).

	Magnezyum sülfat			Sodyum sülfat		
	60 günlük	120 günlük	180 günlük	60 günlük	120 günlük	180 günlük
Kontrol	-2,54	3,81	8,16	-2,90	3,08	7,16
25%LS	-2,48	4,04	8,44	-2,77	3,33	7,73
50%LS	-1,88	4,70	9,33	-2,39	4,19	8,60
75%LS	-1,20	5,05	11,07	-2,03	4,59	9,79
25%MR	-2,52	3,90	8,37	-2,85	3,17	7,56
50%MR	-2,06	4,12	9,11	-2,46	4,12	8,16
75%MR	-2,00	4,95	10,95	-2,19	4,29	9,43
25%BZ	-2,57	3,75	8,09	-2,96	2,96	7,11
50%BZ	-2,78	3,54	7,83	-3,20	2,69	6,90
75%BZ	-3,20	3,29	7,53	-3,67	2,35	6,59

Geopolimer numunesinin çözeltiliye maruz bırakılarak eğilme mukavemeti sonuçları elde edilmiştir. 28 günlük sonuçlarla karşılaştırıldığında, üretilen numunelerin maksimum bozulma 180 gün maruz kalma süresinde gözlenmiştir. Magnezyum sülfat ve sodyum sülfat etkisiyle eğilme dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Bilindiği gibi magnezyum sülfat, sodyum sülfattan daha agresif bir çözeltilidir. Böylece, eğilme mukavemeti azalma oranı sırasıyla en düşük sodyum sülfat ve daha sonra magnezyum sülfat içinde oluşur. Sonuçlara göre, geopolimer numunelerinin agresif olması nedeniyle sodyum sülfat altında magnezyum sülfattan daha iyi bir davranış sergilediği gözlenmiştir. 60 gün sonra, magnezyum sülfat etkisi altında eğilme mukavemeti geopolimer numuneleri %1.20 ve %3.21 arasında değişmekte ve 120 gün sonra % 3.29 ve % 5.05 arasında ve 180 gün sonra %7.53 ve %11.07 arasında düşmektedir (Tablo 5.13). 14.45 MPa, 13.53 MPa ve 12.91 MPa eğilme mukavemeti, sırasıyla 60, 120, 180 gün içinde 25LS'de elde edilmiştir. 50%MR numunelerinde, sırasıyla 60, 120, 180 günde 12.88 MPa, 12.1 MPa ve 11.47 MPa'nın eğilme mukavemeti sonuçları elde edilmiştir. Magnezyum sülfat eğilme mukavemeti sonuçları (Şekil 5.37 ve 5.38). Geopolimer numunelerinin eğilme mukavemeti 60 günde sodyum sülfat etkisi ile artar; elde edilen sonuçlar %2.03 ve %3.67 arasındadır. 120 gün sonra, geopolimer numunelerinin sonuçları %2.35 ve 4.59% arasında önemli ölçüde azalırken, 180 gün sonra azalma %6.59 ile %9.79 arasında olmuştur (Tablo 5.13). %25 LS geopolimer numunelerinden elde edilen eğilme mukavemeti sonuçları 60, 120, 180 gün içinde sırasıyla 14.49 MPa, 13.63 MPa ve 13.01 MPa dır. %50 MR numunelerinin yanı sıra, elde edilen eğilme mukavemeti sonuçları 60, 120, 180 günlük içinde sırasıyla 12.93 MPa, 12.1 MPa ve 11.59 MPa dır. Sodyum sülfat eğilme mukavemeti sonuçları, Şekil. 5.37 ve 5.38 göstermektedir.



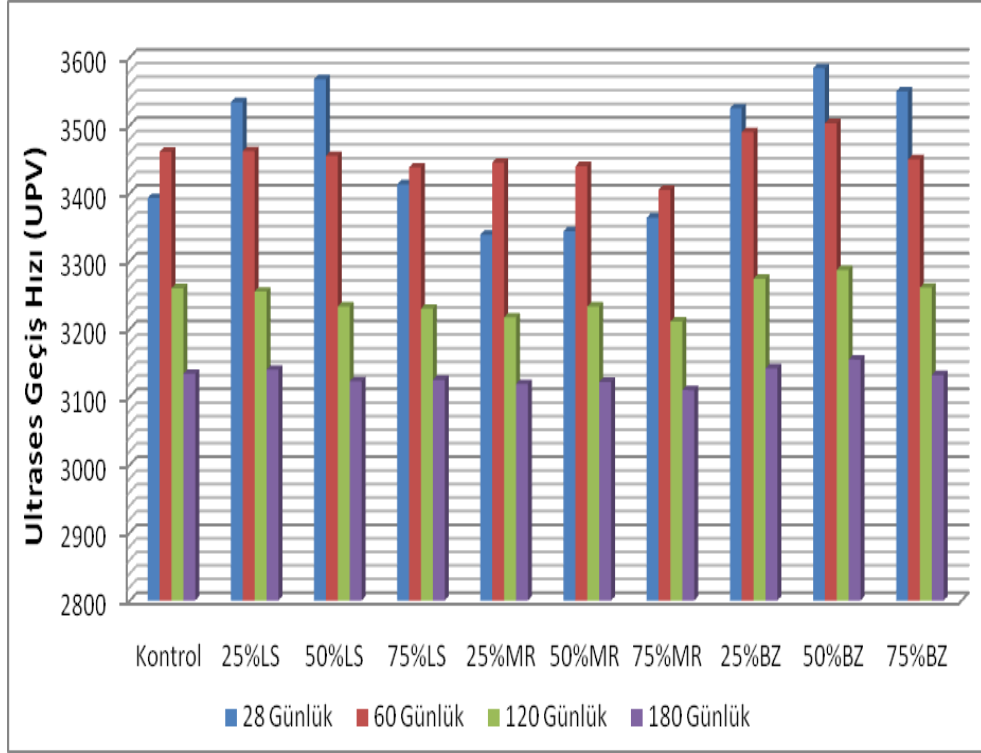
Şekil 5.37: Magnezyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerinin eğilme mukavemeti sonuçları.



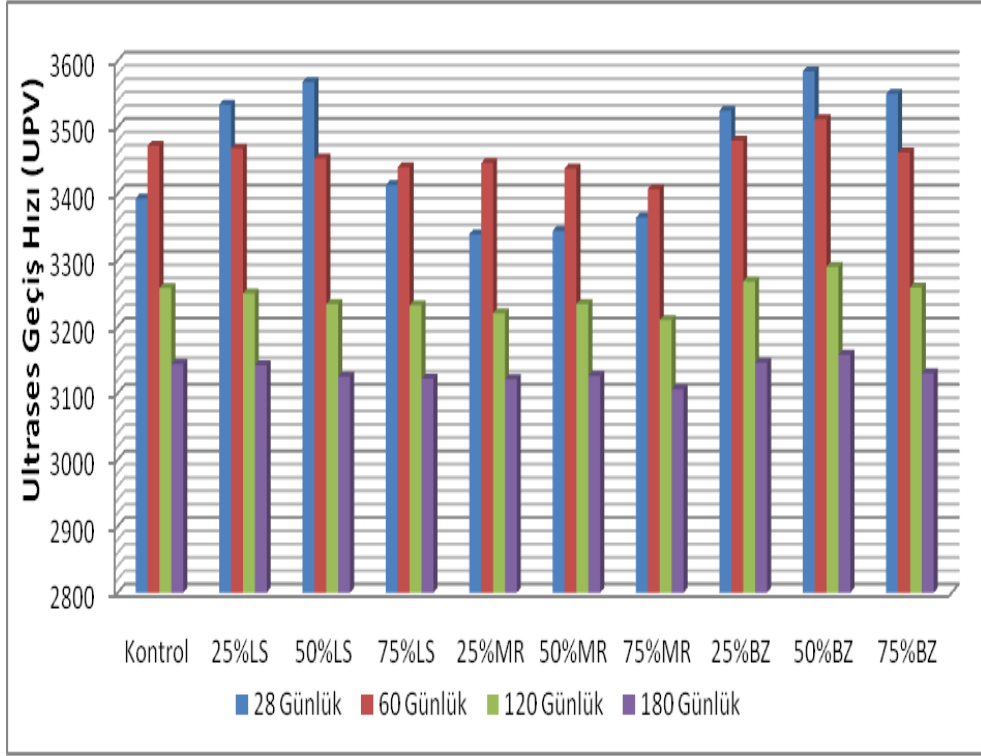
Şekil 5.38: Sodyum sülfata maruz kalan geopolimer numunelerinin eğilme mukavemeti sonuçları.

5.2.3.3 Ultrases geçiş hızı sonuçları

Çözelti etkilerine maruz bırakıldığında elde edilen UPV sonuçları 28 günlük sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 5.39 ve 5.40). UPV testinin değişimi, çözeltilerin etkilerine maruz kaldıktan sonra numunelerin UPV sonuçlarından elde edilmiştir (Tablo 5.14).



Şekil 5.39: Magnezyum sülfatın UPV sonuçları.



Şekil 5.40: Sodyum sülfatın UPV sonuçları.

Çizelge 5.14: Magnezyum ve sodyum sülfat etkisi nedeniyle UPV kayıp oranları (%).

	Magnezyum sülfat			Sodyum sülfat		
	60 Günlük	120 Günlük	180 Günlük	60 Günlük	120 Günlük	180 Günlük
Kontrol	-2,00	3,92	7,63	-2,33	3,98	7,34
25%LS	2,04	7,89	11,15	1,87	8,04	11,09
50%LS	3,17	9,39	12,47	3,22	9,36	12,42
75%LS	-0,73	5,36	8,44	-0,79	5,30	8,53
25%MR	-3,17	3,65	6,59	-3,20	3,56	6,53
50%MR	-2,87	3,32	6,64	-2,81	3,29	6,52
75%MR	-1,22	4,55	7,55	-1,28	4,58	7,67
25%BZ	0,99	7,12	10,87	1,28	7,29	10,75
50%BZ	2,26	8,29	11,97	2,01	8,20	11,89
75%BZ	2,82	8,14	11,77	2,48	8,20	11,83

Magnezyum sülfat ve sodyum sülfatın etkisiyle, boşlukların sülfat tuzları ve hidrasyon ürünleri ile çözeltinin etkisi altında doldurulması nedeniyle UPV test sonuçlarında 60 güne kadar bir artış olmuştur (Topçu and Karakurt 2008).

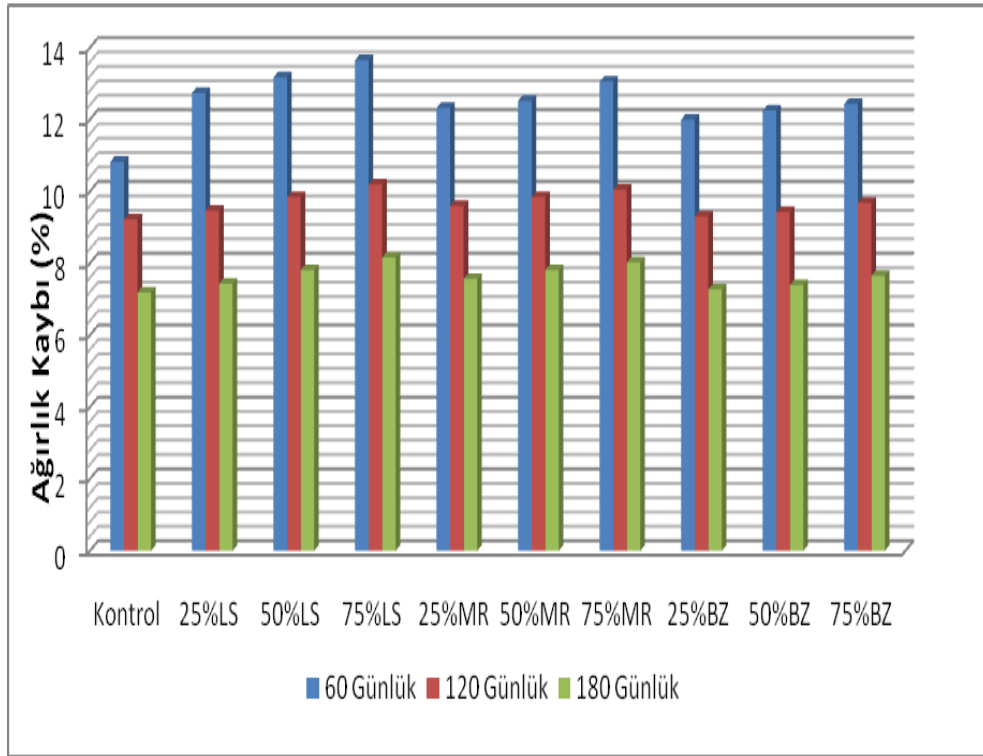
Sonuçlar daha sonra oluşan mikro çatlakların etkisiyle azaltılmıştır. Magnezyum sülfat, sodyum sülfattan daha agresif bir çözeltilidir (Chindaprasirt, Chareerat et al. 2007). Böylece, UPV testi artış oranı en yüksek sodyum sülfat ve magnezyum sülfatta oluşmuştur. Sonuçlara göre, geopolimer numunelerinin sülfat çözeltilerinin etkisi altında daha iyi davranışa sahip oldukları gözlenmiştir. 60 gün sonra, geopolimer numunelerinde magnezyum sülfat etkisi ile UPV sonuçları artış oranları %0.99 ile %3.17 arasındadır. 120 günün sonunda %3.32 ile %9.39 arasında bir azalma olmuştur. Ayrıca 180 gün sonra %6.59 ile %10.87 arasındadır. Geopolimer, %25 LS numuneleri, 3462 m / s, 3255 m / s ve 3140 m / s UPV sonuçları sırasıyla 60 gün, 120 gün ve 180 gün içinde elde edilmiştir. Ayrıca, 50% BZ numuneleri için UPV sonuçları sırasıyla 603 gün, 120 gün ve 180 gün içinde 3503 m / s, 3287 m / s ve 3155 m / s olarak elde edilmiştir. Geopolimer numunelerinin sodyum sülfat etkisi altında 60 günde artan UPV sonuçları %0.79 ila %3.22 arasındadır. 120 günde %3.29 ile 9.36% arasında bir azalma olmuştur. Böylece, 180 gün sonra, azalma %6.53 ile %10.75 arasında olmuştur. Geopolimer 25%LS numuneyi, 3468 m / s, 3250 m / s ve 3142 m / s UPV sonuçları sırasıyla 60 gün, 120 gün ve 180 gün içinde elde edilmiştir. Ayrıca, 50BZ numunrsi için UPV sonuçları sırasıyla 60 gün, 120 gün ve 180 gün içinde elde edilen 3512 m / s, 3290 m / s ve 3158 m / s dır.



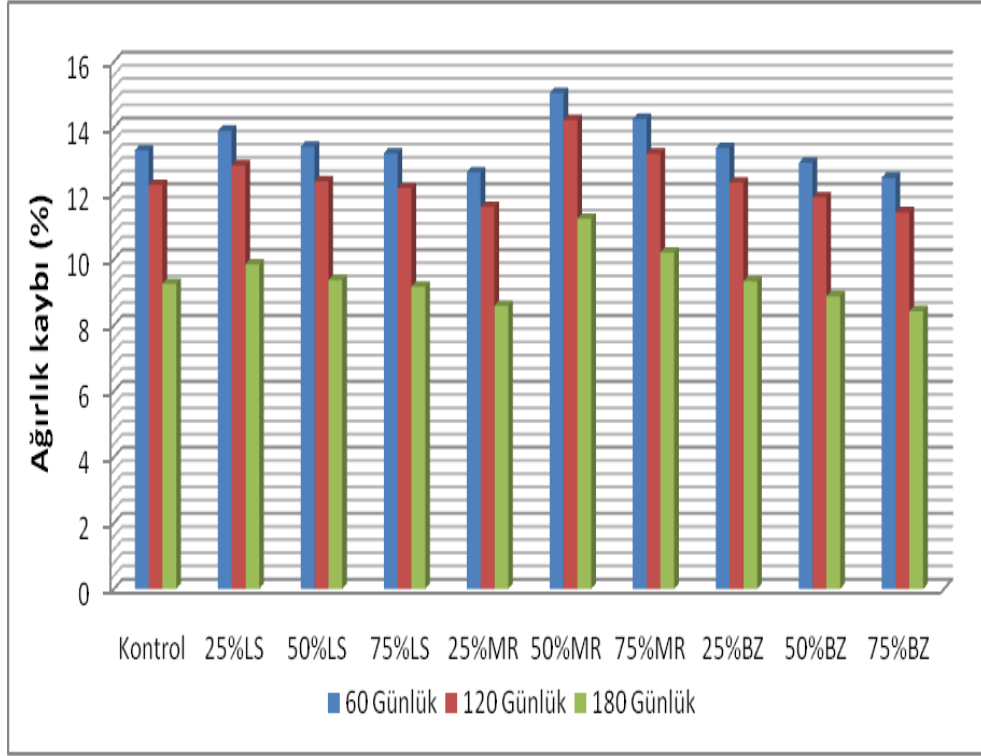
Şekil 5.41: Ultrases Geçiş Hızı testi

5.2.3.4 Ağırlık kaybı sonuçları

Magnezyum sülfat ve sodyum sülfatın etkisi altında, ağırlıkta 60 güne kadar bir artış olmuştur. Böylece bir çözeltinin etkisi altında boşluklara sülfat tuzları ve hidrasyon ürünleri doldurulmuştur (Pilehvar, Szczotok et al. 2019). Sonuçlar daha sonra oluşan mikro çatlakların etkisiyle azaltılmıştır. Magnezyum sülfat, sodyum sülfattan daha agresif bir çözeltilidir (Allahverdi, Abadi et al. 2014). Bu nedenlerden dolayı, ağırlık artışı oranı en yüksek sodyum sülfat ve magnezyum sülfatta görülür. Ayrıca, numuneleri deneyden önce 105 °C' de 24 saat boyunca fırına yerleştirmek daha iyi sülfat çözeltilerinin emilmesini ve daha etkili olmasını sağlamıştır. Magnezyum sülfatın geopolimer harçlara etkisi, 60 gün içindeki ağırlık artış oranları %10.83 ile %13.65 arasındadır. 120 gün içindeki ağırlık artış oranları %9.22 ile %10.19 arasında ve 180 gün ağırlık artış oranları arasındadır. 28 günlük numuneye göre %7.19 ve% 8.16 (Şekil 5.42) dır. Geopolimer harçların ağırlığındaki sodyum sülfat etkisi 60 günde, 120 günde, 180 günde artar, elde edilen sonuçlar 60 günde %12.64 ila %15.05, %11.59 ve %14.23, %8.43 ve %11.23 arasındadır, 120 gün ve 180 gün sırasıyla (Şekil 5.43) da gösterilmiştir.



Şekil 5.42: Magnezyum sülfatın ağırlık değişiklikleri



Şekil 5.43: Sodyum sülfatın ağırlık değişiklikleri

5.2.3.5 Görsel inceleme

Test numunelerin magnezyum ve sodyum sülfat çözeltileri içinde nemlendirildikten sonraki 60 günlük ve 120 günlük görsel görünüşleri (Şekil 5.44) de dir. Açıkça, imal edilen geopolimer numunelerinin yüzey görünümünde çatlama, yüzey erozyonu gibi bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Geopolimer havanın sülfatlara karşı iyi bir dirence sahip olduğu, ASTM C1012-13' te önerilen genleşme sınırlarına uyduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, numuneler hem magnezyum hem de sodyum sülfat çözeltilerinden hemen çıkarıldıktan ve oda sıcaklığında 25°C' de tutulduktan 180 gün sonra, üretilen geopolimer harç numunelerinin yüzeyinin arkasında biriken tuz saldırısı skalasını temizlemek için bir tel fırça kullanılmıştır. Mekanik olarak numunelerin bütünlüğünü etkilememiştir. Ayrıca hem magnezyum hem de sodyum sülfat çözeltileri için ciddi bir hasar gözlenmemiştir. Başkaları tarafından da benzer sonuçlar bildirilmiştir ve ciddi bir bozulma gözlenmemiştir. Benzer gözlemler diğer çalışmalarda da (Manzano, González-Teresa et al. 2010, Aye and Oguchi 2011) görülmektedir. Skvara ve ark. (Thokchom, Ghosh et al. 2010), geopolimer numunelerindeki jellerin çapraz bağlı yapısından dolayı, hidrasyon yan ürünleri

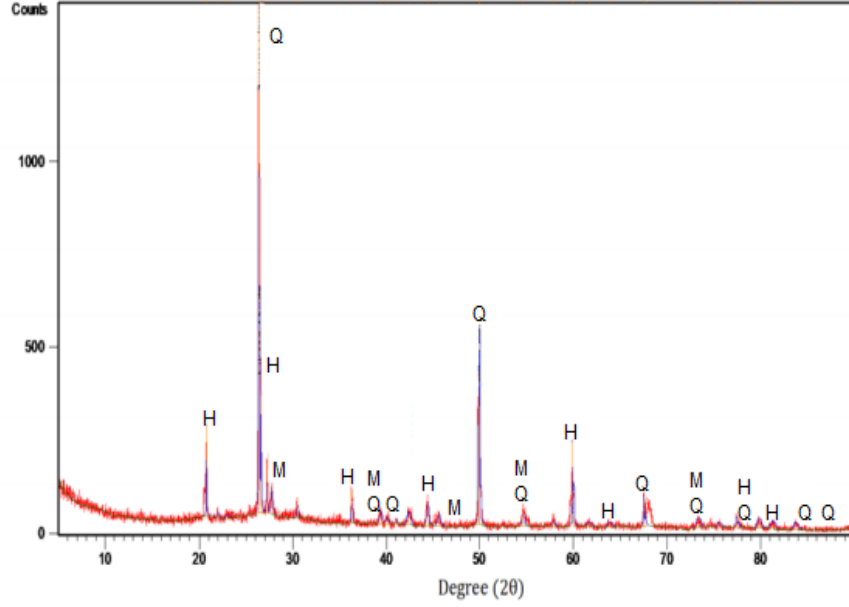
oluşturmaya daha az yatkınlıklarından ötürü bir yıldan uzun sürede yüzeyde bozulma belirtileri olmadığını belirtmiştir.



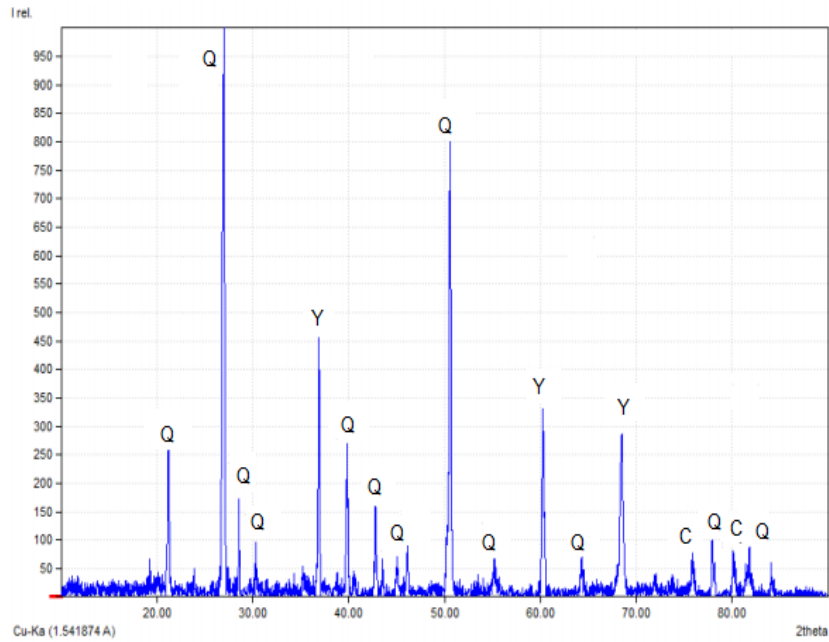
Şekil 5.44: (MgSO₄) maruz kaldıktan sonra numuneler , b) (Na₂SO₄) maruz kaldıktan sonra numuneler c) (MgSO₄) maruz kaldıktan sonra numuneler, d) (Na₂SO₄) maruz kaldıktan sonra numuneler

180 gün boyunca Na₂SO₄ ve MgSO₄'e maruz bırakıldıktan sonra geopolimer numunelerinin XRD analizi yapılmıştır. Geopolimer numuneleri XRD analizi, ham maddelerin kristalin fazlarını ortaya çıkartmıştır. MgSO₄'e maruz bırakılan kireçtaşı tozu ve mermer tozu numuneleri, C crystal (A) –ScH fazının kalsitin düşük kristalliğe (CSH) müdahale etmesi ile üretilen yüksek yoğunlukta yeni bir alçı fazı sergilemiştir. C– (A) –S–H faz piki (30 ° 2θ) 'de yer almaktadır. Ayrıca, neredeyse önemsiz olan düşük Ca içeriği nedeniyle kontrol ve bazalt tozu numunelerinde ciddi bir hasar görülmemektedir. Geopolimer numunesinin Na₂SO₄ çözeltisine maruz kalması ile ilgili olarak, herhangi bir daldırılmış numuneden farklı kristal fazlar yoktur, bunun için daha önce diğer araştırmacılar tarafından bahsedilenlere benzer, neredeyse önemsiz ufak mekanik kayıpları gözlenmiştir. Na₂SO₄, özellikle C-S-H ve zayıf alkalın çözünmeyen fazın stabilitesini azaltan alçıtaşı ve magnezyum hidroksit (brukit) üreten MgSO₄ ve Ca reaksiyonu nedeniyle kalker ve mermer tozu numuneler

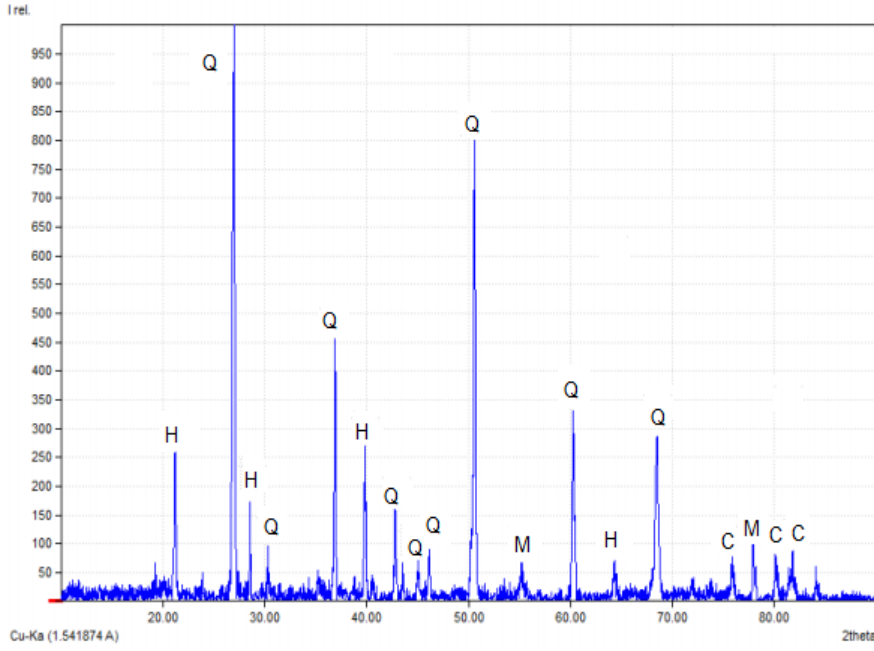
için ortaya çıkmıştır. Ayrıca, uzun vadede sülfat atağı ilerlemekle beraber C-S-H' den çıkarılan kalsiyum nedeniyle dekalsifikasyon meydana gelmektedir.



Şekil 5. 45: Sodyum sülfat maruziyetine maruz kaldıktan 180 gün sonra kontrol numunenin X-ışını difraktogramları

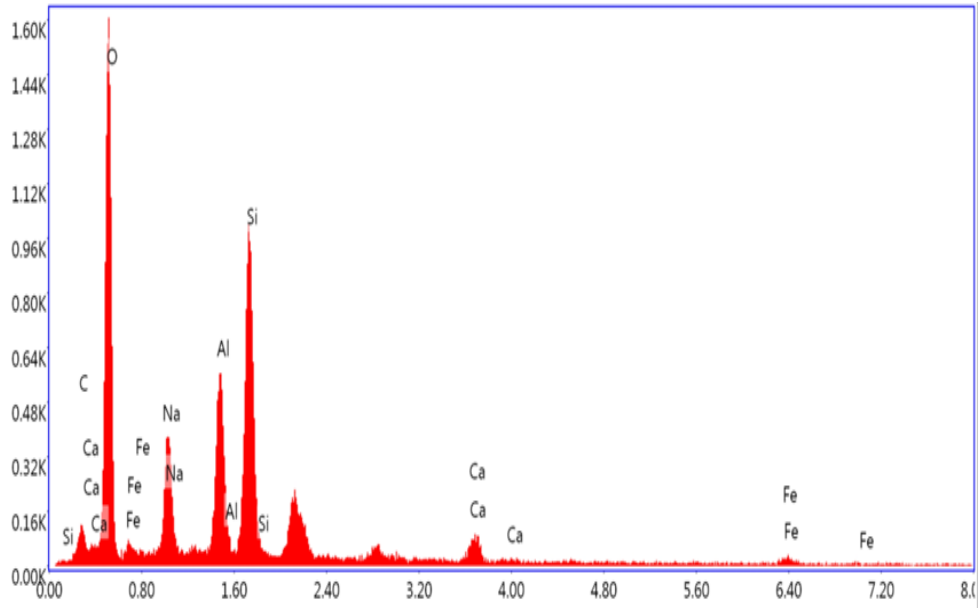
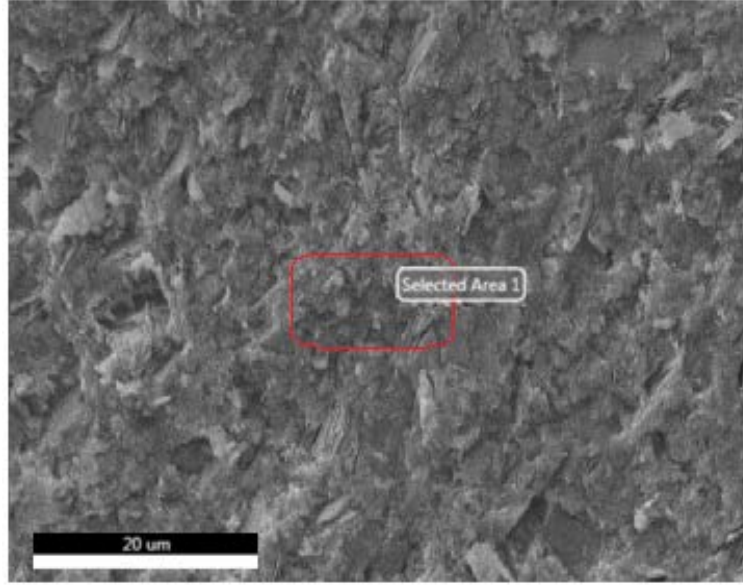


Şekil 5.46: 180 günlük magnezyum sülfat maruziyetinden sonra% 50 LS numunenin X-ışını difraktogramları

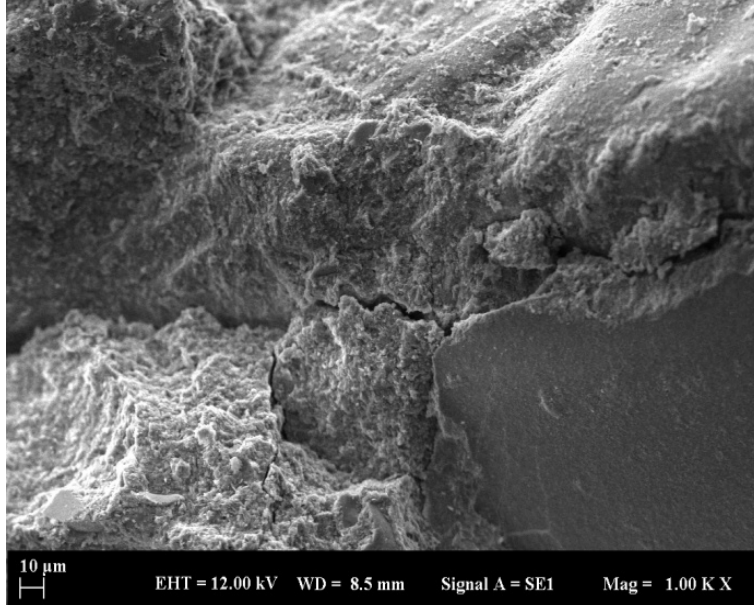


Şekil 5. 47: 180 günlük magnezyum sülfat maruziyetinden sonra %50 BZ numunenin X-ışını difraktogramları

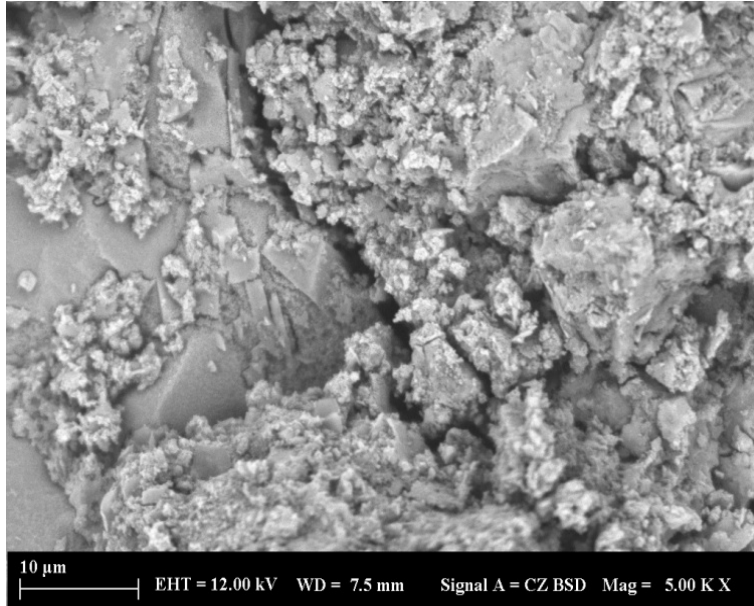
180 gün boyunca Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltilerine maruz bırakılan geopolimer numunelerin SEM mikrografları çekilmiştir. $MgSO_4$ içine daldırılmış kireçtaşı ve mermer tozu numuneleri, geopolimer fazında alçı kristallerinin oluşumunu sergilemiştir (Şekil 17). XRD analizi, numunede (Şekil 11) gösterildiği gibi alçı varlığını doğrulamıştır. Kontrol ve bazalt numuneleri için önemli bir değişiklik olmamıştır. Na_2SO_4 çözeltilerine daldırılan bu çalışmanın üretilen geopolimer numunelerinin yanı sıra, oluşan yeni fazları tanımak imkansızdır. Çünkü herhangi bir XRD analizi değişikliği, oluşturulan sonuçlar (Gomez-Zamorano, Vega-Cordero et al. 2016) tarafından açıklanan araştırmaya uygun olmuştur. SEM analizine ek olarak, elemanların matrisler içindeki dağılımını incelemek amacıyla kontrol numunesi için EDS analizi yapılmıştır (Şekil 14). Genel olarak, spektrum elemanların beklenen dağılımını göstermiştir. Spektrumdaki ana elementler, belirli bir geopolimerizasyon reaksiyonu gösteren ve ilgili sonuçlarla iyi bir korelasyon sağlayan Si, Fe ve Al' dır.



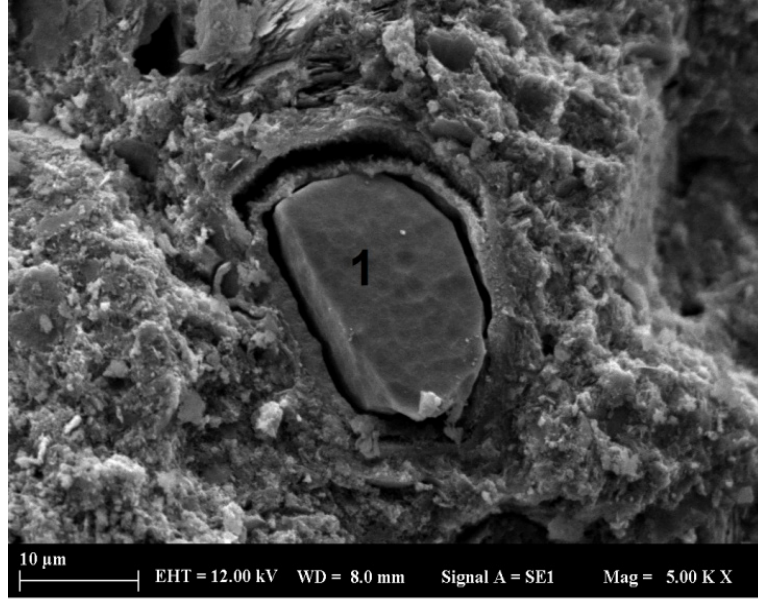
Şekil 5. 48: Sulfat çözeltisine maruz bırakılmadan önce kontrol numunesinin EDS spektroskopisi.



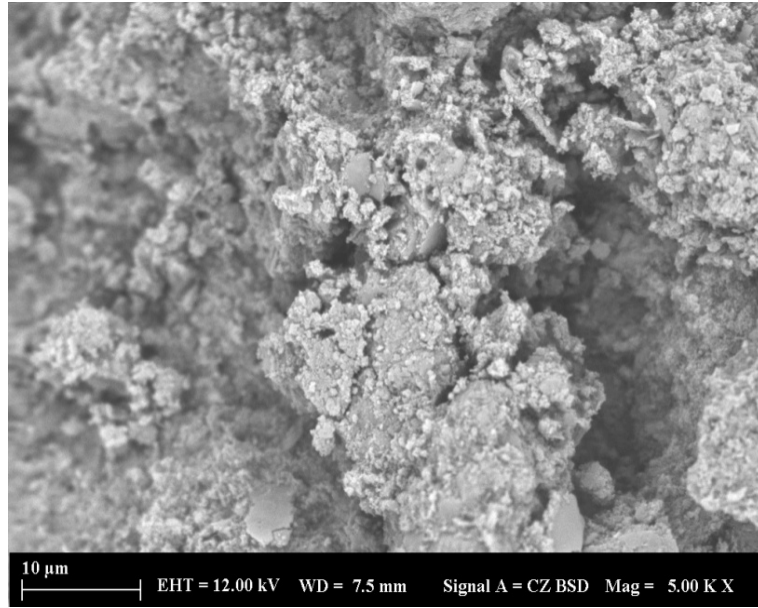
Şekil 5.49: Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakıldıktan sonra kontrol numune



Şekil 5.50: Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakıldıktan sonar %50% BZ numune



Şekil 5.51: Magnezyum sülfat çözeltisine (1: alçıtaşı) maruz bırakıldıktan sonar %50 LS numune



Şekil 5.52: Sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakıldıktan sonar %50 LS numune

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezin amacı metakaolin ve kırmızı çamur esaslı geopolimer üzerinde 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C' ye maruz kalan yüksek sıcaklık etkilerini araştırmaktır, kısmen dere kumu dolgu maddesi olarak kireçtaşı tozu, mermer tozu ve bazalt tozu ile değiştirilmiştir. 180 devir donma-çözülme etkisinin altındaki davranış testleri yapılmıştır. Ayrıca dayanıklılık, belirlenen metakaolin ve kırmızı çamurun özelliklerine yönelik testler yapılmıştır. Üç istisnai orana sahip (%25, %50 ve %75) dolgu malzemeleri olarak kireçtaşı tozu, mermer tozu ve bazalt tozu kullanımına dayanarak su emme ve gözeneklilik, UPV, yarma çekme, basınç ve eğilme mukavemeti üzerindeki etkiyi öğrenmek için karşılaştırmalı bir inceleme de yapılmıştır. Geopolimer harçlara, dolgu malzeme olarak dere kumu ve bağlayıcı malzemeler olarak metakaolin ve kırmızı çamur kullanılmıştır. Mikro yapısal değerlendirmenin yanı sıra, incelenen numuneler Taramalı Elektron Mikroskobisi (SEM) kullanımı ile karakterize edilmiştir. SEM, üretilen numunelerin geopolimer harç özelliklerinin mikro yapısal bileşimini görsel inceleme ve basınç dayanımı ölçümü ile birlikte incelemek için yapılmıştır. Metakaolin ve kırmızı çamur tarafından ($NaOH$ ve Na_2SiO_3)kimyasal maddeler ile aktive edilen bağlayıcı maddeler ve dolgu maddesi olarak kireçtaşı tozu, mermer tozu ve bazalt tozu, farklı oranlarda (25%, 50% ve 75%) dere kumu yerine kullanılan geopolimer harç kullanılmıştır. Üretilen geopolimer numunelerinin performansı, %10 magnezyum sülfat ve %10 sodyum sülfat çözeltilerinin etkisi altında gerçekleştirilmiştir. Görsel numuneler, bu numunelerin mukavemet özellikleri, ağırlık değişimleri, XRD ve SEM analizleri ile deneysel olarak elde edilmiştir.

- Mekanik özellikler hakkında, tüm numuneler için 7, 28 ve 56 günlük süresinde basınç ve eğilme mukavemetini gözlemleyen önemli bir artış tahmini olmuştur. Bazalt toz numunelerinin 56 günlük basınç ve eğilme mukavemeti, kontrol, mermer tozu ve kireçtaşı tozu geopolimer numunelerine göre daha yüksektir.

- • Kontrol numunesinin mikro yapısal analizi, alkalın çözeltileri ile metakaolin ve kırmızı çamur arasında kesin bir geopolimerizasyon göstermiştir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan bazalt tozu ve kireçtaşı tozu, geopolimerik matris için uygun ara yüz özelliklerine ve uygulanabilir ara yüzlere sahip kompozitler üretmiştir. Bununla birlikte, mermer tozu geopolimer numunelerinin SEM görüntüsü, kontrol numunelerine kıyasla mekanik ve durabilite açısından daha zayıf bir genel performans göstermektedir.
- • 600 °C ile 800 °C sıcaklık aralığında, geopolimer matris dehidrasyonuna bağlı olarak numunelerin basınç ve eğilme dayanımları azalırken, gözenekli yapıların büyümesi ve çatlakların yayılması nedeniyle eğilme dayanımı basınç dayanımından daha fazla bir azalma oluşturmuştur.
- • Atık dolgu malzemelerinin değiştirilmesi, özellikle bazalt tozu gibi mukavemet özelliklerini %75BZ oranında artırmıştır.
- 800 °C' den sonra, kayda değer miktarda renk değişimi ve daha düşük bir çatlak oranı kalmıştır. Bu, yüksek sıcaklık etkisi altındaki geopolimer numunelerinin kararlı koşulları korumasından oluşmaktadır.
 - 180 döngü donma-çözülme etkisi nedeniyle, mukavemet özelliklerinde ve UPV'de bir azalma gözlenirken, ağırlık kaybının sonuçları çevredeki nemli ortamın etkisiyle bozulmuş alanlardan dolayı bir artış göstermiştir.
 - Magnezyum sülfata maruz kaldıktan sonra numunelerin basınç ve eğilme dayanımları 60 günde artar, 120 gün sonra, özellikle geopolimer yapısında alçı kristallerinin oluşması nedeniyle kireçtaşı tozu ve mermer tozu basınç dayanımı düşmektedir.
 - Kontrol ve bazalt tozu numunelerinde, neredeyse önemsiz olan düşük Ca içeriği ve MgSO₄ ile kimyasal reaksiyonu engelleyen SiO₂ cam içeriğinin varlığı nedeniyle ciddi bir hasar görülmemiştir.
 - Atık dolgu malzemelerinin değiştirilmesi, özellikle bazalt tozu gibi mukavemet özelliklerini %75 oranında artırmıştır.

- $MgSO_4$ çözeltisi atağı, özellikle C-S-H stabilitesini ve zayıf alkalın çözünmeyen fazı azaltan $MgSO_4$ ve Ca reaksiyonu nedeniyle kireçtaşı tozu ve mermer tozu numuneleri için Na_2SO_4 'ten daha agresiftir.
- Bir çözeltinin etkisi altında sülfat tuzları ve hidrasyon ürünleri ile doldurulmuş boşluklar nedeniyle ağırlık değışiklikleri artmaktadır.
- Mekanik özellikler hakkında, 60 günlük basınç ve eğilme mukavemetini gözlemleyen önemli bir artış tahmini olmuştur, daha sonra 120 gnlükte bir azalma olmuştur. 60 günlük ise bazalt tozunun ve kontrol numunelerinin mermer tozu ve kireçtaşı tozu geopolimer numuneleri ile karşılaştırıldığında basınç ve eğilme mukavemeti daha yüksek olmuştur.
- Na_2SO_4 çözeltilerine daldırılarak imal edilen geopolimer numuneleri hakkında, herhangi bir XRD analizi değışikliğı bulunmadığından oluşan yeni fazları tanımak imkansızdır.
- Sonuç olarak, farklı oranlarla (%25, %50 ve %75) kullanılan atık malzemeleri (kireç taşı tozu, mermer tozu ve bazalt tozu), dere kumu oranları da (%25, %50 ve %75) değıştirilerek; oluşturulan kompozit malzemeleri karşılaştırdığımızda; özellikle bazalt tozu ile yapılan kompozitlerin dayanıklılığının, mekanik özelliklerinin ve mikro yapısal davranışlarının gelişmesine katkıda bulunmaktadır.

Ayrıca bir bağlayıcı madde olarak metakaolin ve kırmızı çamur oranına (% 50- % 50) diğer oranlara göre en iyi sonuçları vermektedir. Bu yüzdeler oranı; metakaolin, kırmızı çamur'u daha dayanıklı ve kullanılabilir hale getirmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdollahnejad, Z., F. Pacheco-Torgal, T. Félix, W. Tahri and J. B. Aguiar** (2015). "Mix design, properties and cost analysis of fly ash-based geopolymer foam." *Construction and Building Materials* 80: 18-30.
- Ahmari, S., L. Zhang and J. Zhang** (2012). "Effects of activator type/concentration and curing temperature on alkali-activated binder based on copper mine tailings." *Journal of Materials Science* 47(16): 5933-5945.
- Allahverdi, A., M. M. B. R. Abadi, K. M. A. Hossain and M. Lachemi** (2014). "Resistance of chemically-activated high phosphorous slag content cement against freeze-thaw cycles." *Cold regions science and technology* 103: 107-114.
- ASTM, A.** (2013). "Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)." *Annual Book of ASTM Standards Annual Book of ASTM Standards* 4(1): 1-9.
- Autef, A., E. Joussein, G. Gasgnier and S. Rossignol** (2012). "Role of the silica source on the geopolymerization rate." *Journal of Non-crystalline solids* 358(21): 2886-2893.
- Aye, T. and C. T. Oguchi** (2011). "Resistance of plain and blended cement mortars exposed to severe sulfate attacks." *Construction and Building Materials* 25(6): 2988-2996.
- Bai, C., G. Franchin, H. Elsayed, A. Zaggia, L. Conte, H. Li and P. Colombo** (2017). "High-porosity geopolymer foams with tailored porosity for thermal insulation and wastewater treatment." *J. Mater. Res* 32(17): 3251-3259.
- Bakharev, T.** (2005). "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions." *Cement and Concrete Research* 35(6): 1233-1246.
- Barbosa, V. F. and K. J. MacKenzie** (2003). "Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate." *Materials research bulletin* 38(2): 319-331.
- Behera, P., V. Baheti, J. Militky and P. Louda** (2018). "Elevated temperature properties of basalt microfibril filled geopolymer composites." *Construction and Building Materials* 163: 850-860.
- Bernal, S. A., R. M. de Gutiérrez and J. L. Provis** (2012). "Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends." *Construction and Building Materials* 33: 99-108.
- Bernal, S. A., P. V. Krivenko, J. L. Provis, F. Puertas, W. D. Rickard, C. Shi and A. van Riessen** (2014). Other potential applications for alkali-activated materials. *Alkali Activated Materials*, Springer: 339-379.
- Bonen, D. and M. D. Cohen** (1992). "Magnesium sulfate attack on portland cement paste—II. Chemical and mineralogical analyses." *Cement and concrete research* 22(4): 707-718.

- Celik, A., K. Yilmaz, O. Canpolat, M. M. Al-Mashhadani, Y. Aygörmez and M. Uysal** (2018). "High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers." *Construction and Building Materials* 187: 1190-1203.
- Cheng, T., M. Lee, M. Ko, T. Ueng and S. Yang** (2012). "The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer." *Applied Clay Science* 56: 90-96.
- Chindaprasirt, P., T. Chareerat and V. Sirivivatnanon** (2007). "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer." *Cement and concrete composites* 29(3): 224-229.
- Chung, C.-W., C.-S. Shon and Y.-S. Kim** (2010). "Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze-thaw cycles." *Construction and Building Materials* 24(9): 1739-1745.
- Davidovits, J.** (1982). *Mineral polymers and methods of making them*, Google Patents.
- Davidovits, J.** (1988). *Structural characterization of geopolymeric materials with X-ray diffractometry and MAS NMR spectroscopy*. Geopolymer.
- Davidovits, J.** (1989). "Geopolymers and geopolymeric materials. *J Thermal Anal* 35: 429-441; and (1991) *Geopolymers: inorganic polymeric materials. J Thermal Anal* 37: 1633-1656; and Šesták J, Foller B (2012) Some aspects of composite inorganic polysialates." *J Thermal Anal Calor* 109: 1-5.
- Davidovits, J.** (2002). *years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, Geopolymer Institute Saint-Quentin, France; Melbourne, Australia.*
- Davidovits, J.** (2005). *Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions: proceedings of the world congress geopolymer 2005, Geopolymer Institute.*
- Davidovits, J.** (2013). "Geopolymer cement." A review. Geopolymer Institute, *Technical papers* 21: 1-11.
- Davidovits, J., R. Davidovits and M. Davidovits** (2012). *Geopolymeric cement based on fly ash and harmless to use*, Google Patents.
- De Silva, P. and K. Sagoe-Crenstil** (2008). "Medium-term phase stability of Na₂O–Al₂O₃–SiO₂–H₂O geopolymer systems." *Cement and Concrete Research* 38(6): 870-876.
- De Silva, P., K. Sagoe-Crenstil and V. Sirivivatnanon** (2007). "Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂." *Cement and Concrete Research* 37(4): 512-518.
- Duxson, P., A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo and J. S. van Deventer** (2007). "Geopolymer technology: the current state of the art." *Journal of materials science* 42(9): 2917-2933.
- Duxson, P. and J. L. Provis** (2008). "Designing precursors for geopolymer cements." *Journal of the American Ceramic Society* 91(12): 3864-3869.
- Duxson, P., J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven and J. S. Van Deventer** (2005). "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 269(1-3): 47-58.

- El-Gamal, S. and F. Selim** (2017). "Utilization of some industrial wastes for eco-friendly cement production." *Sustainable Materials and Technologies* 12: 9-17.
- El-Hachem, R., E. Rozière, F. Grondin and A. Loukili** (2012). "Multi-criteria analysis of the mechanism of degradation of Portland cement based mortars exposed to external sulphate attack." *Cement and Concrete Research* 42(10): 1327-1335.
- Fabbri, B., S. Gualtieri and C. Leonardi** (2013). "Modifications induced by the thermal treatment of kaolin and determination of reactivity of metakaolin." *Applied Clay Science* 73: 2-10.
- Fernández-Jiménez, A., I. García-Lodeiro and A. Palomo** (2007). "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials." *Journal of Materials Science* 42(9): 3055-3065.
- Fu, Y., L. Cai and W. Yonggen** (2011). "Freeze–thaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete." *Construction and Building Materials* 25(7): 3144-3148.
- Geraldo, R. H., L. F. Fernandes and G. Camarini** (2017). "Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production." *Journal of cleaner production* 149: 146-155.
- Glukhovskiy, V.** (1959). "Soil silicates. Gostroiizdat Publish." Kiev, Ukraine (in Russian) 301.
- Gomez-Zamorano, L., E. Vega-Cordero and L. Struble** (2016). "Composite geopolymers of metakaolin and geothermal nanosilica waste." *Construction and Building Materials* 115: 269-276.
- Hajjaji, W., S. Andrejkovičová, C. Zanelli, M. Alshaaer, M. Dondi, J. Labrincha and F. Rocha** (2013). "Composition and technological properties of geopolymers based on metakaolin and red mud." *Materials & Design* (1980-2015) 52: 648-654.
- Hamaideh, A., B. Al-Qarallah, M. R. Hamdi, S. A. A. Mallouh and M. Alshaaer** (2014). "Synthesis of geopolymers using local resources for construction and water purification." *Journal of Water Resource and Protection* 2014.
- He, J., J. Zhang, Y. Yu and G. Zhang** (2012). "The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: a comparative study." *Construction and building materials* 30: 80-91.
- He, P., D. Jia, T. Lin, M. Wang and Y. Zhou** (2010). "Effects of high-temperature heat treatment on the mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced geopolymer composites." *Ceramics International* 36(4): 1447-1453.
- Hekal, E. E., E. Kishar and H. Mostafa** (2002). "Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances." *Cement and Concrete Research* 32(9): 1421-1427.
- Hu, W., Q. Nie, B. Huang, X. Shu and Q. He** (2018). "Mechanical and microstructural characterization of geopolymers derived from red mud and fly ashes." *Journal of Cleaner Production* 186: 799-806.
- Huseien, G. F., J. Mirza, M. Ismail, S. Ghoshal and A. A. Hussein** (2017). "Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80: 54-74.
- Iacobescu, R. I., G. N. Angelopoulos, P. T. Jones, B. Blanpain and Y. Pontikes** (2016). "Ladle metallurgy stainless steel slag as a raw material in

- Ordinary Portland Cement production: a possibility for industrial symbiosis." *Journal of Cleaner Production* 112: 872-881.
- Izquierdo, M., X. Querol, J. Davidovits, D. Antenucci, H. Nugteren and C. Fernández-Pereira** (2009). "Coal fly ash-slag-based geopolymers: microstructure and metal leaching." *Journal of hazardous materials* 166(1): 561-566.
- Juenger, M., F. Winnefeld, J. L. Provis and J. Ideker** (2011). "Advances in alternative cementitious binders." *Cement and concrete research* 41(12): 1232-1243.
- Kong, D. L. and J. G. Sanjayan** (2008). "Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures." *Cement and Concrete Composites* 30(10): 986-991.
- Kong, D. L., J. G. Sanjayan and K. Sagoe-Crentsil** (2007). "Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures." *Cement and concrete research* 37(12): 1583-1589.
- Lahoti, M., K. K. Wong, E.-H. Yang and K. H. Tan** (2018). "Effects of Si/Al molar ratio on strength endurance and volume stability of metakaolin geopolymers subject to elevated temperature." *Ceramics International* 44(5): 5726-5734.
- Łażniewska-Piekarczyk, B.** (2012). "The influence of selected new generation admixtures on the workability, air-voids parameters and frost-resistance of self compacting concrete." *Construction and Building Materials* 31: 310-319.
- Liu, H., T. Chen, X. Zou, C. Qing and R. L. Frost** (2013). "Thermal treatment of natural goethite: Thermal transformation and physical properties." *Thermochimica Acta* 568: 115-121.
- Long, F., J.-L. Gong, G.-M. Zeng, L. Chen, X.-Y. Wang, J.-H. Deng, Q.-Y. Niu, H.-Y. Zhang and X.-R. Zhang** (2011). "Removal of phosphate from aqueous solution by magnetic Fe-Zr binary oxide." *Chemical Engineering Journal* 171(2): 448-455.
- MacKenzie, K., M. Bowden and R. Meinhold** (1991). "The structure and thermal transformations of allophanes studied by ^{29}Si and ^{27}Al high resolution solid-state NMR." *Clays and Clay Minerals* 39(4): 337-346.
- MacKenzie, K., I. Brown, R. Meinhold and M. Bowden** (1985). "Outstanding problems in the kaolinite-mullite reaction sequence investigated by ^{29}Si and ^{27}Al solid-state nuclear magnetic resonance: I, metakaolinite." *Journal of the American Ceramic Society* 68(6): 293-297.
- Manzano, H., R. González-Teresa, J. Dolado and A. Ayuela** (2010). "X-ray spectra and theoretical elastic properties of crystalline calcium silicate hydrates: comparison with cement hydrated gels." *Materiales de Construcción* 60(299): 7-19.
- Martin, A., J. Y. Pastor, A. Palomo and A. F. Jiménez** (2015). "Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers)." *Construction and Building Materials* 93: 1188-1196.
- Mulapeer, E. M. S.** (2016). *Strength And Absorption Characteristics Of Fly Ash Based Geopolymer Composite Reinforced With Glass Fiber*, Hasan Kalyoncu Üniversitesi.

- Munthali, M. W., M. A. Elsheikh, E. Johan and N. Matsue** (2014). "Proton adsorption selectivity of zeolites in aqueous media: effect of Si/Al ratio of zeolites." *Molecules* 19(12): 20468-20481.
- Nath, P. and P. K. Sarker** (2014). "Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition." *Construction and Building Materials* 66: 163-171.
- Newsam, J.** (1992). "Solid State Compounds." Clarendon Press, Oxford: 234.
- Pacheco-Torgal, F., J. Castro-Gomes and S. Jalali** (2008). "Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products." *Construction and Building Materials* 22(7): 1305-1314.
- Palomo, A., M. T. Blanco-Varela, M. Granizo, F. Puertas, T. Vazquez and M. Grutzeck** (1999). "Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin." *Cement and Concrete Research* 29(7): 997-1004.
- Palomo, A., M. Grutzeck and M. Blanco** (1999). "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future." *Cement and concrete research* 29(8): 1323-1329.
- Pan, Z., Z. Tao, Y. Cao, R. Wuhler and T. Murphy** (2018). "Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature." *Cement and Concrete Composites* 86: 9-18.
- Park, Y., A. Abolmaali, Y. H. Kim and M. Ghahremannejad** (2016). "Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand." *Construction and Building Materials* 118: 43-51.
- Pilehvar, S., A. M. Szczotok, J. F. Rodríguez, L. Valentini, M. Lanzón, R. Pamies and A.-L. Kjøniksen** (2019). "Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical behavior of geopolymer concrete and Portland cement concrete containing micro-encapsulated phase change materials." *Construction and Building Materials* 200: 94-103.
- Provis, J. L., D. G. Brice, A. Buchwald, P. Duxson, E. Kavalerova, P. V. Krivenko, C. Shi, J. S. van Deventer and J. H. Wiercx** (2014). Demonstration projects and applications in building and civil infrastructure. *Alkali Activated Materials*, Springer: 309-338.
- Provis, J. L. and J. S. J. Van Deventer** (2009). *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*, Elsevier.
- Prud'Homme, E., P. Michaud, E. Joussein, J.-M. Clacens and S. Rossignol** (2011). "Role of alkaline cations and water content on geomaterial foams: monitoring during formation." *Journal of non-crystalline solids* 357(4): 1270-1278.
- Rickard, W. D. and A. Van Riessen** (2014). "Performance of solid and cellular structured fly ash geopolymers exposed to a simulated fire." *Cement and Concrete Composites* 48: 75-82.
- Roy, D. M.** (1999). "Alkali-activated cements opportunities and challenges." *Cement and concrete research* 29(2): 249-254.
- Ruiz-Santaquiteria, C., A. Fernández-Jiménez, J. Skibsted and A. Palomo** (2013). "Clay reactivity: production of alkali activated cements." *Applied clay science* 73: 11-16.
- Ryu, G. S., Y. B. Lee, K. T. Koh and Y. S. Chung** (2013). "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators." *Construction and Building Materials* 47: 409-418.

- Saavedra, W. G. V. and R. M. de Gutiérrez** (2017). "Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure to elevated temperatures." *Construction and Building Materials* 154: 229-235.
- Santhanam, M., M. D. Cohen and J. Olek** (2002). "Mechanism of sulfate attack: A fresh look: Part 1: Summary of experimental results." *Cement and concrete research* 32(6): 915-921.
- Sata, V., A. Sathonsaowaphak and P. Chindaprasirt** (2012). "Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack." *Cement and Concrete Composites* 34(5): 700-708.
- Sawan, S. A., M. Zawrah, R. Khattab and A. A. Abdel-Shafi** (2020). "In-situ formation of geopolymer foams through addition of silica fume: Preparation and sinterability." *Materials Chemistry and Physics* 239: 121998.
- Scrivener, K. and J. F. Young** (1997). *Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems*, CRC Press.
- Sevim, U. K.** (2011). "Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength." *Materials and structures* 44(1): 187-193.
- Shi, C., A. F. Jiménez and A. Palomo** (2011). "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement." *Cement and concrete research* 41(7): 750-763.
- Singh, B., G. Ishwarya, M. Gupta and S. Bhattacharyya** (2015). "Geopolymer concrete: A review of some recent developments." *Construction and building materials* 85: 78-90.
- Singh, N. and B. Middendorf** (2020). "Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview." *Construction and Building Materials* 237: 117455.
- Stevenson, M. and K. Sagoe-Crentsil** (2005). "Relationships between composition, structure and strength of inorganic polymers." *Journal of materials science* 40(8): 2023-2036.
- Tchakouté, H. K., C. H. Rüschler, S. Kong and N. Ranjbar** (2016). "Synthesis of sodium waterglass from white rice husk ash as an activator to produce metakaolin-based geopolymer cements." *Journal of Building Engineering* 6: 252-261.
- Testing, A. S. f. and M. C. C.-o. Cement** (2013). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International.
- Thokchom, S., P. Ghosh and S. Ghosh** (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., O. E. Demirel and T. Uygunoğlu** (2017). "Polipropilen lif katkılı harçların fiziksel ve mekanik özellikleri." *Politeknik Dergisi* 20(1): 91-96.
- Topçu, İ. B. and C. Karakurt** (2008). "Properties of reinforced concrete steel rebars exposed to high temperatures." *Research Letters in Materials Science* 2008.
- Tsai, Y.-L., J. V. Hanna, Y.-L. Lee, M. E. Smith and J. C. Chan** (2010). "Solid-state NMR study of geopolymer prepared by sol-gel chemistry." *Journal of Solid State Chemistry* 183(12): 3017-3022.
- Uysal, M., M. M. Al-mashhadani, Y. Aygörmez and O. Canpolat** (2018). "Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the

- performance of metakaolin-based geopolymer mortars." *Construction and Building Materials* 176: 271-282.
- Uysal, M., K. Yilmaz and M. Ipek** (2012). "The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete." *Construction and Building Materials* 27(1): 263-270.
- Van Jaarsveld, J., J. Van Deventer and L. Lorenzen** (1997). "The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications." *Minerals engineering* 10(7): 659-669.
- Villa, C., E. T. Pecina, R. Torres and L. Gómez** (2010). "Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite." *Construction and Building Materials* 24(11): 2084-2090.
- Wang, K.-t., Y. He, X.-l. Song and X.-m. Cui** (2015). "Effects of the metakaolin-based geopolymer on high-temperature performances of geopolymer/PVC composite materials." *Applied Clay Science* 114: 586-592.
- Wardhono, A., C. Gunasekara, D. W. Law and S. Setunge** (2017). "Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes." *Construction and Building materials* 143: 272-279.
- Xu, H. and J. Van Deventer** (2000). "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals." *International journal of mineral processing* 59(3): 247-266.
- Ye, N., J. Yang, X. Ke, J. Zhu, Y. Li, C. Xiang, H. Wang, L. Li and B. Xiao** (2014). "Synthesis and characterization of geopolymer from Bayer red mud with thermal pretreatment." *Journal of the American Ceramic Society* 97(5): 1652-1660.
- Zhang, H. Y., V. Kodur, B. Wu, L. Cao and F. Wang** (2016). "Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures." *Construction and Building Materials* 109: 17-24.
- Zhang, Y. J., S. Li and Y. C. Wang** (2012). "Microstructural and strength evolutions of geopolymer composite reinforced by resin exposed to elevated temperature." *Journal of Non-Crystalline Solids* 358(3): 620-624.
- Zhao, R., Y. Yuan, Z. Cheng, T. Wen, J. Li, F. Li and Z. J. Ma** (2019). "Freeze-thaw resistance of class F fly ash-based geopolymer concrete." *Construction and Building Materials* 222: 474-483.
- Zhuang, X. Y., L. Chen, S. Komarneni, C. H. Zhou, D. S. Tong, H. M. Yang, W. H. Yu and H. Wang** (2016). "Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications." *Journal of Cleaner Production* 125: 253-267.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Ouiame Chakkor
Doğum Tarihi, Yeri : 1991, Tanger, Fas
E-posta : cha.ouiame@gmail.com



ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2013, Abdul Malek Essadi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği

Yüksek Lisans : 2015, Abdul Malek Essadi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

1. BSTM (BESİX SOMAGEC TANGER MED)0

BESİX: Belçikalı firma, **SOMAGEC**: Faslı firma
Tanger Med Liman İnşaatı – 2013/2014

2. C.A.E.B (CONSEİL, ASSISTANCE, ETUDES EN BATİMENT)

Proje bürosu– 2014/2015

	<i>Yabancı Dil</i>	<i>BilgisayarBilgileri</i>
İngilizce	: Çok iyi	Word-Excel
Fransızca	: Çok iyi	Autocad
Arapca	: Ana dil	Robot
Türkçe	: Çok iyi	Matlab
Ispanyolca	: İyi	

