

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İGNİMBİRİT ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN
ÖZELLİKLERİ, İÇ YAPISI VE YAŞAM DÖNGÜSÜ
DEĞERLENDİRMESİ**

**Hazırlayan
Ahmet Ayberk ŞİMŞEK**

**Danışman
Doç. Dr. Uğur DURAK**

Yüksek Lisans Tezi

**Temmuz 2025
KAYSERİ**

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İGNİMBİRİT ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN
ÖZELLİKLERİ, İÇ YAPISI VE YAŞAM DÖNGÜSÜ
DEĞERLENDİRMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Ahmet Ayberk ŞİMŞEK

Danışman
Doç. Dr. Uğur DURAK

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2024-13517 kodlu proje ile desteklenmiştir.

Temmuz 2025
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Ahmet Ayberk ŞİMŞEK

İmza

“İgnimbirit Esaslı Geopolimer Harçların Özellikleri, İç Yapısı ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Ahmet Ayberk ŞİMŞEK

Danışman

Doç. Dr. Uğur DURAK

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Zülküf KAYA

TEŞEKKÜR

Tez çalışmama maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FYL-2024-13517) teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmam sırasında yanımda bulunan Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğrencilerine teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ, Prof. Dr. Okan KARAHAN, Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR ve Dr. Ezgi ÖRKLEMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Lisans eğitimimin ilk yıllarından bu yana akademik çalışmalarımda her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Uğur DURAK'a şükran ve minnetlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince sabır ve desteklerini bir an olsun esirgemeyen çok değerli aileme şükranlarımı sunarım.

Ahmet Ayberk ŞİMŞEK

Temmuz 2025, KAYSERİ

İGNİMBİRİT ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ, İÇ YAPISI VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

Ahmet Ayberk ŞİMŞEK

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2025
Danışman: Doç. Dr. Uğur DURAK**

ÖZET

Bu çalışmada ignimbirit atıklarıyla üretilen geopolimer harçların mekanik, fiziksel ve iç yapı özellikleri araştırılmış; ayrıca yaşam döngüsü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bağlayıcı olarak atık ignimbirit taşlarının öğütülüp 200 mikron göz açıklığına sahip elekten elenmesiyle elde edilen ignimbirit tozu kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) solüsyonu, agrega olarak ise CEN standart kumu kullanılmıştır. Üretilen numuneler kalıptan çıkabilecek hale gelene kadar etüvde veya oda sıcaklığında havada bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan numuneler 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün boyunca 50, 75 ve 100°C sıcaklıklarda etüvde ısıl küre tabi tutulmuşlardır. Üretilen harç numunelere işlenebilirlik, birim ağırlık, ultrasonik atımlı dalga hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Mekanik deneylerden elde edilen sonuçlara göre en iyi sonuçları veren numuneler üzerinde 300, 600 ve 900°C sıcaklıklarda yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyleri ile iç yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında belirlenen karışımların yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre numunelerin kalıptan çıkarılması için uygulanan iki farklı metodun; numunelerin mekanik ve fiziksel deney sonuçları üzerinde kayda değer farklar oluşturmadığı, ancak aktivatör oranı ile kür sıcaklığı ve süresinin numunelerin dayanımlarını ve dayanım gelişimlerini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesine göre ignimbirit esaslı geopolimer harçların, Portland çimentosu ile üretilen harca göre; enerji tüketimi, karbon ayak izi ve karasal ekotoksosite gibi kategorilerde daha iyi çevresel performans sergiledikleri görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İgnimbirit, Geopolimer, Dayanım, İç Yapı, Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

PROPERTIES, MICROSTRUCTURE AND LIFE CYCLE ASSESSMENT OF IGNIMBRITE-BASED GEOPOLYMER MORTARS

Ahmet Ayberk ŞİMŞEK

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, July 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur DURAK

ABSTRACT

In this study the mechanical, physical and microstructural properties of geopolymer mortars produced using ignimbrite waste materials were investigated. Additionally, life cycle assessment was performed. The binder used in the study was ignimbrite powder, obtained by grinding waste ignimbrite stones and sieving them through a 200-micron mesh. Sodium hydroxide (NaOH) solution was employed as the activator, while CEN standard sand was used as the aggregate. The produced samples were kept in the oven or at room temperature until they could be removed from the mold. After demolding, the samples were subjected to thermal curing in an oven at temperatures of 50°C, 75°C, and 100°C for durations of 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7 days. Mortar samples were tested for workability, unit weight, ultrasonic pulse velocity, flexural strength and compressive strength tests. Based on the results of the mechanical tests, high-temperature resistance tests and microstructural analyses were conducted on the most successful samples at temperatures of 300°C, 600°C, and 900°C. Additionally, a life cycle assessment was conducted for the designed mortar mixtures.

According to the findings, the two different demolding methods applied did not lead to significant differences in the mechanical and physical test results of the samples. However, the activator concentration, curing temperature, and curing duration significantly affected both the strength values and the strength development of the samples. Furthermore, the life cycle assessment results revealed that ignimbrite-based geopolymer mortars exhibited superior environmental performance compared to Portland cement-based mortars in categories such as energy consumption, carbon footprint, and terrestrial ecotoxicity.

Keywords: Ignimbrite, Geopolymer, Strength, Microstructure, Life Cycle Assessment

İÇİNDEKİLER

İGNİMBİRİT ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN ÖZELLİKLERİ, İÇ YAPISI VE YAŞAM DÖNGÜSÜ DEĞERLENDİRMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	iii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1	İgnimbirit.....	4
1.2	Geopolimer Beton	5
1.3	Literatür Özeti	6

2. BÖLÜM

YÖNTEM ve MATERYAL

2.1	Malzemeler	11
2.1.1	İgnimbirit	11
2.1.2	CEN Standart Kumu	13
2.1.3	Aktivatör	14
2.1.4	Su	14

2.2	Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar	14
2.2.1	Laboratuvar Tipi Değirmen Cihazı.....	14
2.2.2	Elek.....	15
2.2.3	Hassas Terazî.....	16
2.2.4	Harç Mikseri.....	16
2.2.5	Çelik Harç Kalıpları.....	17
2.2.6	Sarsma Tablası	17
2.2.7	Laboratuvar Etüvü	18
2.2.8	Ultrases Geçiş Hızı (UPV) Ölçüm Cihazı.....	18
2.2.9	Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyi Cihazı	19
2.2.10	Kül Fırını.....	19
2.3	Karışım fOranları ve Deneylerin Tasarımı	20
2.3.1	Dayanım Deneylerinin Tasarlanması.....	21
2.3.2	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi	21
2.3.3	Numunelerin Üretilmesi ve Kür Edilmesi.....	22
2.4	Deneysel Çalışmalar.....	23
2.4.1	İşlenebilirliğin Tayini.....	23
2.4.2	Birim Ağırlığın Tayini	24
2.4.3	Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini.....	24
2.4.4	Eğilme Dayanımının Tayini.....	26
2.4.5	Basınç Dayanımının Tayini	27
2.4.6	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılığın Tayini	28
2.4.7	FESEM İncelemeleri	28
2.4.8	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi.....	29

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1	İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları	34
3.2	Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları	35
3.3	Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyi Sonuçları	37
3.3.1	<i>Aktivatör Miktarının Ultrasonik Dalga Hızına Etkisi</i>	39
3.3.2	<i>Kalıptan Çıkarma Metodunun Ultrasonik Dalga Hızına Etkisi</i>	39
3.3.3	<i>Kür Sıcaklığı ve Süresinin Ultrasonik Dalga Hızına Etkisi</i>	39
3.4	Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	40
3.4.1	<i>Aktivatör Miktarının Eğilme Dayanımına Etkisi.....</i>	41
3.4.2	<i>Kalıptan Çıkarma Metodunun Eğilme Dayanımına Etkisi</i>	41
3.4.3	<i>Kür Sıcaklığı ve Süresinin Eğilme Dayanımına Etkisi.....</i>	41
3.5	Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları	42
3.5.1	<i>Aktivatör Miktarının Basınç Dayanımına Etkisi</i>	43
3.5.2	<i>Kalıptan Çıkarma Metodunun Basınç Dayanımına Etkisi</i>	43
3.5.3	<i>Kür Sıcaklığı ve Süresinin Basınç Dayanımına Etkisi</i>	44
3.6	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyi Sonuçları.....	44
3.6.1	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinin Ardından Birim Ağırlığın Değerlendirilmesi.....	45
3.6.2	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinin Ardından Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Değerlendirilmesi	46
3.6.3	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinin Ardından Eğilme Dayanımının Değerlendirilmesi.....	47
3.6.4	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinin Ardından Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi.....	49
3.7	İç Yapı Analizleri	50
3.7.1	FESEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi	50
3.7.2	EDX Analizlerinin Değerlendirilmesi.....	52
3.8	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları	56

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1	Sonuçlar	62
4.1.1	İşlenebilirlik Deneyinden Edinilen Sonuçlar	62
4.1.2	Birim Ağırlık Deneyinden Edinilen Sonuçlar.....	62
4.1.3	Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyinden Edinilen Sonuçlar.....	63
4.1.4	Eğilme Dayanımı Deneyinden Edinilen Sonuçlar	63
4.1.5	Basınç Dayanımı Deneyinden Edinilen Sonuçlar	64
4.1.6	Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinden Edinilen Sonuçlar .	64
4.1.7	İç Yapı Analizlerinden Edinilen Sonuçlar	65
4.1.8	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinden Elde Edilen Sonuçlar	65
4.2	Öneriler	66

KISALTMALAR

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>
CEN	Avrupa Standardizasyon Komitesi
EN	Avrupa Normu
FESEM	Alan Taramalı Elektron Mikroskobu
g/cm ³	Gram/Santimetreküp
MPa	Megapaskal
N/mm ²	Newton/Milimetrekare
Na ⁺	Sodyum
NaOH	Sodyum Hidroksit
TS	Türk Standartları
XRD	X Işını Kırınım Yöntemi
YDD	Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi
AD	Abiyotik Kaynakların Tükenmesi
AD-FF	Abiyotik Kaynakların Tükenmesi (Fosil Yakıtlar)
GWP	Küresel Isınma Potansiyeli
ODP	Ozon Tabakasının İncelmesi
HT	İnsan Toksisitesi
FAE	Tatlı Su Canlıları İçin Ekotoksisite
MAE	Deniz Suyu Canlıları İçin Ekotoksisite
TE	Karasal Ekotoksisite
PO	Fotokimyasal Oksidasyon
AP	Asitleşme Potansiyeli
EP	Ötrofikasyon

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 İgnimbiritin kimyasal analizi	12
Tablo 2.2 Karışım çizelgesi.....	21
Tablo 2.3 Taşıma mesafeleri	32
Tablo 2.4 Enerji tüketimleri	32
Tablo 3.1 İşlenebilirlik deneyi sonuçları.....	34
Tablo 3.2 Birim ağırlık deneyi sonuçları (g/cm ³)	36
Tablo 3.3 Ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi sonuçları (m/s).....	37
Tablo 3.4 Ultrasonik atımlı dalga hızı değerlerine göre beton kalitesinin değerlendirilmesi	38
Tablo 3.5 Eğilme dayanımı deneyi sonuçları.....	40
Tablo 3.6 Basınç dayanımı deneyi sonuçları	42
Tablo 3.7 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin birim ağırlık deneyi sonuçları	45
Tablo 3.8 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi sonuçları	46
Tablo 3.9 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımı deneyi sonuçları	48
Tablo 3.10 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları	49
Tablo 3.11 %8 oranında Na ⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 gün 75°C’de kür edilen numunenin EDX analizi	53
Tablo 3.12 %8 oranında Na ⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün 75°C’de kür edilen numunenin EDX analizi	54
Tablo 3.13 %8 oranında Na ⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 gün 75°C’de kür edilen numunenin EDX analizi	56
Tablo 3.14 PÇ ve ignimbirit bazlı geopolimer harçların YDD sonuçları	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 İgnimbiritin ham ve öğütülmüş görünümü	11
Şekil 2.2 İgnimbiritin SEM görünümü ve XRD analizi.....	12
Şekil 2.3 CEN standart kumu görünümü	13
Şekil 2.4 Sodyum hidroksit görünümü	14
Şekil 2.5 Laboratuvar tipi değirmen görünümü	15
Şekil 2.6 Elek görünümü.....	15
Şekil 2.7 Hassas terazi görünümü	16
Şekil 2.8 Harç mikseri görünümü	16
Şekil 2.9 Çelik harç kalıbı görünümü	17
Şekil 2.10 Sarsma tablası görünümü.....	17
Şekil 2.11 Etüv görünümü	18
Şekil 2.12 UPV ölçüm cihazı görünümü	18
Şekil 2.13 Pres cihazı görünümü.....	19
Şekil 2.14 Kül fırını görünümü	19
Şekil 2.15 İşlenebilirlik deneyinin görünümü.....	23
Şekil 2.16 Birim ağırlık tayini deneyi görünümü	24
Şekil 2.17 UPV deneyinin görünümü	25
Şekil 2.18 Eğilme deneyinin görünümü.....	26
Şekil 2.19 Basınç deneyinin görünümü	27
Şekil 2.20 Yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyinin görünümü.....	28
Şekil 2.21 FESEM incelemesi için hazırlanan numuneler.....	29
Şekil 2.22 YDD sürecinin adımları	30
Şekil 2.23 Çimentolu ve geopolimer harç numunelerinin sistem sınırları.....	31
Şekil 3.1 İşlenebilirlik deneyi sonuçları.....	35
Şekil 3.2 Birim ağırlık deneyi sonuçları	36
Şekil 3.3 Ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi sonuçları	38
Şekil 3.4 Eğilme dayanımı deneyi sonuçları.....	40
Şekil 3.5 Basınç dayanımı deneyi sonuçları	43
Şekil 3.6 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası görüntüleri	45

Şekil 3.7 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin birim ağırlık deneyi sonuçları	46
Şekil 3.8 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi sonuçları	47
Şekil 3.9 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımı deneyi sonuçları	48
Şekil 3.10 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları	49
Şekil 3.11 %8 oranında Na ⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 75°C’de kür edilen numuneler, (a) 1 gün ısıt kür, (b) 4 gün ısıt kür, (c) 7 gün ısıt kür ..	51
Şekil 3.12 %8 oranında Na ⁺ içeren ve etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün kür edilen numuneler, (a) 50°C ısıt kür, (b) 75°C ısıt kür, (c) 100°C ısıt kür.....	51
Şekil 3.13 %8 oranında Na ⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 gün 75°C’de kür edilen numunenin FESEM görüntüsü	53
Şekil 3.14 %8 oranında Na ⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün 75°C’de kür edilen numunenin FESEM görüntüsü	54
Şekil 3.15 %8 oranında Na ⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 gün 75°C’de kür edilen numunenin FESEM görüntüsü	55
Şekil 3.16 Portland çimentolu ve ignimbirit bazlı geopolimer harçların YDD sonuçlarının karşılaştırılması	58
Şekil 3.17 PÇ harç numunesinin çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı	59
Şekil 3.18 8Na-75H-4 harç numunesinin çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı	60
Şekil 3.19 8Na-75E-4 harç numunesinin çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı	61

GİRİŞ

Dünyada en fazla kullanılan yapı malzemelerinin başında beton gelmektedir. Beton üretimi konusunda Türkiye dünyada önemli bir konumdayken Avrupa’da bu sıralamada lider konumdadır. Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) verilerine göre 2020 yılında Avrupa’da 252,7 milyon metreküp beton üretilirken Türkiye’de 95 milyon metreküp beton üretimi gerçekleşmiştir. Bu verilere göre Avrupa’daki beton üretiminde yaklaşık %37,5’lik pay ile zirvede bulunan Türkiye’yi 55,3 milyon metreküplük üretim hacmi ile Almanya ve 37 milyon metreküplük üretim ile Fransa takip etmektedir. Ayrıca aynı kaynaktan elde edilen verilere göre Türkiye C25/30 ve C30/37 dayanım sınıflarında beton üretiminde %71 ile yine Avrupa Birliği ortalamasının üzerindedir. Bu beton sınıflarında Avrupa Birliği ortalaması %60,2 ile sınırlı kalmıştır. Yine C35/45 ve üstü dayanım sınıflarının Türkiye’nin üretimi içindeki %21’lik payı, %12,8 olan Avrupa Birliği ortalamasının üzerindedir [1].

Geleneksel beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun üretimi esnasında önemli miktarda enerji tüketilmektedir. Endüstriyel enerji tüketiminin yaklaşık %12 ila %15’ini çimento üretimi oluşturmaktadır. Ayrıca dünyadaki CO₂ salınımının %7’sini yine çimento üretimi oluşturmaktadır [2].

Çimento, üretiminde ihtiyaç duyduğu ciddi miktarda enerji sarfıyatı ve gerçekleştirdiği yüksek oranda CO₂ salınımıyla çevreye zarar vermektedir. Bu başlıca sebepler, bilim dünyasını beton üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan çimento tüketimini azaltacak alternatif bağlayıcılar ve çimentolu sistemleri geliştirecek puzolanlar araştırmaya yönlendirmektedir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalarda çimentolu geleneksel betonlara alternatif olarak geopolimer öne çıkmaktadır. Geopolimer betonların üretiminde kullanılan puzolanların tek başlarına bağlayıcılığı olmayıp uygun alkalilerle aktive edildiğinde bağlayıcılık özelliği kazandıkları görülmüştür [3]. Puzolanlar uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünler olabileceği gibi jeolojik

orijinallikteki volkanik tüfler, camlar ya da ısıtılmış killi, şeyiller ve diatomitler olabilir.

Jeolojik orijinallikteki volkanik tüflerden biri de ignimbirittir. İgnimbirit kelimesi latince kökenli olup ignis (ateş) ve imbris (yağmur) kelimelerinin birleşiminden meydana gelmektedir. İgnimbirit; pomza parçaları, volkanik cam kırıkları ve kristallerden oluşan bir kül matrisi olup piroklastik kayaların en yaygın türüdür [4].

Önceki dönemlerde tarihi yapılar ve özellikle düşük katlı binalarda yapı taşı olarak kullanımı öne çıkan ignimbiritlerin günümüzde daha çok dekoratif özellikleri anılmakta olup binaların dış yüzey kaplamalarında, merdivenlerde, yer döşemelerinde, korkuluklarda, kemerlerde, sütunlarda, şöminelerde, balkon süslemelerinde ve restorasyon uygulamalarında kullanılmaktadır [5].

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye’de Holosen’de etkin olmuş 13 adet volkan bulunmaktadır. Kayseri, Gaziantep ve Diyarbakır volkanik alanlara 100 km’den yakın olan şehirlerden bazılarıdır. Piroklastik akışların şehirlere yakın gerçekleşmesi, volkanik ürünlerin çıkarıldığı taş ocaklarının yerleşim yerlerine yakın olması sonucunu doğurmaktadır [6].

Diğer volkanik kökenli kayalar ve mermer ocaklarında olduğu gibi ignimbirit ocaklarında da atıkların istiflenmesi başlıca ve önemli sorunlarından. Yerleşim yerlerine yakın mesafedeki taş ocaklarında eğimli araziye yığılan atık materyaller yamaçtan aşağı kayarak değerli arazileri veya dere yataklarını tahrip edebilmektedir. Atık olarak yığılan materyaller kayarak etrafına zarar vermese bile yağış suları ile atıkların toz ve kil bölümü akarsulara, göllere ve denizlere akmaktadır. Toz ve kil su içerisinde kısa sürede çökmediği için suda yaşayan canlıların toplu tahribatına sebep olabilmektedir [7].

Bu nedenle bu tez çalışmasında; ignimbiritin alternatif bir bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilirliği geopolimer harç tasarımı ile araştırılmıştır. Çalışmada ignimbirit NaOH ile aktive edilmiş ve farklı kür sürelerinde, farklı sıcaklıklarda ısıtılmış tutulmuştur. Çalışma kapsamında üretilen geopolimer harç numunelerin mekanik, fiziksel ve iç yapı özellikleri ile çevresel etkileri araştırılmıştır.

Kayseri ili Gesi bölgesinde bulunan bir ignimbirit ocağından temin edilen atık ignimbirit taşlarının öğütölüp 200 mikron göz açıklıklı elekten elenmesiyle elde edilen ignimbirit tozu bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Agrega olarak CEN standart kumu kullanılmıştır. Malzemelerin karışımı için kullanılacak su ve aktivatör olarak kullanılacak NaOH, numuneler üretilmeden 1 gün önce %4 ve %8 oranlarında Na⁺ içerecek şekilde üretilmiş olup elde edilen solüsyon oda sıcaklığına geldiğinde kullanılmıştır.



1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1 İgnimbirit

İgnimbiritler doğada özellikle volkanik geçmişi bulunan bölgelerde konumlanan volkanik kayalardır. Latince kökenli bir kelime olup ateş anlamına gelen ignis ve yağmur anlamına gelen imbri kelimelerinin birleşiminden meydana gelmektedir. Genellikle açık renkte olup jeolojik geçmiş süresince diğerlerine nazaran yaşlı ignimbiritler gri, kırmızı kahverengi ve bazen de yeşil renk gösterebilirler [8].

İgnimbiritler genellikle riolitlerin kimyasal kompozisyonuna benzer bir içeriğe sahiptirler. Dasitik, fonolitik ve trakitik bileşim de sergileyebilirler. Piroklastik akıntı çökeltilerinin belirgin özellikleri; herhangi bir şekilde tabakalanma davranışı sergilememeleri, çoğunlukla kötü boylanmaları, çokça piroklastik camsı malzeme içermesi, yassılaştıran süngertaşı parçalarının birbirlerinin paralel bir yönelme sergileyecek biçimde bulunmaları, toz ebatlarındaki taneciklerin birbiriyle kaynaşmaları ve volkanik kayaların gevrek ile çok sert arasında değişebilen dokusal özellik göstermeleridir [9].

İgnimbiritler, bileşenlerin birbirleriyle kaynaşma derecelerine göre kaynaşmış veya kaynaşmamış şeklinde de adlandırılmaktadır. Herhangi bir ignimbirit profilinin bileşenleri orta katmanlarında alt ve üst kısımlara nispeten daha yoğun biçimde kaynaşmışlardır. Kaynaşma olayının yaklaşık 500°C üzeri sıcaklıklarda geliştiği, bazı ignimbirit türlerinin çökme bölgelerinde 700-800°C arasında bir sıcaklığın aktif olduğu da dile getirilmektedir [8].

Ülkemizde holosen dönemde etkin olmuş volkanik geçmişe sahip bölgelerden olan Kapadokya bölgesinde birden fazla ignimbirit çökeltisinin üst üste konumlandığı da gözlemlenebilmektedir. Bu yapıların petrolojik incelemelerinde değişik sayılarda piroklastik akıntı birimi ve kütlelerin soğuma şekline bağlı olarak meydana gelen piroklastik soğuma birimi gibi birimler ayrılır. Kısa bir zaman aralığı içinde birbiri üzerine yığılan farklı piroklastik akıntı birimlerinin detaylı incelemelerle tek bir piroklastik soğuma birimi altında toplanması mümkün olabilir [9].

Kaynaşmış ignimbiritler diğer volkanik kayalarla benzer şekilde soğuma yüzeyine dik olacak şekilde çatlaklar içerir. Bu çatlaklara bağlı olarak sütun şeklinde bölünme ve parçalanmalar gösterebilirler. Bileşenleri yeterince bağlantılı olmayan kaynaşmamış ignimbiritlerde ise özellikle bitki örtüsünün olmadığı durumlarda erozyon sebebiyle Kapadokya bölgesinde peri bacaları olarak bilinen dik kenarlı konimsi yüzey şekilleri meydana gelir [8].

İgnimbiritler, günümüzde estetik görünümü ve avantajlı yalıtım özelliklerine sahip olması nedeniyle binaların dış cephe kaplamalarında ve çeşitli mimari yapı elemanlarında kullanılmaktadır[5].

1.2 Geopolimer Beton

Beton, inşaat sektörünün en fazla tüketilen malzemelerindendir. Gün geçtikçe artan beton talebine paralel şekilde betonda bağlayıcı olarak kullanılan çimentoya da rağbet önemli ölçüde artmaktadır. Çimento, üretimi esnasında karakteristik özelliklerini kazanması için gerekli olan kimyasal reaksiyonları başlatacak enerji gereksinimi ve gerçekleştirdiği yüksek miktardaki karbondioksit salınımı ile bilinmektedir [10].

Günümüzde inşaat sektörünün adeta yapı taşı olan geleneksel betona alternatif olarak araştırılan ürünlerden bir tanesi de geopolimerlerdir. Geopolimerler; uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı vb. gibi silis içeriği yüksek, tek başlarına bağlayıcılık özelliği bulunmayan ve puzolanik karakter gösteren malzemelerin NaOH ve Na₂SiO₃ gibi çeşitli alkali aktivatörlerle aktive edilerek bağlayıcılık özelliği kazandırılmış malzemelerdir [11].

Geopolimerlerin üretiminde kullanılan puzolanik karakterdeki malzemelerin atık ürünler olması, atıkların tüketimine olanak sağlamasıyla ayrıca önem arz etmektedir [12].

Geopolimer harç veya betonlar, bağlayıcı olarak kullanılan ve içeriğinde yüksek oranda alümino-silikat bulunan malzemelerin alkali aktivatörlerle tepkimesi sonucu elde edilir. Bu malzemelere örnek olabilecek yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıklar veya yan ürünler az maliyetle ve kolay biçimde elde edilmelerinin yanı sıra yüksek orandaki alümino-silikat içeriği sayesinde geopolimer harç ve betonlarda kullanılabilir [13].

1.3 Literatür Özeti

Sınıksaran'ın 2012 yılında yapmış olduğu laboratuvar çalışmasında volkanik tüf tozları endüstriye yeniden kazandırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada matriks materyal olarak polyester, takviye materyali olarak ise taş ocağı atıkları ve mermer tozları kullanılmıştır. Sınıksaran laboratuvar çalışmasında polimer sertleştirici malzeme olarak metil etil keton peroksit ve reaksiyon hızlandırıcı malzeme olarak kobalt oktoat kullanmıştır. Üretilen malzemeler açık havada kuruduktan sonra volkanik tüf tozu/mermer tozu oranları değişken olarak incelenmiş ve üretilen yeni malzemenin inşaat sektöründe kullanılabileceğini ifade etmiştir [14].

Taş ocakları atıklarının fiziksel veya kimyasal özelliklerinin değişiklik göstermesi, dış görünüşünü içerisindeki maden ve oksitlerden alması, katı ve sert olması, bölgelere özgü nitelikler kazandırmaktadır. Özellikle taş ve maden ocaklarının işletilmesi sırasında ortaya çıkan atık toz ve malzeme sorununun göz önünde tutulmasından ziyade, mevcut atıkların nasıl değerlendirilebileceğine de dair literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bir tanesi de yapı teknolojisinde oldukça yaygın biçimde kullanılan tuğla imalatında, atığın kil ile karıştırılması suretiyle kullanılabilirliği yönündedir. Taş ve maden ocağı atıklarının tuğla imalatında kullanılarak değerlendirilmesi ile tuğlanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin nasıl etkilendiği birçok çalışmayla ortaya koyulmuştur. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde yapılan çalışmada Avanos bölgesinde üretilen tuğlanın ham maddesi olan kile ağırlıkça %30 olacak şekilde taş ocağı atıkları ilave edilerek çalışmalar yapılmıştır. Nevşehir Avanos bölgesi killerin sinterlenme sıcaklığı yaklaşık olarak 900°C'dir. Bölgenin taş ocağı atıklarının sinterlenme sıcaklıkları ise yaklaşık olarak 1100°C civarındadır. Tuğla imalatında kullanılması halinde atık malzemeler fiziko-kimyasal değişim yaşamakta ve içsel özelliklerini korumaktadır. Bu sebeple ürünün mekanik ve

fiziksel özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Ancak sisteme ağırlıkça %3 oranında ilave edilerek kullanılması halinde olumlu neticeler alınabilmektedir. Bu durumda da mali kaygılar etkili olduğundan bu atıkların tuğla imalatında kullanımına endişe ile yaklaşıldığı kanısına varılmıştır [9].

Şahin yapmış olduğu çalışmada taş ocağı atıklarına çözüm üretmek ve endüstriye kazandırmak için taş ocağı atıklarını öğütürerek %5, %7, %10, %15 ve %20 oranlarında alçı ile karıştırarak hamur numuneler üretmiş, ürettiği numunelerin kalıptan çıkarılması için doğal ve suni kurutma olmak üzere 2 metot izlemiştir. Kalıptan çıkarılan numuneleri 900-950-1000-1025-1050-1075-1100-1125-1150 ve 1200°C sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulama suretiyle pişirmiş ve numunelerin fiziksel ve mekanik dayanımlarını belirlemiştir. Gerçekleştirilen tek eksenli basınç deneylerinde 7,50 ile 36,62 MPa aralığında sonuçlar elde edilmiştir. Ekonomik, mekanik ve fiziksel özelliklerine göre değerlendirilmesinin ardından optimum karışımın %15 alçı katkısı yapılan ve 1100°C'de pişirilen numune olduğu sonucuna varılmıştır [9].

Uzun yapmış olduğu deneysel çalışmada volkanik tüf, doğal zeolit ve ignimbirit türünden doğal puzolanların Portland çimentosu ile üretilen harçların basınç dayanımlarını nasıl etkilediğini belirlemeye çalışmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında toplanan 5 adet zeolit türü, 6 adet pomza türü ve 12 adet volkanik tüf türü örneklerden en yüksek SiO₂ içeriğine sahip olan örneğin çalışmada V9 koduyla belirtilen ignimbirite ait olduğu belirlenmiştir. V9 kodlu örneğe gerçekleştirilen XRD analizinde örneğin tamamen kristal alümino-silikat fazlardan oluşup amorf faz içermediği saptanmıştır. Gerçekleştirilen XRD analizleri ve petrografik araştırmaların ardından amorf yapıya sahip olan örnekler üzerinden harç denemeleri yapılacağı ifade edilmiştir. Bu kapsamda V7 kodlu Kapıkaya ignimbiriti ile harç numuneleri üretilmiş ve bu numunenin 28 günlük basınç dayanımı aktivite indeksi %84,36 olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu numune kapiler su emme deneyinde kontrol numunesinden daha az su emmiştir [15].

Bilgil ve Özdel yapmış oldukları deneysel çalışmada blok bims üretiminde ince malzeme olarak kullanılan ignimbirit ürününün mekanik ve fiziksel özelliklere etkisini araştırmak için %100 pomza dolgulu blok bims ve ignimbirit katkılı blok bims numuneler üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre ignimbirit katkılı olarak üretilen numuneler, %100 pomza kullanılarak üretilen numunelerden daha fazla tek eksenli basma dayanımı göstermiştir.

Aynı şekilde ignimbirit katkılı numunelerin birim ağırlıkları, %100 pomza içeren numunelere nazaran %26 daha fazladır. Ayrıca kullanılan çimento tipinin mekanik ve fiziksel özelliklere etkisini araştırmak için CEM I ve CEM II çimento kullanmışlardır. CEM I çimentosuyla üretilen numuneler, CEM II çimentosuyla üretilenlere göre yaklaşık %15 daha fazla tek eksenli basma dayanımı göstermiştir [16].

Gökçe ve Şimşek yapmış oldukları deneysel çalışmada ignimbirit, perlit, pomza ve zeolit tozu katkılarının alkali silis reaksiyonu ile oluşan harç genleşmesine etkisini incelemişlerdir. Harç çubuklarının üretiminde yukarıda belirtilen tozlar, bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosu ile %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 ve %40 oranlarında ikame edilerek kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlara göre çimentoya %30 oranında ikame edilen ignimbiritin alkali silika reaksiyona bağlı olarak gelişen harç genleşmesini kontrol altına alabildiği belirlenmiştir [17].

Erdal ve Şimşek yapmış oldukları laboratuvar çalışmasında Ahlat taşı olarak da bilinen ignimbiritin ocaklardan çıkarılması ve uygun boyutlara getirilmesi esnasında ortaya çıkan atıklardan elde edilen tozların çimentolu harç üretiminde kullanımını araştırmışlardır. Bu kapsamda harç numunelerin üretiminde ignimbirit unu ile karşılaştırma yapmak amacıyla andezit ve kalker ununu çimentoya %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ikame etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ignimbirit tozu ile andezit ve kalker tozunun ikamesi arasında kayda değer bir fark ortaya çıkmamıştır. %5 taş unu ikamesinin kontrol numuneleriyle benzer eğilme ve basınç dayanımı sonuçları sergilediği buna istinaden atıkların değerlendirilmesinin çevreye verilen zararı önlemede fayda sağlayacağı ifade edilmiştir. Ayrıca %25 taş unu ikamesiyle eğilme dayanımının %37 ve basınç dayanımının %30 kayba uğradığı saptanmıştır [18].

Aydın ve arkadaşları yapmış oldukları laboratuvar çalışmasında beton üretiminde agrega olarak kullanılan doğal kırmataş yerine ignimbirit ve pomza taşlarını %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame ederek numuneler üretmiş ve bu numunelerin 7, 14 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarını belirlemişlerdir. Dünyanın dört bir yanındaki aktif fay zonlarında bulunmasını avantaj olarak değerlendirdikleri ignimbirit taşının doğal kırmataş yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame edilmesiyle üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımı deneyi sonucunda sırasıyla %7, %10, %13 ve %19 basınç dayanımı kaybı yaşanırken pomza taşının aynı oranlarda ikamesi ve aynı kür

süresi sonundaki basınç dayanımı deneyi sonucunda %26, %44, %53 ve %60 dayanım kaybı yaşanmıştır. Ayrıca çalışmada ignimbirit kullanılarak üretilen betonun hafif beton, tuğla veya panel gibi bir inşaat malzemesi olarak kullanımının ve ucuz olmasının yanı sıra hafif yapılar üretilmesinin yüksek dayanımı nedeniyle pomzaya kıyasla daha avantajlı olduğu, ignimbiritli betonların binayı daha hafif hale getireceği ve bunun sonucunda daha az deprem yükü alacağı; davranışının ise gazbetondan, perlitli betondan veya pomzalı betondan daha iyi olacağı ifade edilmiştir [19].

Mayta-Ponce ve arkadaşları yapmış oldukları laboratuvar çalışmasında ignimbirit, kalsine edilmiş kil ve inşaat yıkıntı atıkları gibi malzemeleri bağlayıcı olarak kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Çalışmada Peru'nun Arequipa şehrinden temin edilen ham maddelerin öğütülerek 106 mikron göz açıklığına sahip elekten elendiği, 12 molarlık sodyum hidroksit çözeltisi ve ticari ince kum ile karıştırılmasının ardından elde edilen harç numunelerin 2 gün yalıtımlı bir şekilde, 28 gün ise oda sıcaklığında kurumaya bırakıldığı ifade edilmiştir. Bünyesindeki suyu salarak tamamen kuru hale gelen numuneler 200°C'den 500°C'ye kadar ısıtılma maruz bırakılmıştır. Isıl kür süreçleri tamamlanan tüm numunelere basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler ignimbirit ile üretilip oda sıcaklığında kurutulduktan sonra 36 MPa basınç dayanımı gösteren numunenin 200°C'lik ısıtılma neticesinde 53 MPa'a kadar ulaştığını sıcaklık artışının devam etmesiyle basınç dayanımının kademeli bir şekilde düşüş yaşayarak 500°C'lik ısıtılma sonucunda 14 MPa'a kadar gerilediğini göstermektedir. Ayrıca çalışmada sıcaklık artışının etkisi sonucunda basınç dayanımının düşmesiyle malzemenin daha sünek bir davranış sergilediğinden de bahsedilmiştir [20].

2. BÖLÜM

YÖNTEM ve MATERYAL

Bu deneysel çalışmada Kayseri ili Melikgazi ilçesi Gesi bölgesinde bir taş ocağından çıkarılan ignimbirit isimli volkanik kökenli taş öğütölüp 200 mikron göz açıklığına sahip elekten elenmiştir. Elek altında kalan ignimbirit ile geopolimer harç numuneler üretilmiş, üretilen harç numunelerin mekanik, fiziksel ve iç yapı özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca üretilen harç numunelerin yaşam döngüsü analizleri gerçekleştirilmiştir. Geopolimer harç numunelerin üretiminde aktivatör olarak NaOH solüsyonu, agrega olarak ise Limak Çimento San. ve Tic. A.Ş. firmasının 1350±5 gramlık hazır paketler halinde kullanıma sunduğu CEN standart kumu kullanılmıştır.

İgnimbirit taşlarının Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çimento Laboratuvarında bulunan laboratuvar tipi değirmende çelik bilyeler yardımıyla öğütölüp 200 mikron göz açıklığına sahip elekten elenmesiyle elde edilen malzeme, çalışmada bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Aktivatör miktarı bağlayıcı olarak kullanılan ignimbirite ağırlıkça oranlanarak belirlenmiştir. Bu kapsamda üretilen harç numuneler %4 ve %8 oranlarında Na⁺ içerecek şekilde NaOH kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harçların su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak seçilmiş, karışım suyu katı NaOH ile karıştırılarak elde edilen solüsyon sisteme dahil edilmiştir. Üretilen taze harç numuneleri yayılma tablasında işlenebilirlik deneyine tabi tutulmuştur. İşlenebilirlik deneyinin ardından kalıplara yerleştirilen numuneler kalıptan çıkabilecek seviyeye gelene kadar etüvde veya havada bekletilmiştir. %4 oranında Na⁺ içeren numuneler yalnızca etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılırken, %8 oranında Na⁺ içeren numune grupları ise etüvde veya havada bekletilerek kalıptan çıkarılması sağlanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler 50, 75 ve 100°C sıcaklığındaki etüvde 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün boyunca ısı küre tabi tutulmuşlardır. Kür süreleri tamamlanan tüm numunelere sırasıyla birim ağırlık deneyi, ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi, eğilme dayanımı deneyi ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır.

Mekanik deneylerden elde edilen sonuçlar ışığında en iyi sonuçları veren seri üzerinde yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde iç yapı analizleri ve ignimbirit temelli geopolimer harç sistemi için yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılarak çevresel etkileri değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan malzemeler, gerçekleştirilen ön çalışmalar, karışım hesap tablosu, geopolimer harçların üretimi ve deney prosesi hakkında detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

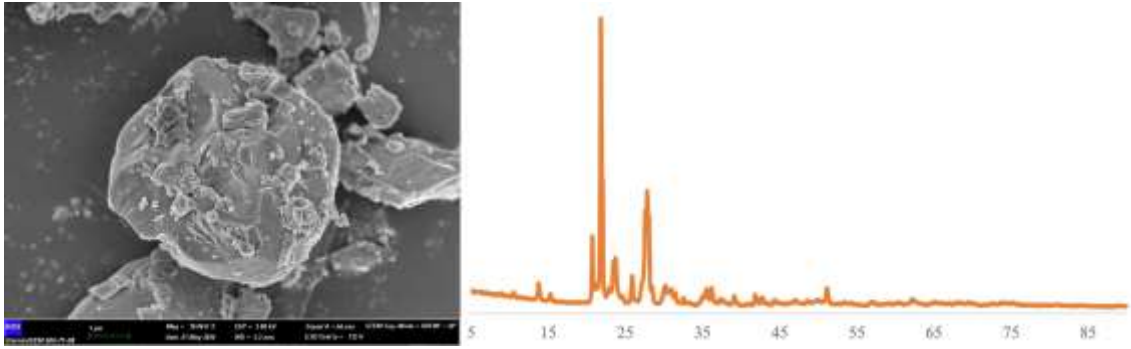
2.1 Malzemeler

2.1.1 İgnimbirit

Çalışmada üretilen geopolimer harç numunelerde Kayseri ili Melikgazi ilçesi Gesi bölgesinde bir taş ocağından çıkarılan ignimbirit isimli volkanik kökenli taşın Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çimento Laboratuvarında bulunan laboratuvar tipi değirmende çelik bilyeler yardımıyla öğütülerek 200 mikron göz açıklığına sahip elekten elenmesiyle elek altında kalan ignimbirit bağlayıcı olarak kullanılmıştır. İgnimbirit taşının görünümü Şekil 2.1’de, SEM görünümü ve XRD analizi Şekil 2.2’de ve kimyasal analizi Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 İgnimbiritin ham ve öğütülmüş görünümü



Şekil 2.2 İgnimbiritin SEM görünümü ve XRD analizi

Tablo 2.1 İgnimbiritin kimyasal analizi

Kimyasal Özellik	İgnimbirit
SiO ₂ (%)	69,393
Al ₂ O ₃ (%)	15,446
Na ₂ O (%)	5,511
K ₂ O (%)	3,923
Fe ₂ O ₃ (%)	1,993
CaO (%)	1,078
TiO ₂ (%)	0,358
CuO (%)	0,317
MgO (%)	0,250
BaO (%)	0,066
Mn ₃ O ₄ (%)	0,061
P ₂ O ₅ (%)	0,060
SO ₃ (%)	0,048
ZrO ₂ (%)	0,045
SrO (%)	0,014
PbO (%)	0,010
ZnO (%)	0,010
Cr ₂ O ₃ (%)	0,009
NiO (%)	0,001
HfO ₂ (%)	0,000
V ₂ O ₅ (%)	0,000

2.1.1.1 Dayanım Aktivite İndeksi

Çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan ignimbiritin dayanım aktivitesi de belirlenmiştir. CEM I 42,5 R çimentosu ile üretilen şahit numune ve CEM I 42,5 R çimentoya %25 oranında ikame edilen ignimbirit ile hazırlanan harç numuneleri 7 ve 28 günlük kür süreleri sonucunda basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Şahit numunenin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla 37,64 MPa ve 43,57 MPa olurken ignimbiritin çimentoya %25 oranında ikame edildiği numuneler 7 ve 28 gün sonunda sırasıyla 31,76 MPa ve 41,18 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Buna göre ignimbiritin 7 ve 28 günlük dayanım aktivite indeksleri sırasıyla %84,37 ve %94,52 olarak belirlenmiştir.

2.1.1.2 Özgül Ağırlık

İgnimbirit ile üretilen geopolimer harçların çevresel etkilerinin değerlendirilmesi kapsamında gerçekleştirilen yaşam döngüsü değerlendirmesinde 1 m³ geopolimer harç üretimi için gerekli bağlayıcı miktarını tespit etmek üzere ignimbiritin özgül ağırlığı deneysel çalışma ile belirlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda ignimbiritin özgül ağırlığı 2,52 g/cm³ olarak belirlenmiştir.

2.1.2 CEN Standart Kumu

Deneysel çalışmalarda agrega olarak Şekil 2.3'te görülen, Limak Çimento San. ve Tic. A.Ş. firmasının 1350±5 gramlık hazır paketler halinde kullanıma sunduğu CEN standart kumu kullanılmıştır.



Şekil 2.3 CEN standart kumu görünümü

2.1.3 Aktivatör

Deneyisel çalışmalarda aktivatör olarak diğer alkalilere kıyasla daha ekonomik ve temin süreci daha kolay olan sodyum hidroksit kullanılmıştır. Farklı türlerde olabilen sodyum hidroksitin katı, beyaz renkli ve şekil olarak pul formunda olan türü kullanılmıştır. Sodyum hidroksit sisteme karışım suyu ile karıştırılarak solüsyon şeklinde dahil edilmiştir. Su ile reaksiyonu ekzotermik olup solüsyon hazırlandıktan 1 gün sonra kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin fiziksel görünümü Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Sodyum hidroksit görünümü

2.1.4 Su

Deneyisel çalışmalarda içilebilir şebeke suyu kullanılmıştır. Su, beton karma suyunun uygunluğunun tayin edildiği TS EN 1008 [21] standardına uygun olup aktivatörle karıştırıldıktan 1 gün sonra, solüsyon sıcaklığı oda şartlarına geldiğinde kullanılmıştır.

2.2 Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar

2.2.1 Laboratuvar Tipi Değirmen Cihazı

Taş ocağından temin edilen büyük parçalardaki atık ignimbiriti öğütmek için Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çimento Laboratuvarında bulunan laboratuvar tipi değirmen kullanılmıştır. Laboratuvar tipi değirmenin görüntüsü Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 Laboratuvar tipi değirmen görünümü

2.2.2 Elek

Deneyisel çalışmalarda bağlayıcı olarak kullanılan ignimbirit, ignimbirit taşlarının laboratuvar tipi değirmende öğütülmesiyle elde edilen malzemenin 200 mikron göz açıklığına sahip elekten elenmesiyle elde edilmiştir. Kullanılan eleğin görünümü Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Elek görünümü

2.2.3 Hassas Terazi

Deneyisel çalışmalarda Şekil 2.7’de görülen 0.1 g hassasiyete sahip terazi kullanılmıştır.



Şekil 2.7 Hassas terazi görünümü

2.2.4 Harç Mikseri

Geopolimer harçların üretiminde Şekil 2.8’de görülen Utest markalı harç mikseri kullanılmıştır.



Şekil 2.8 Harç mikseri görünümü

2.2.5 Çelik Harç Kalıpları

Üretilen numunelerin sertleşene kadar formunu korumasını sağlamak için Şekil 2.9’da görülen 4x4x16 cm ayrıtlı prizmatik kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 2.9 Çelik harç kalıbı görünümü

2.2.6 Sarsma Tablası

Üretilen taze harç numunelerin kalıplara yerleştirilmesi esnasında gerekli vibrasyonu sağlamak için Şekil 2.10’da görülen sarsma tablası kullanılmıştır.



Şekil 2.10 Sarsma tablası görünümü

2.2.7 Laboratuvar Etüvü

Kalıplara yerleştirilen numunelerin kalıptan çıkabilecek sertliğe ulaşması için uygulanan 75°C'lik sıcaklık ile kürleme işlemi için gerekli olan 50, 75 ve 100°C'lik sıcaklıklar Şekil 2.11'de görülen laboratuvar etüvüyle sağlanmıştır.



Şekil 2.11 Etüv görünümü

2.2.8 Ultrases Geçiş Hızı (UPV) Ölçüm Cihazı

Kür süreçleri tamamlanan geopolimer harç numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızlarının tayin edilmesi için kullanılan cihaz Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 UPV ölçüm cihazı görünümü

2.2.9 Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyi Cihazı

Kür süreçleri tamamlanan geopolimer harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının belirlenmesi için kullanılan pres cihazı ile eğilme ve basınç modülleri Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Pres cihazı görünümü

2.2.10 Kül Fırını

Deneysel çalışmalarda üretilen geopolimer harç numuneler Şekil 2.14'te gösterilen cihazda 300, 600 ve 900°C'lik sıcaklıklara maruz bırakılarak yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 2.14 Kül fırını görünümü

2.3 Karışım Oranları ve Deneylerin Tasarımı

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada geopolimer harç numunelerin üretiminde bağlayıcı olarak ıgimbirit, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve agrega olarak CEN standart kumu kullanılmıştır. Harç üretiminde numunelerin kalıplara yerleştirilebilmesi için gerekli olan işlenebilirlik ön çalışmalarla belirlenmiş ve bu kapsamda su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak seçilmiştir.

Çalışmada %4 ve %8 olmak üzere 2 farklı oranda Na^+ içerecek şekilde aktivatör kullanılmıştır. Katı sodyum hidroksit, karışım suyu ile karıştırılarak elde edilen solüsyon sisteme dahil edilmiştir. Hazırlanan solüsyon harç üretiminde kullanılmadan 1 gün bekletilerek su ile sodyum hidroksitin ekzotermik reaksiyonundan açığa çıkan ısının kaybı sağlanmıştır.

Ön çalışmalar sırasında üretilen geopolimer harç numunelerin kalıptan çıkması için etüvde veya havada bekletme olarak iki farklı metot uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda metotlar arasında numunelerin mekanik özelliklerine direkt etki edecek kayda değer bir fark olmasa da metotların ekonomik ve sürdürülebilirlik açılarından da değerlendirilmesinin uygun olacağı düşünülerek deneysel çalışmalarda iki farklı kalıptan çıkarma metodunun uygulanmasına karar verilmiştir.

Kalıptan çıkarılma işlemleri tamamlanan numuneler 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün boyunca 50, 75 ve 100°C'lik ısı küre tabi tutulmuşlardır. Numune üretiminde kullanılan malzemelerin karışım oranları, miktarları ve uygulanan ısıl kür şartları Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2'de numune ismi kodlamasında verilen Na sembolünün başındaki 4 ve 8 rakamları karışımın Na^+ konsantrasyonunu; 50, 75 ve 100 sayıları kür sıcaklığını; E sembolü etüvde, H sembolü ise havada bekleterek kalıptan çıkarma metodunu temsil etmektedir. Örneğin 8Na-75E kodu, %8 oranında Na^+ içeren, kalıptan çıkabilmesi için 4 gün boyunca 75°C etüvde bekletilen, kalıptan çıkarıldıktan sonra 75°C'de 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün boyunca ısı küre tabi tutulan numune serisini tanımlamaktadır.

Tablo 2.2 Karışım çizelgesi

Numune İsmi	İgnimbirit (g)	Agrega (g)	Na ⁺ Oranı (%)	NaOH Miktarı (g)	Su (g)	Kür Sıcaklığı (°C)	Kür Süresi (gün)
4Na-50E	450	1350	4	31,3	225	50	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
4Na-75E	450	1350	4	31,3	225	75	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
4Na-100E	450	1350	4	31,3	225	100	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
8Na-50E	450	1350	8	62,6	225	50	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
8Na-75E	450	1350	8	62,6	225	75	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
8Na-100E	450	1350	8	62,6	225	100	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
8Na-50H	450	1350	8	62,6	225	50	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
8Na-75H	450	1350	8	62,6	225	75	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
8Na-100H	450	1350	8	62,6	225	100	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

2.3.1 Dayanım Deneylerinin Tasarlanması

Tablo 2.2’de karışım içeriği gösterilen tüm numuneler üretilmiş ve kür işlemleri tamamlandıktan sonra her bir numuneye birim ağırlık tayini ile ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız bir şekilde tamamlanan deneylerin ardından harç numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir.

2.3.2 Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi

Dayanım deneyleri sonucunda en iyi değerlerin elde edildiği seriye yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda kür süreçleri tamamlanan numuneler 300, 600 ve 900°C sıcaklıklarda yüksek sıcaklığa maruz bırakılmışlardır. Yüksek sıcaklık sonrası numunelerin birim ağırlıkları ve ultrasonik dalga hızları ile eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir.

2.3.3 Numunelerin Üretilmesi ve Kür Edilmesi

Deneysel çalışmada üretilen numunelerde karışıma eklenecek aktivatör ve su, numune üretiminden 1 gün önce karıştırılarak gerçekleşen ekzotermik reaksiyondan açığa çıkan ısının kaybolması beklenmiştir. Harç karışımı içerisindeki tüm malzemeler oda sıcaklığında olup karıştırma işlemi de oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak ignimbirit ile sodyum hidroksit solüsyonu 62,5 RPM hızda dönen harç karıştırma mikserinde 30 saniye boyunca karıştırılarak kap içerisindeki malzemelerin homojen bir şekilde karışması sağlanmıştır. Ardından CEN standart kumu sisteme ilave edilip 30 saniye daha 62,5 RPM hızda karıştırılmıştır. Karışım içerisindeki tüm malzemelerin harç içerisinde homojen şekilde dağılması için 30 saniye 125 RPM hızda karıştırılmıştır. Bu aşamada mikser durdurulup harç karışımı 30 saniye boyunca elle alt-üst edilerek kap çeperlerine yapışan malzemeler karışıma yeniden dahil edilmiştir. Ardından karışım, harç mikseriyle 60 saniye boyunca 125 RPM hızda karıştırılarak karıştırma işlemi sonlandırılmıştır.

Üretilen ignimbirit temelli geopolimer harç numuneler kalıp yağı kullanılarak yağlanan 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik çelik kalıplara sarsma tablası kullanılarak yerleştirilmiştir. Harç numunelerin yerleştirildiği kalıplar, numunelerin planlanan kalıptan çıkarılma metotlarına göre etüve veya oda sıcaklığındaki laboratuvarında korunaklı bir bölgeye taşınmıştır. Kalıptan çıkabilecek sertliğe ulaşan prizmatik harç numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra kür süreçlerini tamamlayana kadar 50, 75 veya 100°C etüvde bekletilmişlerdir.

Kür süreci tamamlanan her bir numunenin birim ağırlığı tayin edilmiş, Pundit cihazıyla ultrasonik atımlı dalga hızları belirlenmiştir. Tahribatsız deneylerin ardından her bir numunenin eğilme dayanımı belirlenmiş ve eğilme deneyi sonucunda ikiye bölünen numunelerin üzerinde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir.

2.4 Deneysel Çalışmalar

2.4.1 İşlenebilirliğin Tayini

Üretilen geopolimer harçların işlenebilirlik değerleri, TS EN 1015-3 [22] standardına uygun şekilde yayılma tablası ile Şekil 2.15'teki gösterildiği gibi belirlenmiştir. İşlenebilirlik deneyi için üst çapı 7 cm, alt çapı 10 cm olan 6 cm yüksekliğindeki konik kalıp ve 4 cm çapında 250 g ağırlığındaki tokmak kullanılmıştır. Deneyler öncesinde konik kalıp ve levha temizlenmiş, konik kalıp az miktarda yağlanmıştır. Konik kalıbın levhanın ortasına yerleştirilmesinin ardından geopolimer harç kalıba 2 katmanda ve her katmanda 10 adet tokmak vuruşuyla yerleştirilmiştir. Konik kalıptan taşan fazla harç spatula yardımıyla sıyırılmış ve kalıp yukarı doğru yavaşça çekilmiştir. Levha, yayılma tablasının kolu ile 1,25 cm yükseklikten saniyede 1 kez olacak şekilde 15 kez düşürülmüştür. Harcın sergilediği yayılma, birbirine dik iki doğrultuda cetvel yardımıyla ölçülerek kaydedilmiştir. Her iki doğrultuda mm cinsinden elde edilen yayılma değerlerinin ortalaması alınarak geopolimer harcın işlenebilirliği tayin edilmiştir.



Şekil 2.15 İşlenebilirlik deneyinin görünümü

2.4.2 Birim Ağırlığın Tayini

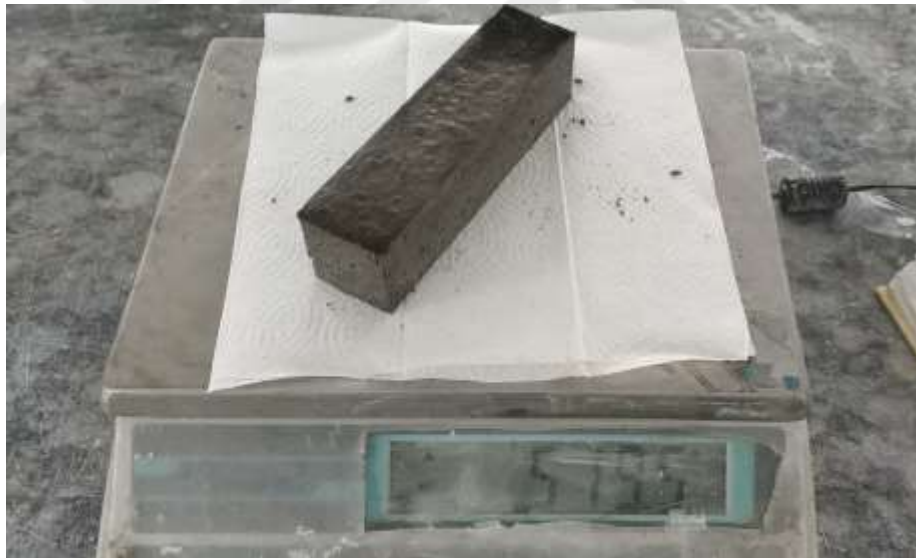
Kür süreçleri tamamlanan geopolimer harç numunelerinin ağırlıkları Şekil 2.16'da görüldüğü gibi 0,1 g hassasiyetli terazide tartılarak kumpas yardımıyla ölçülen geometrik ebatlarına bölünmüş ve sertleşmiş harç numunelerinin birim hacim ağırlıkları yaklaşık olarak tayin edilmiştir.

$$\text{Birim Ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{A_{KS}}{\text{Numune Ebatları}}$$

Denklem 2.1 Birim Ağırlık Formülü

Bu formülde;

A_{KS} : Kür sonrası ağırlık



Şekil 2.16 Birim ağırlık tayini deneyi görünümü

2.4.3 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini

Kür süreçlerinin tamamlanmasının ardından birim ağırlıkları belirlenen geopolimer harç numunelerinin ultrasonik atımlı dalga hızları Pundit (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) isimli Proceq markalı cihaz ile TS EN 12504-4 [23] standardına uygun bir şekilde Şekil 2.17'de görüldüğü gibi belirlenmiştir. Cihazın çalışma prensibi; verici prob tarafından gönderilen ve katettiği mesafe bilinen ultrasonik dalganın alıcı prob tarafından karşılanma süresinin mikrosaniye (μs) cinsinden ölçülmesi esasına

dayanmaktadır. Su bazlı ultrasonik jel kullanılarak numune yüzeyinin proba tam teması sağlanır. Deney 4x4x16 cm boyutlarındaki numunelerin 16 cm'lik boyutları doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik dalganın numune içerisinden geçiş süresi numunenin içinde bulunan boşluklara, çatlaklara, numune yoğunluğuna ve elastik özelliklerine göre değişkenlik gösterir. Elde edilen veriler numunenin iç yapısı, içerisindeki boşluklar, çatlaklar ve harç kalitesi hakkında bilgi sağlamaktadır. Her bir seri için 3 adet prizmatik harç numunesi üzerinde deney gerçekleştirilmiş olup elde edilen değerlerin ortalaması alınarak numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları belirlenmiştir. Deney sonucu aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V = \frac{L}{T}$$

Denklem 2.2 Ultrasonik Dalga Hızı Formülü

Bu formülde;

V: Ultrasonik dalga hızı, km/s

L: Geçiş uzunluğu, mm

T: Geçiş zamanı, μ s



Şekil 2.17 UPV deneyinin görünümü

2.4.4 Eğilme Dayanımının Tayini

Kür süreçlerinin tamamlanmasının ardından birim ağırlıkları ve ultrasonik atımlı dalga hızları belirlenen 4x4x16 cm ebatlarındaki numunelerin eğilme dayanımları Şekil 2.18’de görüldüğü şekilde TS EN 1015-11 [24] standardına uygun biçimde belirlenmiştir. Deneyin gerçekleştirildiği eğilme deneyi modülünün altında 100±0,5 mm aralıkta yerleştirilen 45-50 mm arasında değişen uzunluğa sahip 10±0,5 mm çapta 2 adet mesnet silindiri bulunmaktadır. Üst tarafta ise alt mesnet silindirlerinin ortasına yerleştirilen aynı uzunluk ve çapa sahip olan bir diğer yükleme silindiri bulunmaktadır. Yük, numunelerin kalıptan çıkan temiz yüzeylerine tek bir noktadan, ani sıçrama olmayacak şekilde ve bilgisayar kontrolünde 50 N/s hızda uygulanmıştır. Eğilme deneyinde çekme dayanımı (f) değeri aşağıdaki denklem ile MPa biriminden hesaplanmıştır. Her bir seri için toplamda 3 adet numuneye eğilme deneyi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak eğilme dayanımı tayin edilmiştir.

$$f = \frac{3 * F * L}{2 * b * d^2}$$

Denklem 2.3 Eğilme Dayanımı Formülü

Burada;

f: Eğilmede çekme dayanımı, N/mm²

b: Numune kesitinin genişliği, (40 mm)

d: Numune kesitinin yüksekliği, (40 mm)

F: Numuneye orta noktasından uygulanan kuvvet, (Newton)

L: Destek silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (100 mm)



Şekil 2.18 Eğilme deneyinin görünümü

2.4.5 Basınç Dayanımının Tayini

Eğilme deneyi sonucunda 2 parçaya bölünen geopolimer harç numunelerinin düzgün yüzeyleri üzerinde TS EN 1015-11 [24] standardına uygun olacak şekilde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Basınç deneyi modülünün alt ve üst kısmında 4x4 cm genişliğe sahip 1 cm kalınlığındaki başlıklar bulunmaktadır. Yükleme, bilgisayar kontrolünde ve 500 N/s hızda Şekil 2.19’da görüldüğü şekilde gerçekleştirilmiştir. Her bir seri için gerçekleştirilen 3 eğilme deneyinin ardından 6 adet yarım numune elde edilmiştir. 6 adet yarım numunenin her birine ayrı ayrı basınç dayanımı deneyi uygulanmış, deneyden elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak basınç dayanımı tayin edilmiştir. Basınç dayanımının hesaplanmasında kullanılan formül aşağıda verilmiştir.

$$f = \frac{F}{a * b}$$

Denklem 2.4 Basınç Dayanımı Formülü

Burada;

f: Eğilmede çekme dayanımı, N/mm²

a: Numune kesitinin eni, (40 mm)

b: Numune kesitinin boyu, (40 mm)

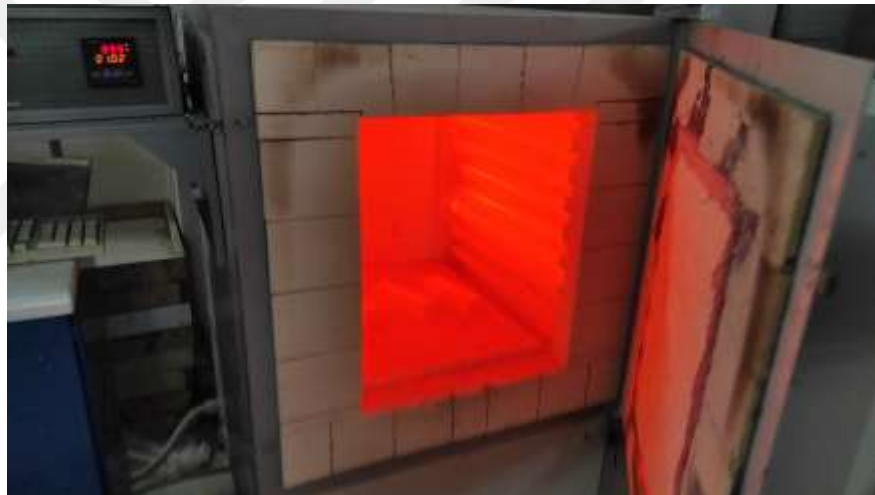
F: Numunenin kırılma kuvveti, (Newton)



Şekil 2.19 Basınç deneyinin görünümü

2.4.6 Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılığın Tayini

Dayanım deneyleri sonucunda en yüksek değerlerin elde edildiği seriler olan %8 oranında Na^+ içeren ve etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün boyunca 75°C etüvde kür edilen 8Na-75E-4 kodlu numune ile havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün 75°C etüvde kür edilen 8Na-75H-4 kodlu numune üzerinde yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyi gerçekleştirilmiştir. Numuneler Şekil 2.20’de görülen kül fırınında 300 , 600 ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. İçerisinde numunelerin olduğu fırın; dakikada 5°C ’lik artışla hedef sıcaklığa ulaşacak şekilde ayarlanmış; bir saat boyunca ayarlanan sıcakta bekletilmiş ve soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığına gelen numunelerin birim ağırlıkları, ultrasonik atımlı dalga hızları, eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 2.20 Yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyinin görünümü

2.4.7 FESEM İncelemeleri

İgnimbirit ile üretilen geopolimer harç numunelerinin iç yapıları hakkında detaylı bilgi edinmek için alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy)) ile incelemeler yapılmıştır. FESEM mikroskopları daha düşük voltajlarda çalışma imkanından dolayı SEM mikroskoplarına kıyasla daha küçük ölçekte daha net görüntü sağlamaktadır.

FESEM’de elektron kaynağından koparılan elektronlar vakum altında bulunan bir kolonda toplayıcı mercekler sayesinde numune üzerine düşürülmektedir. Numune yüzeylerinde var olan atomlar ile elektron demetinin etkileşimi neticesinde ortaya çıkan

parçacıklar ve x-ışınları tespit edilir. Böylece incelenmekte olan numunenin kimyasal içeriği ve topoğrafyası hakkında bilgi sahibi olunmaktadır.

Hazırlanan numunelerin iç yapı özellikleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM)'da bulunan Zeiss (GeminiSEM 500) marka FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy, Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) ile incelenmiştir. Elektron mikroskobunda incelenmek üzere hazırlanan numunelerin görünümü Şekil 2.21'de gösterilmiştir.

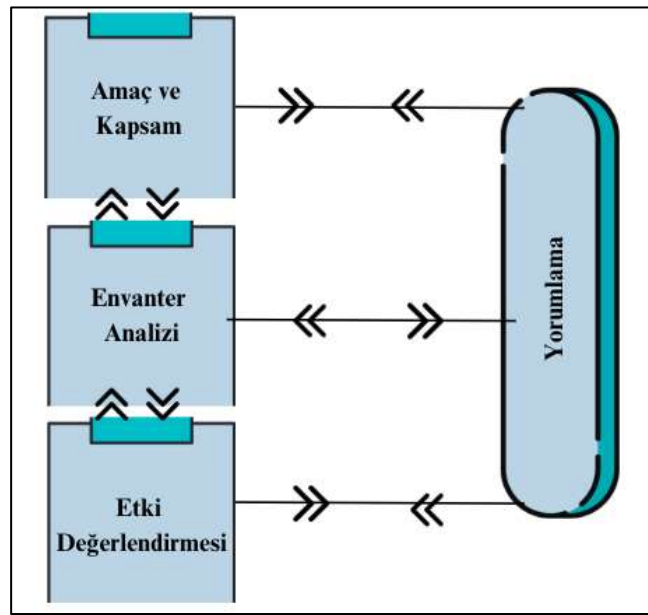


Şekil 2.21 FESEM incelemesi için hazırlanan numuneler

2.4.8 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) bir ürün ya da hizmetin hammadde çıkarımından başlayarak, ilgili tüm üretim, nakliye, kullanım ve kullanım sonrası atık bertarafını da kapsayan yaşam döngüsünün farklı aşamalarındaki çevresel etkilerini belirlemek, raporlamak ve yönetmek için kullanılan bir yöntemdir.

ISO 14040 [25] ve 14044 [26] standartlarına göre YDD, amaç ve kapsamın belirlenmesi, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve sonuçların yorumlanması gibi dört temel aşamadan oluşmaktadır. Belirtilen standartların incelenmesi sonucunda, YDD sürecinde izlenecek adımlar ve bu adımlar arasındaki ilişki Şekil 2.22'de gösterilmiştir.

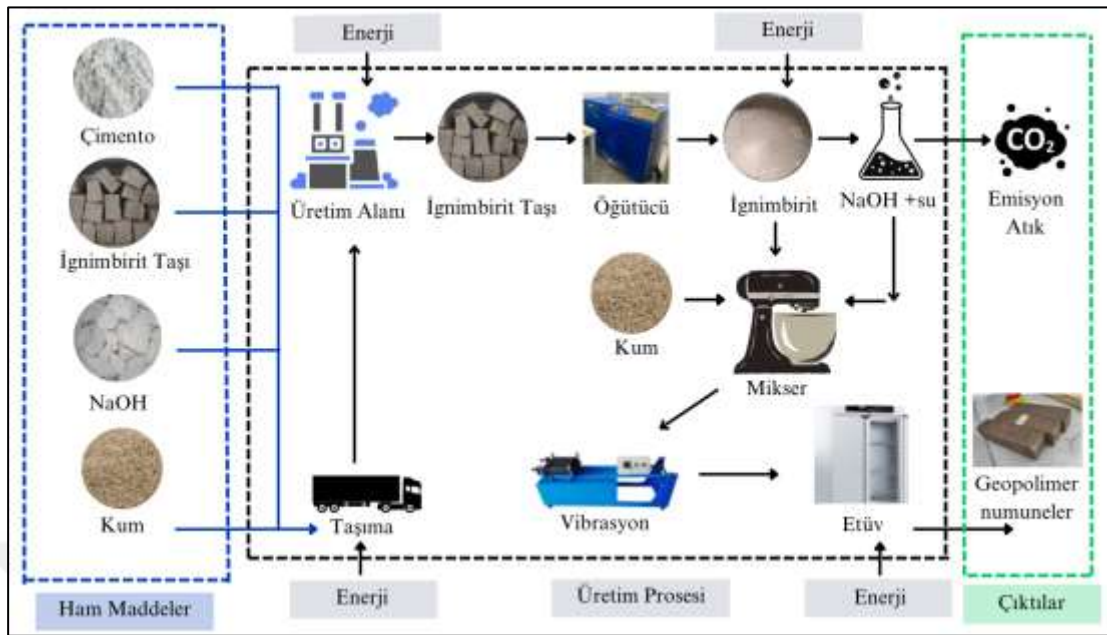


Şekil 2.22 YDD sürecinin adımları

2.4.8.1 Amaç ve Kapsam Tanımı

YDD çalışmasının ilk aşaması olan ‘Amaç ve Kapsam’ tanımlama, yürütülecek çalışmanın amacını ve kapsamını tanımlamaktadır. Ortaya çıkacak etkilerin yaşam döngüsü boyunca karar verme sürecine nasıl katılacağına dair yöntemin belirlendiği aşamadır. Bu çalışmada YDD’nin amacı çimentolu harç ve geopolimer harçların çevresel etkilerini ölçmek ve karşılaştırmalar yapmaktır. Bu kapsamda çimentolu harç numunesi ile kıyaslama yapmak için geopolimer harç numunelerinden etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün boyunca 75°C etüvde kür edilen 8Na-75E-4 kodlu numuneyle havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün boyunca 75°C etüvde kür edilen 8Na-75H-4 kodlu seçilmiştir.

YDD sonuçlarının ölçülebilir olabilmesi için kritik önem taşıyan fonksiyonel birim $1\text{m}^3/\text{MPa}$ olarak belirlenmiştir. Çalışmada, üretilen numunelerin ham maddelerinin çıkarımından başlanarak üretim süreci dahil yaşam döngüsü aşamalarını kapsayan beşikten kapıya yaklaşımı izlenmiştir. Çimentolu ve geopolimer harç numunelerinin sistem sınırları Şekil 2.23’te verilmiştir.



Şekil 2.23 Çimentolu ve geopolimer harç numunelerinin sistem sınırları

2.4.8.2 Yaşam Döngüsü Envanteri

Yaşam döngüsü envanteri, bir ürün sistemine ilişkin malzeme ve enerji girdileri ile çıktıları belirlemek amacıyla veri toplama ve hesaplama sürecini içermektedir. Bu kapsamda, harç karışımlarının hammadde miktarları ve enerji tüketimine ilişkin birincil envanter verileri, laboratuvar ölçeğindeki deneysel çalışmalardan türetilmiştir. Çalışmada kullanılan hammaddeler arasında Portland çimentosu, ignimbirit, kum ve NaOH yer almaktadır. Portland çimentolu harcın üretimi için, mukavemet sınıfı 42,5 ve özgül ağırlığı $3,14 \text{ g/cm}^3$ olan Portland çimentosu kullanılmıştır.

Kullanılan hammaddeler, EURO 4 standartlarına uygun, 16-32 ton kapasiteye sahip dizel yakıtlı kamyonlarla karayolu ile taşınmıştır. Taşıma mesafeleri ise Google Haritalar kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 2.3'te hammaddelerin taşıma mesafeleri verilmiştir. Birim fonksiyona göre belirlenen üretim prosesine ait enerji tüketimleri ise Tablo 2.4'te verilmiştir.

Hammadde üretimi, enerji tüketimi ve taşıma ile ilgili veriler, SimaPro 9.5 yazılımında Ecoinvent 3.9.1 veritabanı aracılığıyla elde edilen verilere dayanmaktadır. Bu veriler, YDD kapsamında çevresel etki analizleri için temel oluşturmuştur.

Tablo 2.3 Taşıma mesafeleri

Hammadde	Ülke-İl	km
Çimento	Türkiye-Kayseri	35
İgnimbirit	Türkiye-Kayseri	32
Kum	Türkiye-Kırklareli	980
NaOH	Türkiye-Kayseri	10

Tablo 2.4 Enerji tüketimleri

Harç Üretim Prosesi	PÇ (kWh)	8Na-75E-4 (kWh)	8Na-75H-4 (kWh)
Öğütücü	-	234	234
Mikser	10,41	13,02	13,02
Vibrasyon	2,6	7,81	7,81
Etüv (Isıl Kür)	-	25,44	25,44

2.4.8.3 Yaşam Döngüsü Etki Değerlendirmesi

Yaşam döngüsü etki değerlendirmesi, envanter aşamasında toplanan verilerin analiz edilmesiyle elde edilen sonuçların değerlendirildiği bir aşamadır. Bu aşamada, ilgili ürün, süreç veya hizmet için çevresel etki kategorileri belirlenir ve kullanılacak etki değerlendirme metodu seçilerek analiz yapılır. Elde edilen analiz sonuçları, yaşam döngüsü değerlendirmesinin son aşaması olan yorum safhası için önemli bir bilgi kaynağıdır [25].

Çalışmada SimaPro 9.5 yazılımında CML-IA temel yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem; abiyotik tükenme (AD, kg Sb eşdeğeri), abiyotik tükenme-fosil yakıtlar (AD-FF, MJ), küresel ısınma potansiyeli (GWP, kg CO₂ eşdeğeri), ozon tükenmesi (ODP, kg CFC - 11 eşdeğeri), insan toksisitesi (HT, kg 1,4-DB eşdeğeri), tatlı su sucul ekotoksisite (FAE, kg 1,4-DB eşdeğeri), deniz ekotoksisitesi (MAE, kg 1,4-DB eşdeğeri), karasal ekotoksisite (TE, kg 1,4-DB eşdeğeri), fotokimyasal oksidasyon (PO, kg C₂H₄ eşdeğeri), asitleşme potansiyeli (AP, kg SO₂ eşdeğeri) ve ötrofikasyon potansiyeli (EP, PO₄- eşdeğeri) çevresel etki kategorilerini kapsar. Çalışma için belirlenen etki kategorileri mevcut literatür taramasına göre etki yöntemleri ile uyumludur [27,28].



3. BÖLÜM

BULGULAR

Bu bölümde deneysel çalışmalarda üretilip kür işlemleri tamamlanan geopolimer harç numuneler üzerinde gerçekleştirilen işlenebilirliğin tayini, birim ağırlığın tayini, ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, eğilme dayanımının tayini, basınç dayanımının tayini ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneylerinin sonuçlarının yanı sıra alan taramalı elektron mikroskobundan edinilen görüntülerin incelemeleri sunulmuştur. Ayrıca yaşam döngüsü değerlendirmesi yapılarak geopolimer harç numunelerin çevresel etkileri araştırılmıştır.

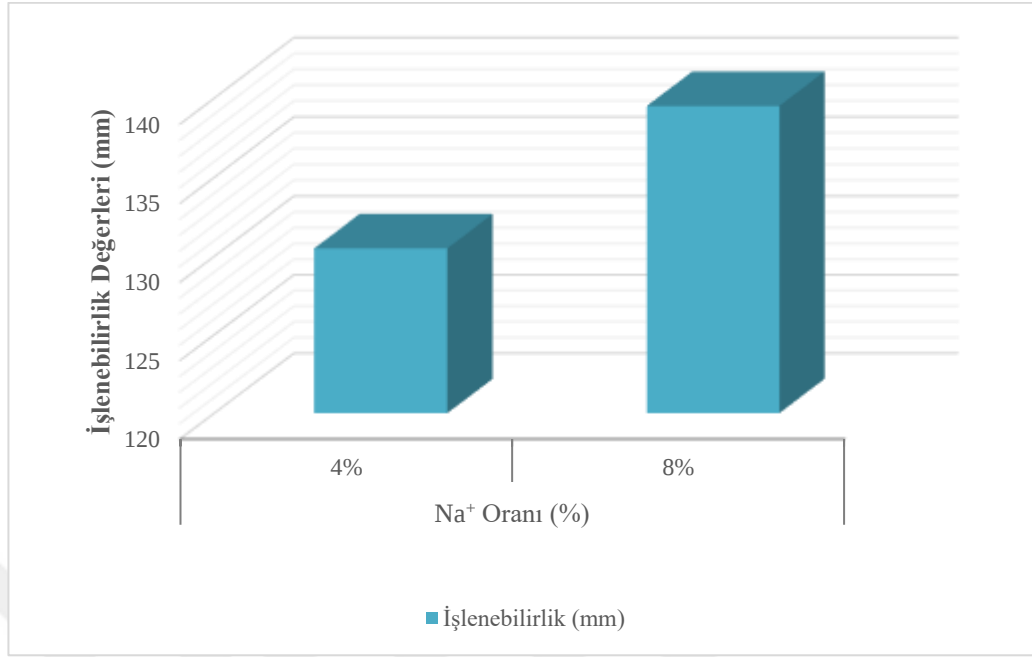
3.1 İşlenebilirlik Deneyi Sonuçları

İgnimbirit ve sodyum hidroksit kullanılarak üretilen geopolimer harç numunelerin yayılma tablasında işlenebilirliği TS EN 1015-3 [22] standardına uygun olarak belirlenmiştir. İşlenebilirlik deneyi sonuçları Tablo 3.1 ve Şekil 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 İşlenebilirlik deneyi sonuçları

Na ⁺ Oranı (%)	%4	%8
İşlenebilirlik (mm)	130,5	139,5

Deneysel çalışmalarda karışım içeriği olarak 2 tip harç üretilmiştir. Karışımlar arasında farklılık arz eden tek parametre, aktivatör olarak %4 ve %8 oranlarında kullanılan sodyum hidroksittir. %8 oranında Na⁺ içeren harç karışımının işlenebilirlik değeri %4 oranında Na⁺ içeren harç karışımından yaklaşık olarak %7 daha fazladır. Bu durum aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksitin kaygan yapısından kaynaklanmakta olup literatürdeki verilerle örtüşmektedir.



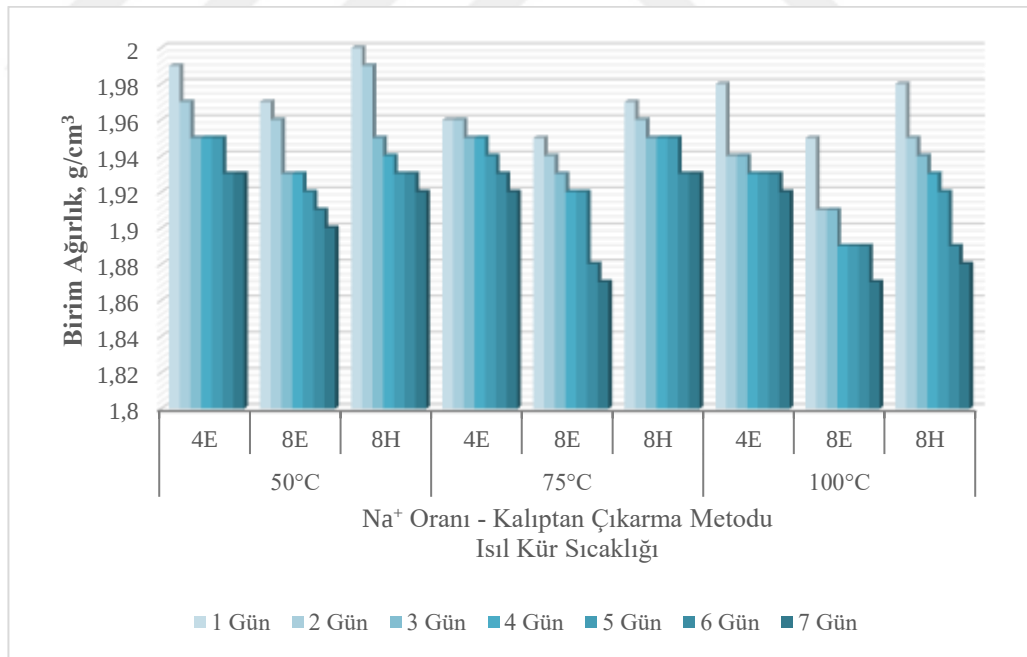
Şekil 3.1 İşlenebilirlik deneyi sonuçları

3.2 Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

50, 75 ve 100°C sıcaklıklarda 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 gün boyunca ısıl küre tabi tutulan 4x4x16 cm boyutlarındaki geopolimer harç numuneler kür süreçlerinin tamamlanmasının ardından oda sıcaklığına gelene kadar beklenmiş ve sonrasında ağırlıkları tartılıp geometrik boyutlarına bölünerek birim ağırlıkları yaklaşık olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.2 ve Şekil 3.2’de sunulmuştur. Üretilen geopolimer harç numunelerin birim ağırlıkları 1,87 g/cm³ ile 2,00 g/cm³ arasında değişkenlik göstermiştir. Birim ağırlık değeri en yüksek olan numune 2,00 g/cm³’lük değeriyle havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 50°C etüvde 1 gün kür edilen karışım olurken birim ağırlık değeri en düşük olan numuneler ise etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 75°C ve 100°C etüvde 7 gün kür edilen numunelere aittir. Kullanılan aktivatör miktarının numunelerin birim ağırlık değerleri üzerinde kayda değer bir farklılık oluşturmadığı saptanırken her bir numune grubunun birim ağırlık değerlerinin kür süreleriyle ters orantılı bir şekilde düşüş yaşamasıyla uygulanan ısıl kür ile geopolimer harç numunesi bünyesindeki nemin uzaklaştığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 3.2 Birim ağırlık deneyi sonuçları (g/cm³)

Sıcaklık (°C)	50			75			100		
Na ⁺ Oranı (%)	4	8	8	4	8	8	4	8	8
Kalıptan Çıkarma Metodu	Etüv	Etüv	Hava	Etüv	Etüv	Hava	Etüv	Etüv	Hava
1 Gün	1,99	1,97	2,00	1,96	1,95	1,97	1,98	1,95	1,98
2 Gün	1,97	1,96	1,99	1,96	1,94	1,96	1,94	1,91	1,95
3 Gün	1,95	1,93	1,95	1,95	1,93	1,95	1,94	1,91	1,94
4 Gün	1,95	1,93	1,94	1,95	1,92	1,95	1,93	1,89	1,93
5 Gün	1,95	1,92	1,93	1,94	1,92	1,95	1,93	1,89	1,92
6 Gün	1,93	1,91	1,93	1,93	1,88	1,93	1,93	1,89	1,89
7 Gün	1,93	1,90	1,92	1,92	1,87	1,93	1,92	1,87	1,88



Şekil 3.2 Birim ağırlık deneyi sonuçları

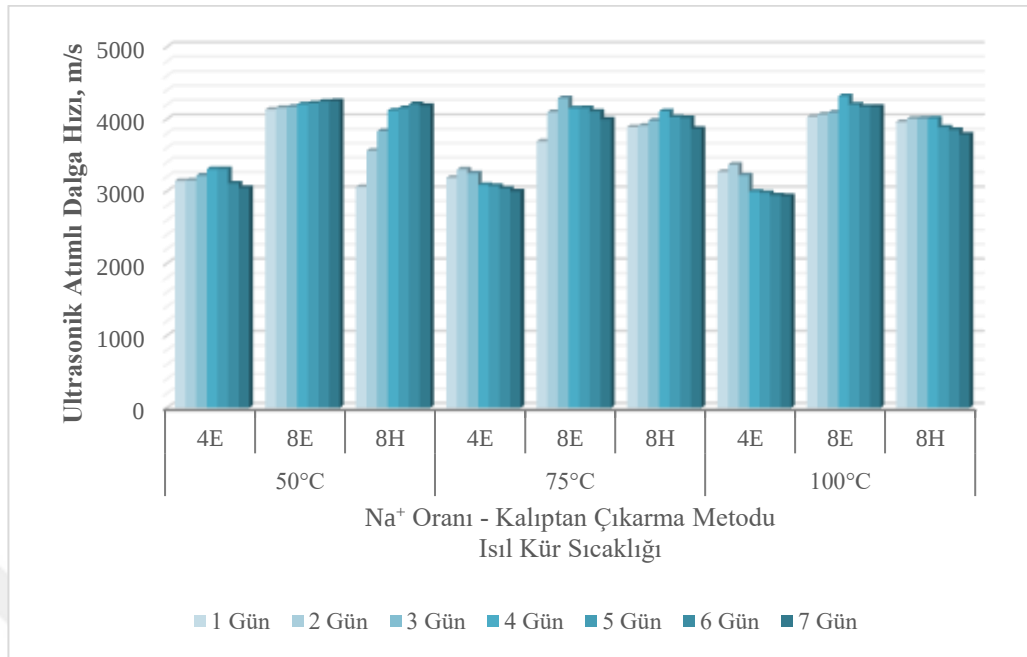
3.3 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyi Sonuçları

Kür süreçleri tamamlandıktan sonra birim ağırlıkları belirlenen 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik harç numunelerin 16 cm'lik uzun boyutları doğrultusunda ultrasonik dalga hızları ölçülmüştür. Numunelerin Pundit (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) ismi verilen cihazda ölçülen ultrasonik dalga hızları Tablo 3.3 ve Şekil 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 Ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi sonuçları (m/s)

Sıcaklık (°C)	50			75			100		
Na ⁺ Oranı (%)	4	8	8	4	8	8	4	8	8
Kalıptan Çıkarma Metodu	Etüv	Etüv	Hava	Etüv	Etüv	Hava	Etüv	Etüv	Hava
1 Gün	3141	4131	3059	3185	3689	3887	3268	4030	3960
2 Gün	3148	4156	3561	3301	4096	3906	3366	4061	4003
3 Gün	3217	4167	3831	3248	4290	3977	3221	4089	4007
4 Gün	3304	4203	4117	3087	4149	4106	2993	4317	4007
5 Gün	3306	4218	4152	3071	4152	4023	2976	4199	3883
6 Gün	3107	4240	4207	3034	4103	4013	2941	4167	3849
7 Gün	3046	4248	4181	2998	3993	3862	2930	4167	3785

Üretilen geopolimer harç numuneleri arasında en yüksek ultrasonik dalga hızına sahip olan numune 4317 m/s hızla %8 Na⁺ içeren, etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 100°C etüvde 4 gün kür edilen karışım olurken en düşük ultrasonik dalga hızına sahip olan numune 2930 m/s hızla %4 Na⁺ içeren, etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 100°C etüvde 7 gün kür edilen karışım olmuştur.



Şekil 3.3 Ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi sonuçları

Üretilen geopolimer harç numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızı değerleri Whitehurst'un [29] betonlar için önerdiği, Tablo 3.4'te sunulan 'Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Değerlerine Göre Beton Kalitesinin Değerlendirilmesi' limitlerine göre incelenmiştir. Üretilen geopolimer harç numunelerden %4 oranında Na⁺ içerenlerin 'zayıf veya şüpheli' kalitesinde olduğu gözlenirken %8 oranında Na⁺ içeren numunelerin 'iyi' kalitesinde olduğu gözlenmiştir. %8 oranında Na⁺ içeren numunelerden yalnızca havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 gün 50°C etüvde kür edilen, henüz tam olarak priz almamış olan numune 'şüpheli' kalitesindedir.

Tablo 3.4 Ultrasonik atımlı dalga hızı değerlerine göre beton kalitesinin değerlendirilmesi

Dalga Hızı, m/s	Beton Kalitesi
>4500	Mükemmel
3500-4500	İyi
3000-3500	Şüpheli
2000-3000	Zayıf
<2000	Çok zayıf

3.3.1 *Aktivatör Miktarının Ultrasonik Dalga Hızına Etkisi*

Ultrasonik atımlı dalga hızı deneyinden elde edilen sonuçlar karışımında kullanılan aktivatör miktarının numunenin ultrasonik dalga hızına direkt etki eden bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı şartlarda kalıptan çıkarılan %4 ve %8 oranlarında Na^+ içeren numunelerden daha düşük sodyum içeriğini diğerine göre yaklaşık 1000 m/s daha düşük ultrasonik dalga hızı göstermiştir.

3.3.2 *Kalıptan Çıkarma Metodunun Ultrasonik Dalga Hızına Etkisi*

Üretilen geopolimer harçların kalıptan çıkarılmasında kullanılan 2 farklı metodun numunelerin ultrasonik dalga hızları üzerindeki etkisi incelendiğinde sonuçlar üzerinde kayda değer bir fark oluşturmadığı saptanmıştır. Etüvde ve havada bekletilerek kalıptan çıkarılan, %8 oranında Na^+ içeren numunelerin ultrasonik dalga hızları incelendiğinde en dikkat çeken fark 50°C’de kür edilen numunelerden 1, 2 ve 3 günlük kür süresine sahip olanlar arasında olup bahse konu farkın kür sürecinin ilerleyen günlerinde oldukça azalması, durumun kür süresiyle ilişkilendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

3.3.3 *Kür Sıcaklığı ve Süresinin Ultrasonik Dalga Hızına Etkisi*

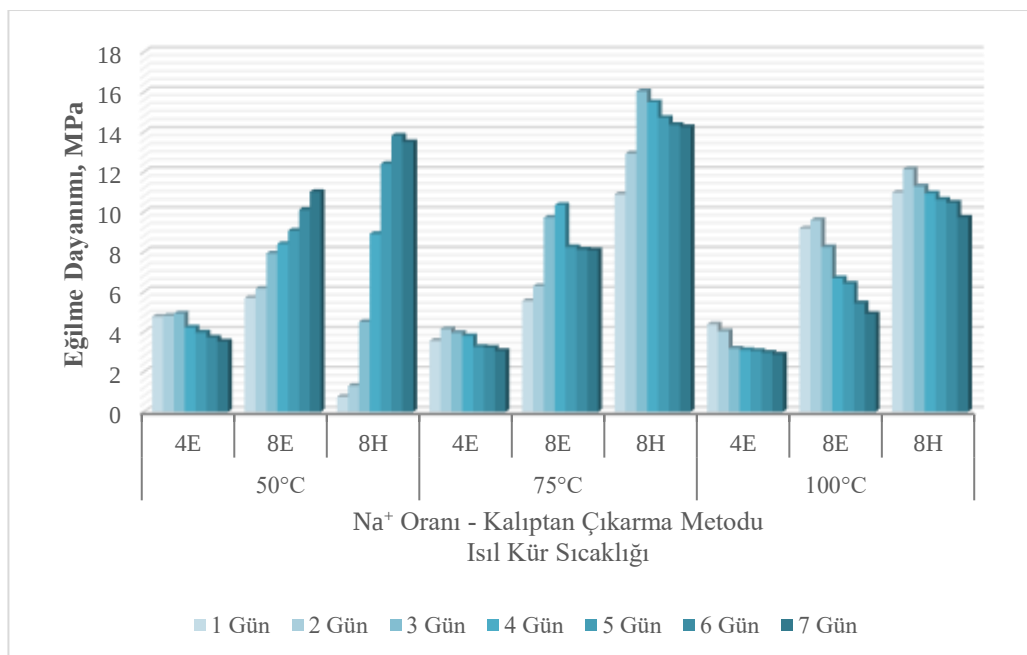
Üretilen geopolimer harç numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları incelendiğinde numunelerin ısıl kür sıcaklığı ve süresinin sonuçlar üzerinde direkt etki eden unsurlardan olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı metotla kalıptan çıkarılan numuneler incelendiğinde 50°C’de kür edilen numunelerin kendi numune grupları içerisinde en yüksek dayanıma 6. ve 7. günlerde ulaşırken 75 ve 100°C’de kür edilen numunelerin ise kendi grupları içerisinde en yüksek dayanıma 3. ve 4. günlerde ulaşması kür sıcaklığı ve süresinin numunelerin ultrasonik dalga hızları üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlar ignimbirit ile üretilen geopolimer harçların ısıl küre ihtiyaç duyduğunu göstermektedir. Öte yandan Şekil 3.3’te verilen numunelerin ultrasonik dalga hızı grafiği incelendiğinde numune gruplarının kendi içerisindeki optimum kür süresinde elde edilen pik dalga hızı değerlerinden sonra düşüş yaşanması numunelerin ısıl küre aşırı maruziyetinde iç yapısında meydana gelen tahribat nedeniyle ultrasonik dalga hızında düşüşler yaşanabileceğini göstermektedir.

3.4 Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Birim ağırlıkları ve ultrasonik dalga hızları belirlenen 4x4x16 cm ebatlarındaki prizmatik geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları belirlenmiştir. Eğilme dayanımı deneyi, kalıptan çıkarılan numunelerin temiz yüzeyleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.5 ve Şekil 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Eğilme dayanımı deneyi sonuçları

Sıcaklık (°C)	50			75			100		
Na ⁺ Oranı (%)	4	8	8	4	8	8	4	8	8
Kalıptan Çıkarma Metodu	Etüv	Etüv	Hava	Etüv	Etüv	Hava	Etüv	Etüv	Hava
1 Gün	4,76	5,69	0,74	3,55	5,54	10,88	4,37	9,17	10,96
2 Gün	4,80	6,16	1,29	4,13	6,28	12,91	4,02	9,59	12,13
3 Gün	4,91	7,92	4,49	3,94	9,71	16,03	3,16	8,23	11,27
4 Gün	4,21	8,39	8,89	3,78	10,34	15,48	3,08	6,67	10,92
5 Gün	3,96	9,05	12,40	3,24	8,23	14,70	3,04	6,40	10,61
6 Gün	3,71	10,10	13,81	3,20	8,11	14,35	2,95	5,42	10,45
7 Gün	3,51	11,00	13,49	3,04	8,07	14,24	2,85	4,88	9,71



Şekil 3.4 Eğilme dayanımı deneyi sonuçları

3.4.1 Aktivatör Miktarının Eğilme Dayanımına Etkisi

Eğilme dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlar aktivatör miktarının geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisini bariz bir şekilde ortaya koymaktadır. %4 oranında Na^+ içeren ve kalıptan çıkana kadar etüvde bekletilen geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımları arasındaki en küçük değer 2,42 MPa ile 100°C’de 6 gün boyunca kür edilen numuneye aitken en büyük değer ise 4,91 MPa ile 3 gün boyunca 50°C’de kür edilen numuneye aittir. Öte yandan aynı yöntemle kalıptan çıkarılan ve %8 oranında Na^+ içeren numuneler arasında en düşük dayanım 4,88 MPa ile 100°C’de 7 gün boyunca kür edilen numuneye aitken en yüksek dayanım 11,00 MPa ile 50°C’de 7 gün boyunca kür edilen numuneye aittir. Aktivatör miktarı artışının eğilme dayanımı ile paralellik göstermesi literatürdeki çalışmalarla da örtüşmektedir [30].

3.4.2 Kalıptan Çıkarma Metodunun Eğilme Dayanımına Etkisi

Çalışmada geopolimer harç numunelerinin üretiminde kullanılan iki farklı kalıptan çıkarma metodunun numunelerin eğilme dayanımı üzerinde teşkil ettiği farklılıklar dikkat çekici bir şekilde ortaya koyulmuştur. %8 oranında Na^+ içeren geopolimer numunelerden havada bekletilerek kalıptan çıkarılanlar, etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılan numunelere nispeten daha yüksek eğilme dayanımlarına ulaşabilmektedir. Yine aynı numune grupları arasında yapılabilecek bir diğer kıyas ise erken dönem dayanımları ile ilgilidir. Havada bekletilerek kalıptan çıkarılan numuneler, özellikle 50°C’lik ısıl kürün ilk günlerinde hızlı bir şekilde dayanım kazanamamış olup eğilme dayanımları etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılan numunelere nispeten daha düşük olmuştur. Kalıptan çıkarma metodunun maksimum dayanım üzerindeki etkisinin gözlenebileceği numune gruplarından %8 oranında Na^+ içeren ve etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılan numune en yüksek 11,00 MPa dayanım sergilerken aynı oranda sodyum içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarılan numune 16,03 MPa dayanım göstermiştir.

3.4.3 Kür Sıcaklığı ve Süresinin Eğilme Dayanımına Etkisi

İgnimbirit ile üretilen geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımlarında ısıl kür miktarının etkisiyle pik dayanım değerine ulaşana kadar artış ve sonrasında kademeli bir şekilde düşüş yaşanmıştır. Pik dayanım değerine ulaşma süresi kür sıcaklığına göre değişiklik göstermiştir. Örneğin %8 oranında Na^+ içeren ve 50°C’de kür edilen

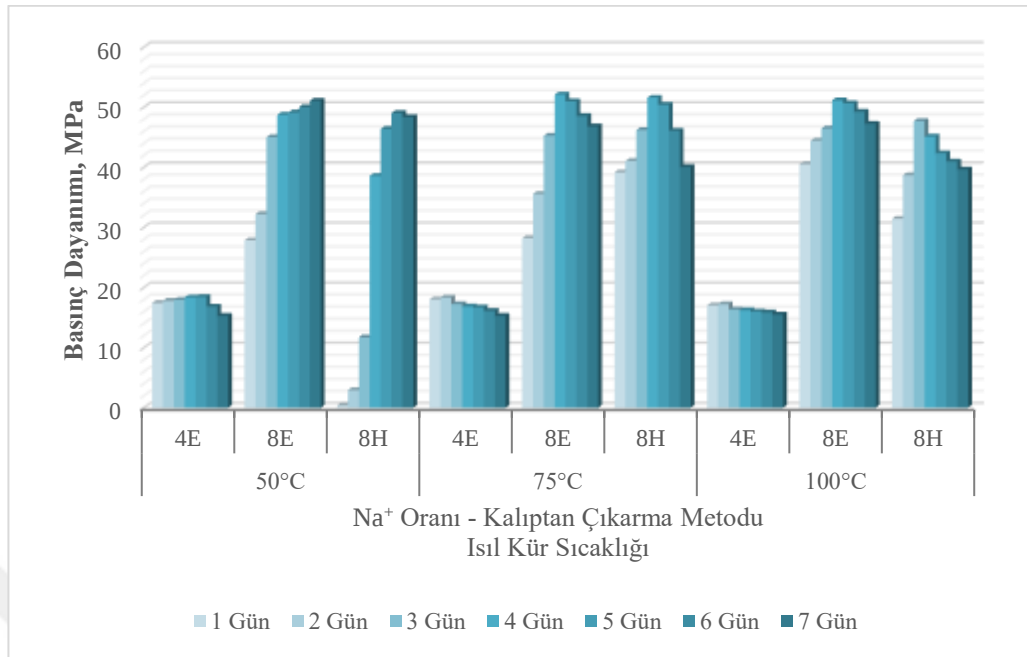
numuneler en yüksek dayanıma 6. veya 7. günde ulaşırken 75°C’de kür edilen numuneler 3. veya 4. günde, 100°C’de kür edilen numuneler ise 2. günde ulaşmaktadır. Geopolimer harç sisteminin ihtiyacı olan ısıl kür, karışım içerisindeki reaksiyonların gerçekleşmesini sağlarken fazla maruziyet durumunda harç numunelerinin iç yapısını bozmakta ve dayanım düşüşlerine sebep olmaktadır.

3.5 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Basınç dayanımı deneyi, eğilme dayanımı deneyi sonucunda iki parçaya bölünen prizmatik harç numunelerin kalıptan çıkan temiz yüzeyleri üzerinde 4x4 cm²’lik alana sahip metal plakanın uyguladığı pres ile gerçekleştirilmiştir. Her bir karışımdan elde edilen altı adet basınç dayanımı değerinin ortalaması alınarak numunenin basınç dayanımı tayin edilmiştir. Elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 3.6 ve Şekil 3.5’te sunulmuştur. Deneyin ardından aktivatör ve kür miktarı ile kalıptan çıkarma metodunun numunelerin basınç dayanımları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Tablo 3.6 Basınç dayanımı deneyi sonuçları

Sıcaklık (°C)	50			75			100		
Na ⁺ Oranı (%)	4	8	8	4	8	8	4	8	8
Kalıptan Çıkarma Metodu	Etüv	Etüv	Hava	Etüv	Etüv	Hava	Etüv	Etüv	Hava
1 Gün	17,41	27,82	0,37	18,02	28,21	39,13	17,01	40,52	31,43
2 Gün	17,79	32,18	2,91	18,29	35,54	41,03	17,21	44,42	38,66
3 Gün	17,92	45,01	11,68	17,22	45,24	46,20	16,32	46,45	47,68
4 Gün	18,33	48,74	38,56	16,84	52,09	51,57	16,21	51,13	45,10
5 Gün	18,43	49,10	46,38	16,70	50,96	50,38	16,00	50,63	42,32
6 Gün	16,81	50,00	49,03	16,09	48,52	46,06	15,85	49,23	40,96
7 Gün	15,27	51,06	48,33	15,27	46,79	40,02	15,48	47,23	39,63



Şekil 3.5 Basınç dayanımı deneyi sonuçları

3.5.1 Aktivatör Miktarının Basınç Dayanımına Etkisi

İgnimbirit kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda dayanım, ignimbirit içeriğinde bulunan alümino-silikatın alkali aktivatör içeriğinde bulunan sodyum ile bir araya gelmesiyle oluşan N-A-S-H jelinin ısı enerjisiyle gerçekleşen kimyasal reaksiyonu sonucunda sağlandığı düşünülmektedir. Alkali aktivatör miktarının azalmasıyla meydana gelen dayanım düşüşü bu durumu desteklemektedir. Çalışmada basınç dayanımı deneyinden elde edilen verilere göre üretilen numuneler arasında en yüksek basınç dayanımına 52,09 MPa ile etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün 75°C sıcaklıkta küre tabi tutulan numune sahip olmuştur. Şekil 3.5'teki basınç dayanımı grafiğinde de görüldüğü üzere %4 oranında Na⁺ içeren numunelerin %8 oranında Na⁺ içeren numunelere kıyasla oldukça düşük basınç dayanımlarına sahip olduğu barizdir. Aktivatör miktarının azalmasına paralel olarak basınç dayanımının düşmesi, eğilme dayanımındaki sonuçlarla benzer şekilde literatürdeki çalışmalarla örtüşmektedir [30].

3.5.2 Kalıptan Çıkarma Metodunun Basınç Dayanımına Etkisi

Basınç dayanımı deneyi sonucunda kalıptan çıkarma metodunun etkisinin incelenebileceği grup olan %8 oranında Na⁺ içeren numunelerin ulaşabildikleri en yüksek basınç dayanımı değerleri, her iki kalıptan çıkarma metodu için de tüm sıcaklıklarda benzer olup asıl farklılık gösteren unsur numunelerin erken dönem dayanımlarıdır. 50°C

etüvde kür edilen numuneler incelendiğinde havada bekletilerek kalıptan çıkarılan numune 1 günlük kür sonunda 0,37 MPa gibi umutsuz bir dayanım sergilerken etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılan numuneler 1 günlük kür sonunda 27,82 MPa'lık dayanım göstermiştir. Aynı numune grupları 50°C'lik kür sürecinin 6. günü sonunda ise neredeyse aynı dayanımları (49,03 ve 49,23 MPa) göstermişlerdir. Benzer şekilde 75°C'de kür edilen numuneler arasında 4 günlük kür süresinin ardından gösterilen basınç dayanımları (51,57 ve 52,09 MPa) birbirine çok yakındır. Bu durum farklı metotlarla kalıptan çıkarılan numune gruplarının ulaşabildikleri maksimum basınç dayanımının benzer olmasını kanıtlar niteliktedir.

3.5.3 Kür Sıcaklığı ve Süresinin Basınç Dayanımına Etkisi

İgnimbirit ile üretilen geopolimer harçların basınç dayanımları eğilme dayanımları ile benzer bir şekilde pik dayanım değerine ulaşmış ve sonrasında kademeli bir düşüş yaşamışlardır. Numunelerin ısıl kür etkisiyle basınç dayanımı kazanmaları, kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için ihtiyaç duydukları ısıl kürün sağlanmasıyla; optimum kür süresinin ardından kademeli şekilde yaşanan düşüş ise numunelerin dayanım kazanma hızlarının ısıl kür maruziyeti etkisinde iç yapının tahrip olmasına yenik düşmesiyle açıklanmaktadır. Ayrıca numunelerin maksimum basınç dayanımlarına ulaştığı kür sürelerinin kür sıcaklıklarına bağlı olarak değişkenlik göstermesi de göze çarpan unsurlar arasındadır. Örneğin 50°C'de kür edilen %8 oranında Na⁺ içeren numunelerin maksimum dayanıma ulaştıkları optimum kür süresi 6-7 günken bu süre aynı oranda Na⁺ içeren numuneler için 75°C'de kür edilirken 4 gün, 100°C'de kür edilirken 3-4 gündür.

3.6 Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyi Sonuçları

Üretilen geopolimer harçlar üzerinde gerçekleştirilen mekanik deneylerin tamamlanmasının ardından sonuçlar değerlendirilmiş ve en iyi sonuçların elde edildiği numunelere yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda mekanik deney sonuçlarına göre birbirine yakın değerler gösterdikleri için %8 oranında Na⁺ içeren numunelerden kalıptan çıkarılması için hem etüvde bekletilerek hem de havada bekletilerek kalıptan çıkarılan ve kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün 75°C etüvde kür edilen numuneler yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyine tabi tutulmuşlardır. Kür süreçlerini tamamlayan numuneler özel kül fırınında 300, 600 ve 900°C sıcaklıklara

maruz bırakılmıştır. Ardından numuneler oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiş ve sonrasında sırasıyla birim ağırlık deneyi, ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi, eğilme dayanımı deneyi ve basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 3.6’da sunulmuştur.



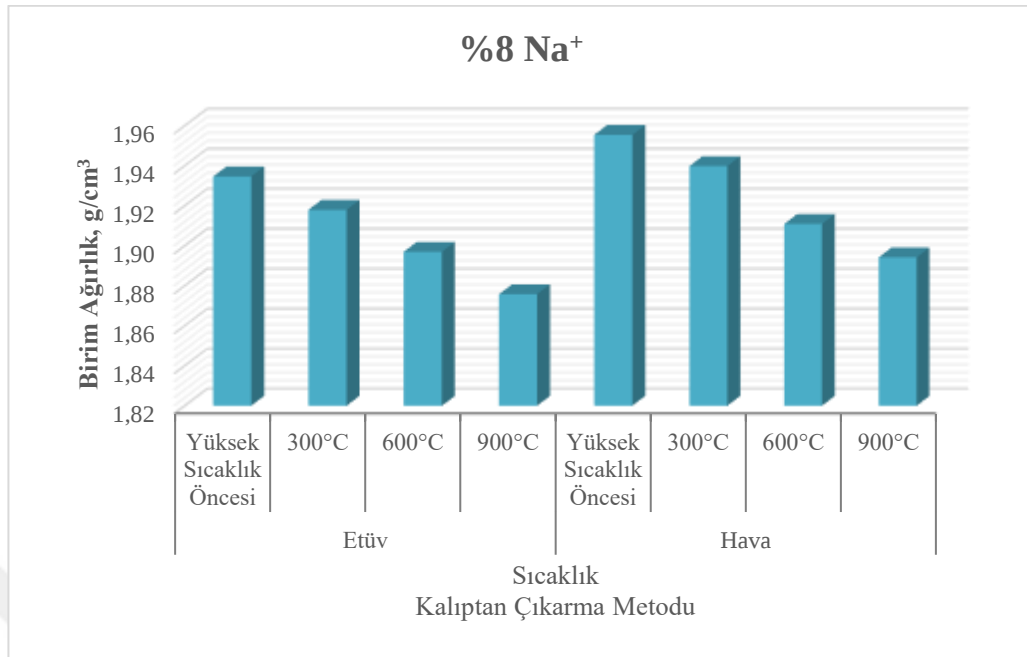
Şekil 3.6 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası görüntüleri

3.6.1 Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinin Ardından Birim Ağırlığın Değerlendirilmesi

Kür sürecini tamamlayan numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılmalarının ardından ağırlıkları hassas terazide ölçülerek geometrik boyutlarına bölünmüş ve birim ağırlıkları yaklaşık olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler Tablo 3.7 ve Şekil 3.7’de sunulmuştur.

Tablo 3.7 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin birim ağırlık deneyi sonuçları

Kalıptan Çıkarma Metodu	Etüv				Hava			
	Yüksek Sıcaklık Öncesi	300°C	600°C	900°C	Yüksek Sıcaklık Öncesi	300°C	600°C	900°C
8%	1,93	1,92	1,90	1,88	1,96	1,94	1,91	1,89



Şekil 3.7 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin birim ağırlık deneyi sonuçları

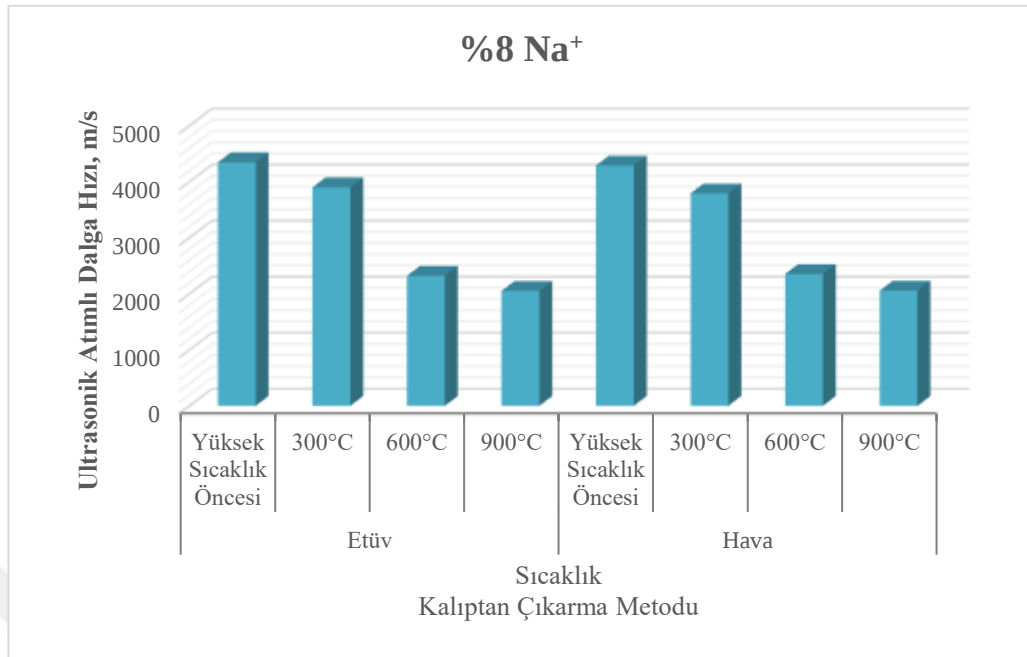
Yüksek sıcaklığa dayanıklılık tayini deneyinin sonucunda elde edilen veriler, numunelerin birim ağırlıklarının maruz bırakılan sıcaklığın artışıyla kademeli olarak düşüş yaşandığını göstermiştir. Yaşanan düşüş, yüksek sıcaklık sonucunda numunelerin iç yapısında meydana gelen bozulmayla çatlak ve boşlukların miktarının artmasıyla açıklanmaktadır.

3.6.2 Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinin Ardından Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Değerlendirilmesi

Numunelerin birim ağırlıklarının belirlenmesinin ardından Pundit cihazı ile ultrasonik dalga hızları belirlenmiştir. Elde edilen veriler Tablo 3.8 ve Şekil 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi sonuçları

Kalıptan Çıkarma Metodu	Etüv				Hava			
Sıcaklık (°C)	Yüksek Sıcaklık Öncesi	300°C	600°C	900°C	Yüksek Sıcaklık Öncesi	300°C	600°C	900°C
8%	4348	3899	2321	2051	4290	3791	2354	2057



Şekil 3.8 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi sonuçları

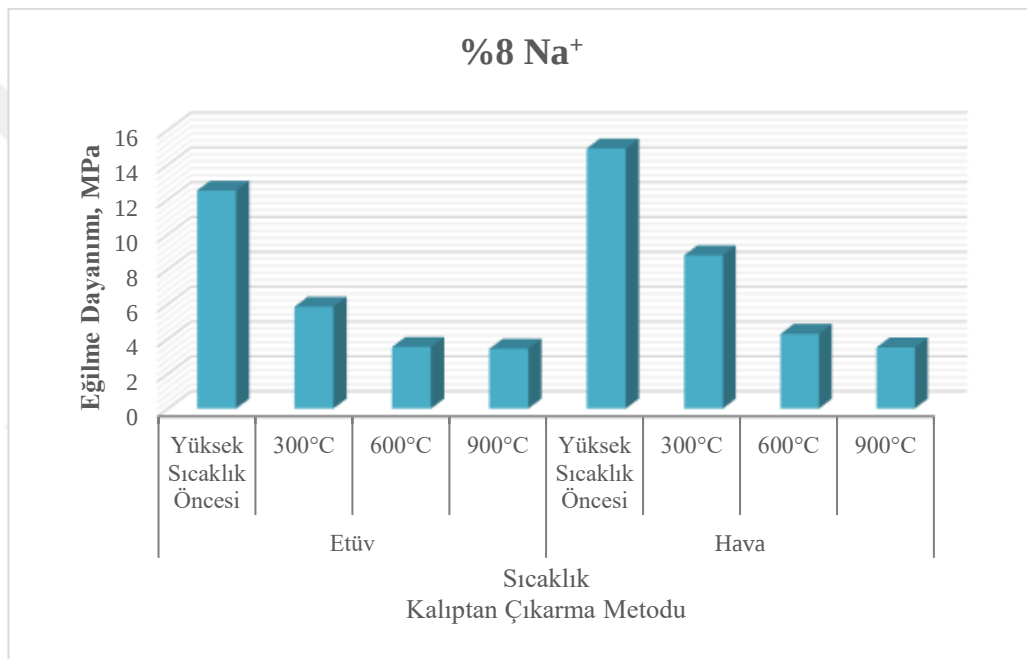
Yüksek sıcak maruziyeti sonrasında gerçekleştirilen ultrasonik atımlı dalga hızı deneyinden elde edilen veriler, numunelerin maruz kaldığı sıcaklığın artmasıyla ultrasonik dalga hızının düştüğünü göstermektedir. Düşüş tüm sıcaklıklarda yaşanmış fakat 300°C sıcaklıkta 600°C ve 900°C sıcaklıklara nispeten daha yüksek ve yüksek sıcaklık öncesi değerlere yakın bir ultrasonik dalga hızı izlenmiştir. Sıcaklığın artışıyla ultrasonik dalga hızının düşmesi, iç yapının bozulmasına bağlı olarak meydana gelen çatlak ve boşluk miktarlarının artması ile açıklanmaktadır.

3.6.3 Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinin Ardından Eğilme Dayanımının Değerlendirilmesi

Yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra birim ağırlıkları ve ultrasonik atımlı dalga hızları belirlenen numunelerin bu deneylerin ardından eğilme dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen veriler Şekil 3.9 ve Tablo 3.9'da sunulmuştur.

Tablo 3.9 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımı deneyi sonuçları

Kalıptan Çıkarma Metodu	Etüv				Hava			
Sıcaklık (°C)	Yüksek Sıcaklık Öncesi	300°C	600°C	900°C	Yüksek Sıcaklık Öncesi	300°C	600°C	900°C
8%	12,52	5,85	3,54	3,44	14,94	8,81	4,29	3,51



Şekil 3.9 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımı deneyi sonuçları

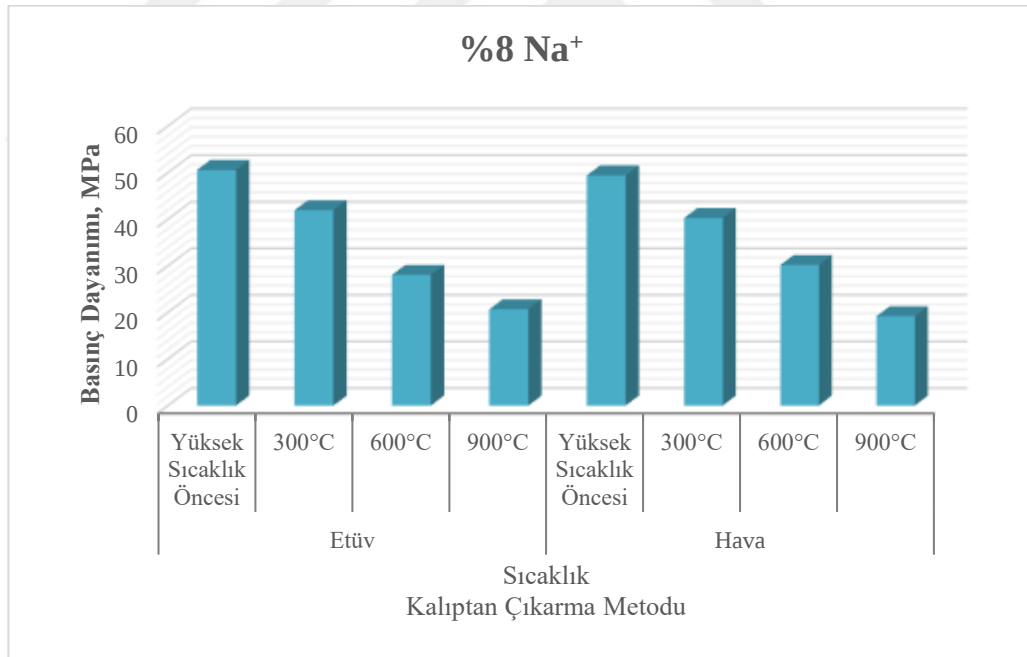
Elde edilen verilere göre yüksek sıcaklığa dayanıklılık tayini deneyi kapsamında numunelerin maruz bırakıldığı tüm sıcaklıklar etkisinde trajik bir düşüş yaşanmıştır. Yaşanan düşüş, yüksek sıcaklık etkisiyle moleküller arası bağların zayıflaması ve bunun neticesinde iç yapının hasar görmesiyle ilişkilendirilmektedir.

3.6.4 Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinin Ardından Basınç Dayanımının Değerlendirilmesi

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler son olarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen veriler Şekil 3.10 ve Tablo 3.10’da sunulmuştur.

Tablo 3.10 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları

Kalıptan Çıkarma Metodu	Etüv				Hava			
Sıcaklık (°C)	Yüksek Sıcaklık Öncesi	300°C	600°C	900°C	Yüksek Sıcaklık Öncesi	300°C	600°C	900°C
8%	50,58	41,94	28,06	20,68	49,4	40,27	30,19	19,18



Şekil 3.10 Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı deneyi sonuçları

Yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra gerçekleştirilen deneylerden sonuncusu olan basınç dayanımı deneyinden elde edilen veriler, tüm sıcaklıklarda basınç dayanımı kaybı yaşandığını ortaya koymuştur. Yaşanan dayanım kaybı, yüksek sıcaklık etkisinde moleküller arası bağların zayıflaması/kopması sonucunda iç yapının zayıflaması ile

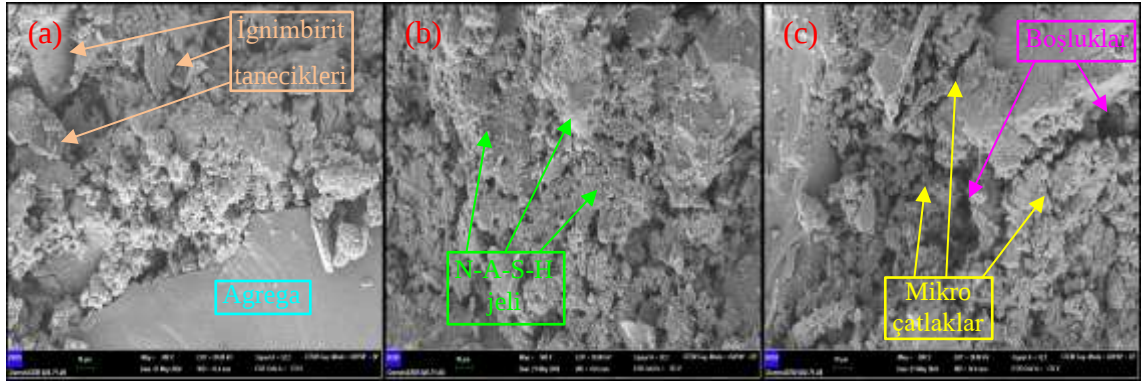
açıklanmaktadır. Etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 300, 600 ve 900°C sıcaklıklarda yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler; yüksek sıcaklık öncesine göre sırasıyla %17, %45 ve %59 dayanım kaybederken havada bekletilerek kalıptan çıkması sağlanan numuneler yüksek sıcaklık öncesine göre %18, %39 ve %61 dayanım kaybetmiştir.

3.7 İç Yapı Analizleri

Dayanım ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneylerinin tamamlanmasının ardından numunelerin morfolojik özellikleri araştırılmıştır. Üretilip kür sürecini tamamlayan numuneler küçültülerek FESEM cihazı için uygun boyutlara getirilmiş ve iç yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda %8 oranında Na⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarılan numune grubundan 1, 4 ve 7 gün boyunca 75°C sıcaklıkta küre tabi tutulan numuneler ile aynı metotla kalıptan çıkarılıp 50, 75 ve 100°C sıcaklıkta 4 gün kür edilen numunelerin SEM görüntüleri incelenmiştir. Ayrıca havada bekletilerek kalıptan çıkarılan numune grubundan 1, 4 ve 7 gün boyunca 75°C sıcaklıkta küre tabi tutulan numunelerin EDX analizleri de gerçekleştirilmiştir.

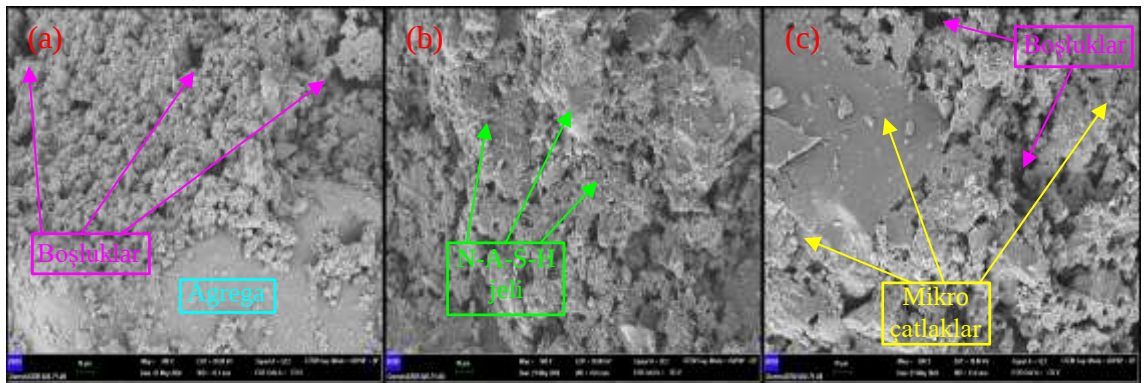
3.7.1 FESEM Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Elde edilen FESEM görüntüleri numunelerin iç yapılarındaki gözeneklilik, mikro çatlaklar ve yoğunluk durumlarına göre değerlendirilmiştir. Şekil 3.11'de a, b ve c harfleriyle belirtilen görseller; %8 oranında Na⁺ içerip havada bekletilerek kalıptan çıkarılan ve sırasıyla 1, 4 ve 7 gün boyunca 75°C sıcaklıkta kür edilen numunelere aitken Şekil 3.12'de a, b ve c harfleriyle belirtilen görseller ise aynı oranda Na⁺ içerip aynı metotla kalıptan çıkarılan ve 4 gün boyunca sırasıyla 50, 75 ve 100°C sıcaklıkta kür edilen numunelere aittir.



Şekil 3.11 %8 oranında Na^+ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 75°C’de kür edilen numuneler, (a) 1 gün ısıt kür, (b) 4 gün ısıt kür, (c) 7 gün ısıt kür

%8 oranında Na^+ içirip havada bekletilerek kalıptan çıkarılan; 1, 4 ve 7 gün boyunca 75°C sıcaklıkta kür edilen Şekil 3.11’deki numunelerden 1 gün kür edilen numunede (a) diğerlerine kıyasla sayıca daha fazla ve daha büyük boyutlarda boşluk ile yetersiz ısıt kür nedeniyle dağınık ve boşluklu bir iç yapı görüntüsü hakimdir. 4 gün kür edilen numune (b) ile 7 gün kür edilen numune (c) ise iç yapı görünümü olarak birbirlerine benzemekte ve 1 gün kür edilen numuneye kıyasla daha yoğun ve daha az boşluklu bir iç yapı görüntüsüne sahiptirler. Bu iki numunenin iç yapısı benzer olsa da basınç dayanımı farkının, aşırı ısıt kürün bağlayıcı fazda gevrekleşme ve kırılgenlik oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sonuçlar optimum kür süresinin 75°C sıcaklık için en yüksek dayanıma ulaşıp henüz gevrekleşmenin başlamadığı 4 gün olduğunu, fazla ısıt kür maruziyetinin ise basınç dayanımlarında düşüşe yol açabileceğini göstermektedir.



Şekil 3.12 %8 oranında Na^+ içeren ve etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün kür edilen numuneler, (a) 50°C ısıt kür, (b) 75°C ısıt kür, (c) 100°C ısıt kür

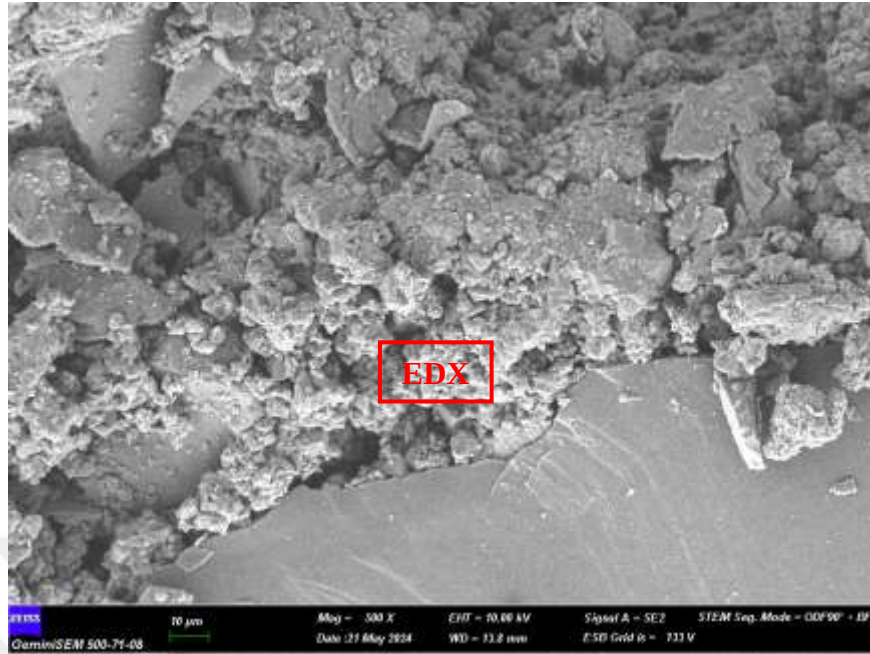
%8 oranında Na^+ içerip havada bekletilerek kalıptan çıkarılan; 4 gün boyunca 50, 75 ve 100°C sıcaklıkta kür edilen Şekil 3.12'deki numunelerden 50°C 'de kür edilen numune (a) diğer numunelere göre daha yüksek boşluk oranına sahiptir. Aynı kür süresine rağmen meydana gelen bu fark, kür sıcaklığının düşüklüğünün geopolimerizasyon reaksiyonlarının hızını azalttığını düşündürmektedir. 75°C 'de kür edilen numune (b), 4 gün ısıl küre maruz bırakılan numuneler arasında en kompakt iç yapı görüntüsüne sahip olmasının yanı sıra diğer numunelerden daha az boşluk ve mikro çatlak barındırmaktadır. 100°C 'de kür edilen numunede (c) de iç yapı, oldukça yoğun bir görünüme sahip olsa da yüksek sıcaklık etkisiyle matriste gevrekleşme ve mikro çatlaklar meydana gelmiştir. Bu durum basınç dayanımında düşüşler olmasına sebep olabilmektedir.

3.7.2 EDX Analizlerinin Değerlendirilmesi

%8 oranında Na^+ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarılan numune grubundan 1, 4 ve 7 gün boyunca 75°C 'de küre tabi tutulan numunelerin FESEM görüntüleri elde edildikten sonra EDX analizleri de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen EDX analizleri değerlendirilirken geopolimerizasyon ürünü olan matris içeriğini yansıtan elementel kompozisyon zenginliği irdelenmiştir. Silisyum ve alüminyum atomlarının sodyum iyonlarıyla gerçekleştirdiği geopolimerizasyon reaksiyonlarının oksijen köprüleriyle bağlandığı bilinmektedir [31]. Oksijen miktarının gerçekleşen geopolimerizasyon reaksiyonlarının yoğunluğu hakkında fikir verebileceği düşünülmektedir. Gerçekleştirilen EDX analizleri ve FESEM görüntüleri aşağıda gösterilmiştir.

3.7.2.1 75°C 'de 1 Gün Kür Edilen Numunelerin EDX Analizlerinin Değerlendirilmesi

%8 oranında Na^+ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 gün 75°C 'de küre tabi tutulan numunenin FESEM görüntüsü Şekil 3.13'te ve EDX analizi Tablo 3.11'de sunulmuştur.



Şekil 3.13 %8 oranında Na^+ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 gün 75°C 'de kür edilen numunenin FESEM görüntüsü

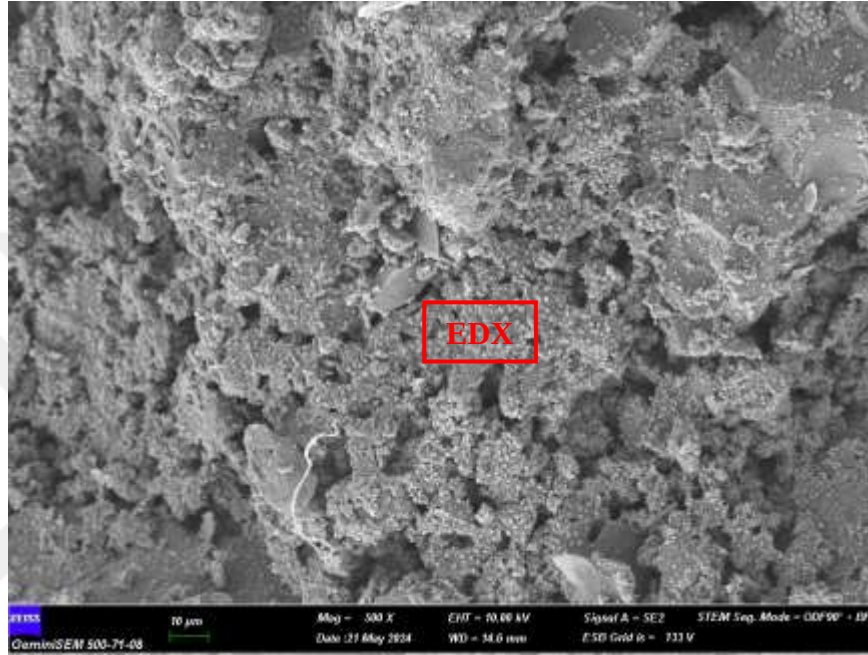
Tablo 3.11 %8 oranında Na^+ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 gün 75°C 'de kür edilen numunenin EDX analizi

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
O K	42,93	56,85	1584,73
NaK	9,89	9,12	542,77
AlK	8,22	6,46	897,03
SiK	31,41	23,70	3736,19
K K	4,45	2,41	396,26
CaK	1,98	1,04	153,99
FeK	1,11	0,42	53,39

Diğer 2 numuneye kıyasla daha düşük olan oksijen ve sodyum oranları, geopolimerizasyon reaksiyonlarının tamamlanmadığını düşündürmektedir. Sonuçlar FESEM görüntüsü ve basınç dayanımı deneyleriyle örtüşmektedir.

3.7.2.2 75°C’de 4 Gün Kür Edilen Numunelerin EDX Analizlerinin Değerlendirilmesi

%8 oranında Na⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün 75°C’de küre tabi tutulan numunenin FESEM görüntüsü Şekil 3.14’te ve EDX analizi Tablo 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.14 %8 oranında Na⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün 75°C’de kür edilen numunenin FESEM görüntüsü

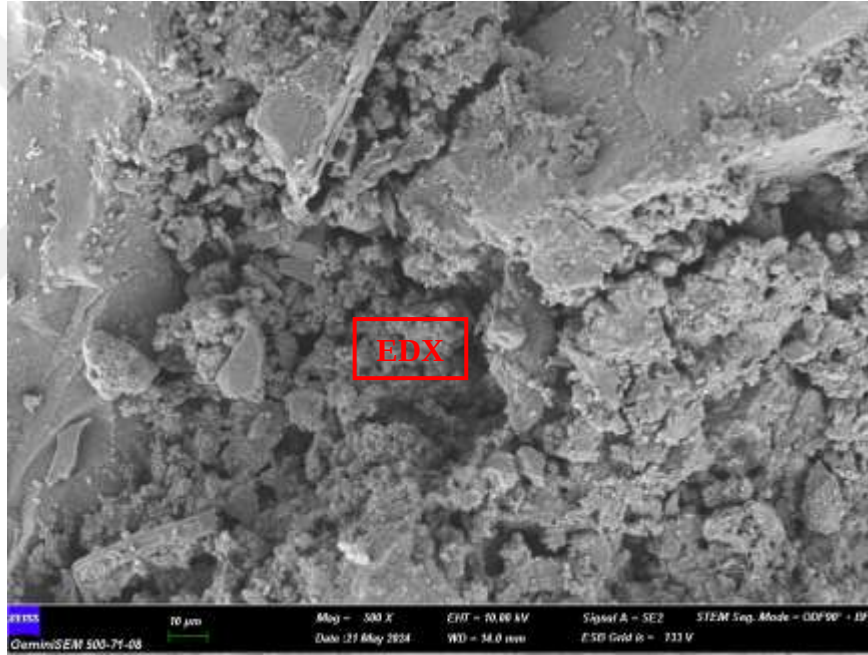
Tablo 3.12 %8 oranında Na⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün 75°C’de kür edilen numunenin EDX analizi

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
O K	44,60	58,13	1531,14
NaK	11,69	10,6	539,35
AlK	6,43	4,97	574,57
SiK	31,74	23,56	3195,78
K K	3,24	1,73	242,2
CaK	1,03	0,54	68,05
FeK	1,28	0,48	51,86

Diğer 2 numuneye kıyasla daha yüksek olan oksijen, sodyum ve silisyum oranları geopolimerizasyon reaksiyonları için optimum kür süresinin 4 gün olduğu kanısını desteklemektedir. Sonuçlar FESEM görüntüsü ve basınç dayanımı deneyleriyle örtüşmektedir.

3.7.2.3 75°C’de 7 Gün Kür Edilen Numunelerin EDX Analizlerinin Değerlendirilmesi

%8 oranında Na⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 gün 75°C’de küre tabi tutulan numunenin FESEM görüntüsü Şekil 3.15’te ve EDX analizi Tablo 3.13’te sunulmuştur.



Şekil 3.15 %8 oranında Na⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 gün 75°C’de kür edilen numunenin FESEM görüntüsü

Tablo 3.13 %8 oranında Na⁺ içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 7 gün 75°C’de kür edilen numunenin EDX analizi

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.
O K	43,16	57,49	416,24
NaK	10,15	9,41	136,73
AlK	7,11	5,62	193,49
SiK	29,89	22,68	909,09
K K	6,00	3,27	137,75
CaK	0,79	0,42	15,68
FeK	2,90	1,11	35,51

Oksijen ve sodyum oranlarının basınç dayanımı değerlerinde olduğu gibi 1 ve 4 günlük numune arasında bulunması mekanik deneyler ile örtüşmektedir. Bu sonuçlar da FESEM görüntüleriyle örtüşmektedir.

3.8 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi Sonuçları

Çalışma kapsamında, üç farklı harç karışımı seçilerek geleneksel portland çimentolu ve ignimbirit bazlı geopolimer harçların çevresel etkileri belirlenmiştir. Harç karışımlarında çevresel etki kategorileri, 1 m³/MPa harç için beşikten kapıya yaklaşımı dikkate alınarak CML-IA temel yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bu yöntem 11 çevresel etki kategorisini (AD, AD-FF, GWP, ODP, HT, FAE, MAE, TE, PO, AP ve EP) içermektedir. Seçilen karışımlar çimentolu ve geopolimer harçlar arasındaki çevresel etki farklarını ölçmüş ve kür prosesinin geopolimer harçlar üzerindeki etkisini ele almıştır.

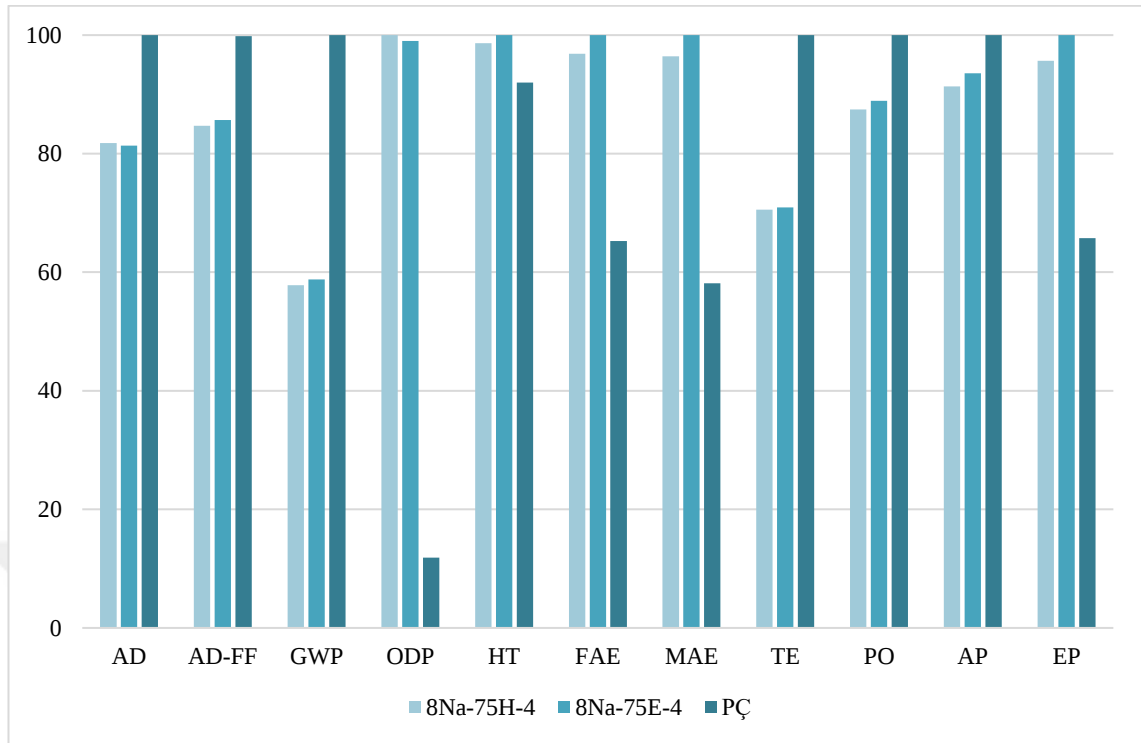
Portland çimentolu geleneksel harcın (PÇ) GWP değeri 1,90E+01 ve ignimbirit bazlı geopolimer harçların (8Na-75E-4 ve 8Na-75H-4) GWP değerleri ise sırasıyla 1,12E+01 ve 1,10E+01 kg CO₂ eq olarak hesaplanmıştır. Bu bulgulara göre, ignimbirit bazlı geopolimer harçların GWP’si %43’e varan bir azalma göstermiştir.

AD, AD-FF, ODP, HT, FAE, MAE, TE, PO, AP ve EP etki kategorilerinde çimentolu harcın değerleri sırasıyla 5,31E-05 kg Sb eq , 1,58E+02 MJ, 1,29E-07 kg CFC-11 eq, 6,02E+00 kg 1,4-DB-eq, 3,06E+00 kg 1,4-DB-eq, 7,33E+03 kg 1,4-DB-eq, 5,20E-02 kg

1,4-DB-eq, 2,48E-03 kg C₂H₄ eq, 5,54E-02 kg SO₂ eq, 1,44E-02 kg PO₄ eq olarak hesaplanmıştır. İgnimbirit bazlı geopolimer harç numunelerinden etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılan, kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün boyunca 75°C etüvde kür edilen harç numunesi (8Na-75E-4) ise diğer etki kategorilerinde sırasıyla 4,32E-05 kg Sb eq, 1,35E+02 MJ, 1,08E-06 kg CFC-11 eq, 6,55E+00 kg 1,4-DB-eq, 4,68E+00 kg 1,4-DB-eq, 1,26E+04 kg 1,4-DB-eq, 3,69E-02 kg 1,4-DB-eq, 2,21E-03 kg C₂H₄ eq, 5,18E-02 kg SO₂ eq, 2,19E-02 kg PO₄ eq olarak hesaplanmıştır. Havada bekletilerek kalıptan çıkarılan ve kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün boyunca 75°C etüvde kür edilen harç numunesinde (8Na-75H-4) ise 4,34E-05 kg Sb eq, 1,34E+02 MJ, 1,09E-06 kg CFC-11 eq, 6,46E+00 kg 1,4-DB-eq, 4,54E+00 kg 1,4-DB-eq, 1,22E+04 kg 1,4-DB-eq, 3,66E-02 kg 1,4-DB-eq, 2,17E-03 kg C₂H₄ eq, 5,06E-02 kg SO₂ eq, 2,09E-02 kg PO₄ eq olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.14 PÇ ve ignimbirit bazlı geopolimer harçların YDD sonuçları

Etki Kategorisi	Birim	PÇ	8Na-75E-4	8Na-75H-4
AD	kg Sb eq	5,31E-05	4,32E-05	4,34E-05
AD-FF	MJ	1,58E+02	1,35E+02	1,34E+02
GWP	kg CO ₂ eq	1,90E+01	1,12E+01	1,10E+01
ODP	kg CFC-11 eq	1,29E-07	1,08E-06	1,09E-06
HT	kg 1,4-DB-eq	6,02E+00	6,55E+00	6,46E+00
FAE	kg 1,4-DB-eq	3,06E+00	4,68E+00	4,54E+00
MAE	kg 1,4-DB-eq	7,33E+03	1,26E+04	1,22E+04
TE	kg 1,4-DB-eq	5,20E-02	3,69E-02	3,66E-02
PO	kg C ₂ H ₄ eq	2,48E-03	2,21E-03	2,17E-03
AP	kg SO ₂ eq	5,54E-02	5,18E-02	5,06E-02
EP	kg PO ₄ eq	1,44E-02	2,19E-02	2,09E-02



Şekil 3.16 Portland çimentolu ve ignimbirit bazlı geopolimer harçların YDD sonuçlarının karşılaştırılması

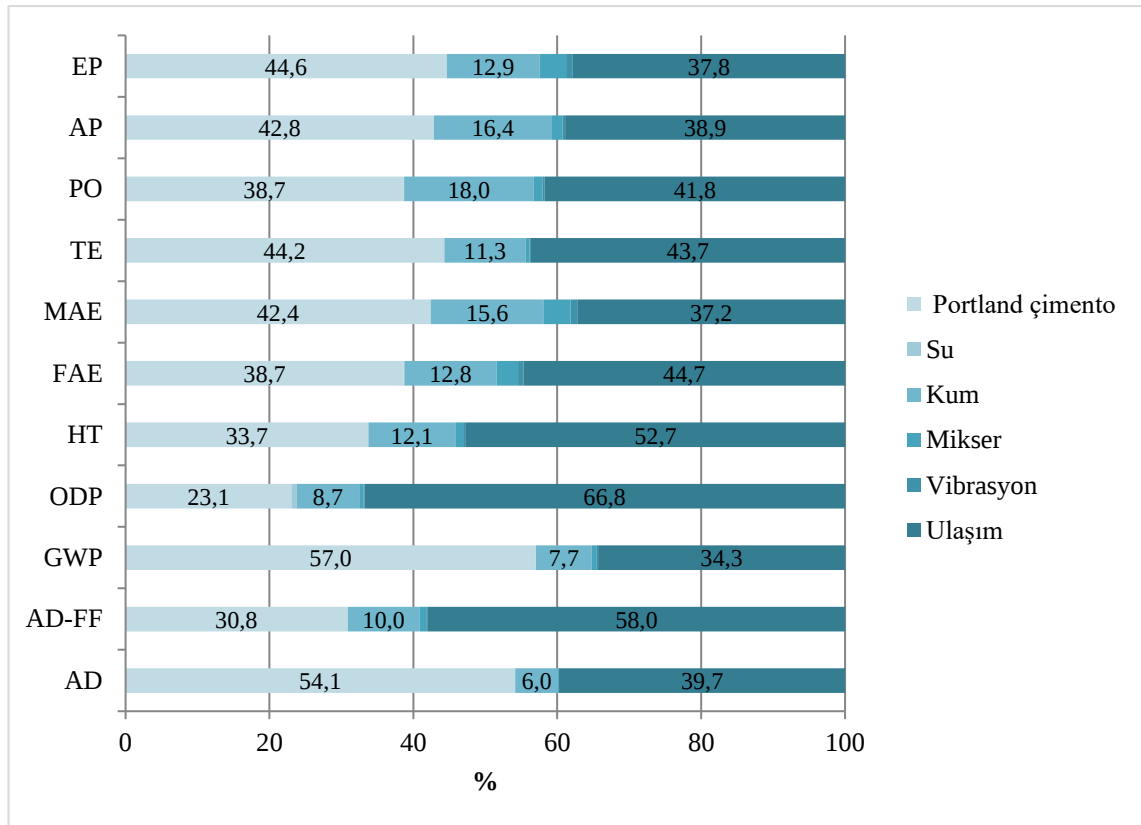
Şekil 3.16 ve Tablo 3.14’te de görüldüğü üzere YDD sonuçlarının karşılaştırılmasında çevresel etki kategorileri incelendiğinde ignimbirit bazlı geopolimer harçlar AD, AD-FF, TE, PO ve AP kategorilerinde çimentolu PÇ harcına göre daha iyi çevresel performanslar sergilemişlerdir. İgnimbirit bazlı 8Na-75E-4 ve 8Na-75H-4 harçları çimentolu PÇ harcına kıyasla yaklaşık %19 daha düşük AD değerine sahiptir. Bu geopolimer numunelerin doğal kaynak kullanımında daha sürdürülebilir bir seçenek olduğunu göstermiştir. İgnimbirit bazlı geopolimer harçların AD-FF etki kategorisine göre enerji tüketimleri çimentolu PÇ harcına göre %15 daha azdır. Bu nedenle geopolimer harçlar fosil yakıt kullanımının azaltılmasında daha etkilidir. TE, PO ve AP etki kategorilerinde ise ignimbirit bazlı geopolimer harçlar çevresel etkileri PÇ harcına göre sırasıyla yaklaşık %30, %13 ve %9 oranında azaltmıştır.

ODP, EP, FAE, MAE ve HT etki kategorilerinde YDD sonuçlarına göre ignimbirit bazlı geopolimer harçlar çimentolu PÇ harcına göre daha kötü çevresel performanslar sergilemişlerdir. PÇ harcının ozon tabakasına zarar (ODP) potansiyeli ignimbirit bazlı geopolimer harçlar göre yaklaşık %88 daha azdır. EP etki kategorisinde ignimbirit bazlı geopolimer harçların ötrofikasyon potansiyeli çimentolu PÇ harcından yaklaşık %52

daha fazla hesaplanmıştır. Bu da su kaynaklarında besin zenginleşmesi riskini artırabileceğini göstermektedir. FAE, MAE ve HT etki kategorilerinde ise ıgımbirit bazlı geopolimer harçlar PÇ harcına göre sırasıyla yaklaşık %53, %72 ve %9 oranında çevresel etkileri artırmıştır.

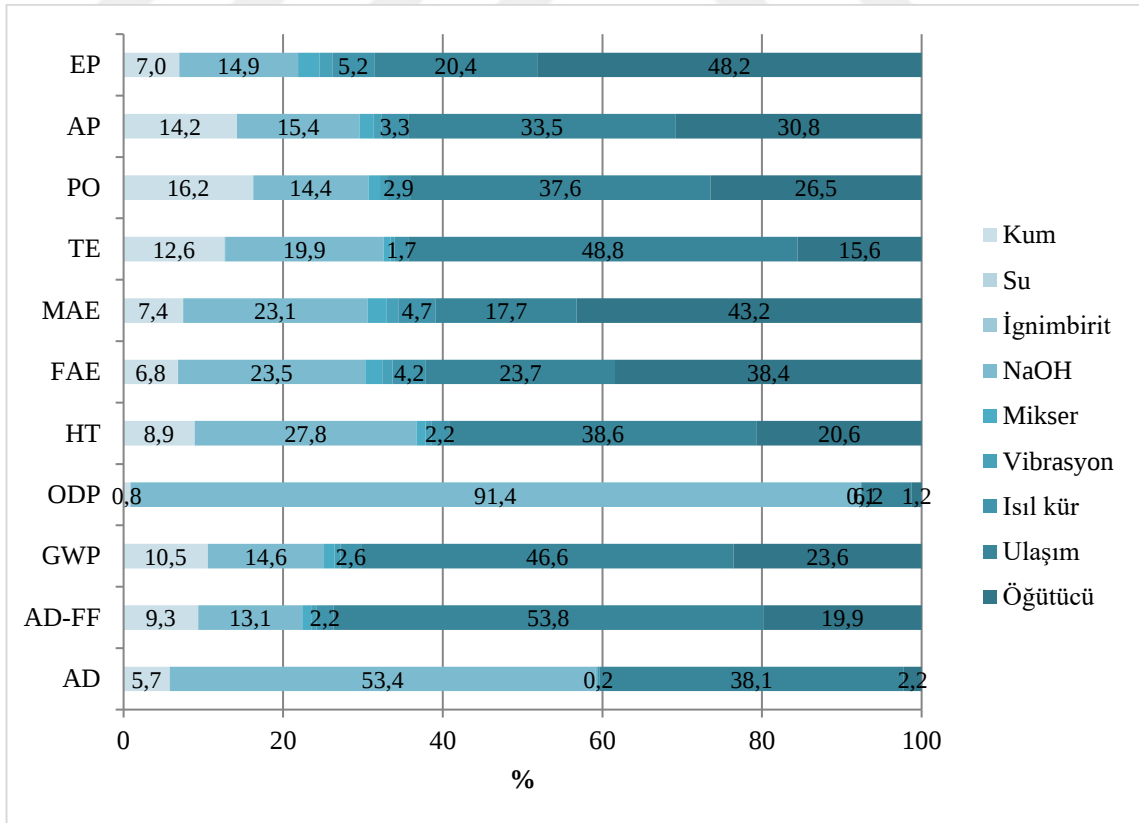
Çimentolu harç PÇ ve ıgımbirit bazlı geopolimer harçlar için çevresel etkilerin alt bileşenlere göre dağılımı ise Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19’da verilmiştir.

Şekil 3.17’de görüldüğü gibi çimentolu PÇ harcının YDD sonuçlarına göre en yüksek çevresel etkinin çimentodan kaynaklandığı görülmüştür. Çimento tüm çevresel etki kategorilerinde %23,1-57 arasında payla en fazla katkıyı sağlamıştır. Özellikle AD ve GWP kategorilerine yüksek katkı sağlamıştır. PÇ harcı üretiminde diğer önemli çevresel etkiler ulaşım ve kum kaynaklı olmuştur. Ulaşım %34,3-66,8 arasında payla tüm çevresel etki kategorilerine katkıda bulunurken kum ise %6-18 arasında payla katkıda bulunmuştur. PÇ harcı üretiminde hammadde ve ulaşım kaynaklı çevresel etkiler dışında diğer süreçlerin katkısı daha düşük olmuştur.



Şekil 3.17 PÇ harç numunesinin çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı

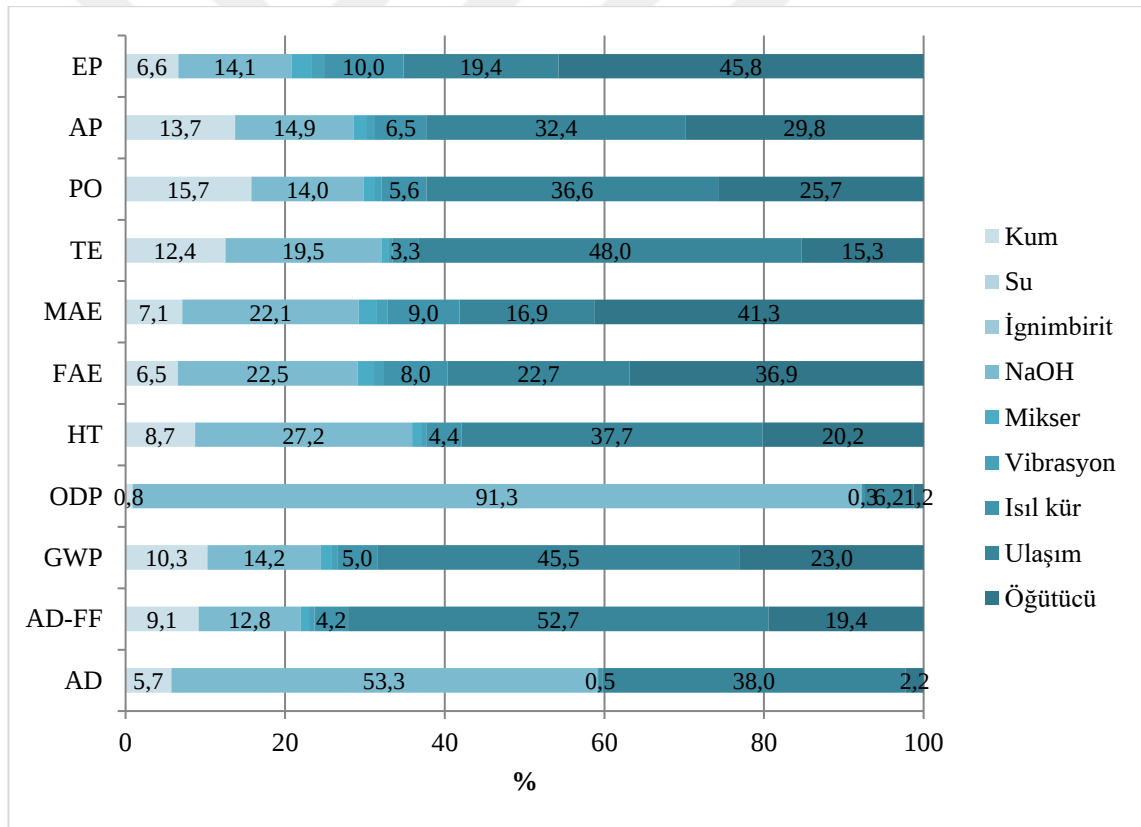
Havada bekletilerek kalıptan çıkarılan ve kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün boyunca 75°C etüvde kür edilen harç numunesinin (8Na-75H-4) çevresel etkilerinin alt bileşenlerine göre dağılımı Şekil 3.18’de gösterilmiştir. İgnimbirit bazlı 8Na-75H-4 harç numunesinin YDD sonuçları en yüksek çevresel etkilerin NaOH, ulaşım ve öğütücüden kaynaklandığını ortaya koymuştur. NaOH, %13,1-91,4 arasında payla çevresel etki kategorilerine katkıda bulunmuştur. ODP çevresel etki kategorisine en yüksek etkiyi NaOH (%91,4) yapmıştır. 8Na-75H-4 harç numunesine bir diğer önemli katkı ulaşım kaynaklı olmuştur. Hammadde taşımacılığı %6,2-53,8 arasında payla tüm çevresel etki kategorilerine büyük oranda katkıda bulunmuştur. Geopolimer harç karışımlarında kullanılan ignimbirit taşları öğütülerek kullanıldığı için önemli bir çevresel yükte öğütme prosesinden kaynaklanmıştır (%1,2-48,2). Harç üretim prosesinde yer alan ısıl kür, mikserle karıştırma ve vibrasyon gibi süreçlerin katkısı daha az çevresel yüke sebep olmuştur.



Şekil 3.18 8Na-75H-4 harç numunesinin çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı

İğnimbirit bazlı geopolimer harç numunelerinden etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılan, kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün boyunca 75°C etüvde kür edilen harç numunesinin (8Na-75E-4) çevresel etkilerinin alt bileşenlerine göre dağılımı ise Şekil 3.19’da gösterilmiştir. İğnimbirit bazlı 8Na-75H-4 harç numunesine benzer olarak 8Na-75E-4 numunesinde de en yüksek çevresel yükleri NaOH, ulaşım ve öğütücü oluşturmıştır.

NaOH, %12,8-91,3 arasında payla çevresel etki kategorilerine katkıda bulunurken, ulaşım ve öğütücü kaynaklı çevresel etkiler sırasıyla %6,2-52,7 ve %1,2-45,8 paya sahip olmuştur. Yine 8Na-75H-4 geopolimer harç numunesine benzer olarak harç üretim prosesinde yer alan ısıl kür, mikserle karıştırma ve vibrasyon gibi süreçlerin katkısı daha az çevresel yüke sebep olmuştur.



Şekil 3.19 8Na-75E-4 harç numunesinin çevresel etkilerinin alt bileşenlere göre dağılımı

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar çalışmasında ilk olarak numuneler üretilmiş ve kalıptan çıkarılan numuneler üzerinde dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dayanım deneylerinden edinilen veriler doğrultusunda en iyi sonuçların elde edildiği numune grupları belirlenmiş, bu numune grupları yeniden üretilip kür süreçleri tamamlandıktan sonra yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyi ve iç yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmaları ve deneysel süreç sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

4.1.1 İşlenebilirlik Deneyinden Edinilen Sonuçlar

- İşlenebilirlik deneyinden elde edilen veriler artan aktivatör miktarının harç karışımının işlenebilirlik değerlerinde artış sağladığını göstermektedir. %8 oranında Na^+ içeren harç karışımının işlenebilirlik değerinin %4 oranında Na^+ içeren karışıma göre yaklaşık %7 daha fazla olduğu gözlenmiştir.

4.1.2 Birim Ağırlık Deneyinden Edinilen Sonuçlar

- Üretilen ve kür süreçleri tamamlanan tüm numuneler arasında en yüksek birim ağırlık değeri $2,05 \text{ g/cm}^3$ ile havada bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 gün 50°C etüvde kür edilen numuneye aitken en düşük birim ağırlık değeri ise $1,87 \text{ g/cm}^3$ ile etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılan ve ardından 7 gün boyunca 100°C etüvde kür edilen numuneye aittir. En düşük ve en yüksek birim ağırlık değerlerinin aynı aktivatör oranına sahip numune gruplarında saptanması,

kullanılan aktivatör miktarının numunelerin birim ağırlık değerleri üzerinde kayda değer bir etki teşkil etmediğini ortaya koymuştur.

- 2,05 g/cm³ ile en yüksek birim ağırlık değerine sahip olan numune, havada bekletilip kalıptan çıkarıldıktan sonra 1 gün 50°C etüvde kür edilmesine karşılık geopolimerizasyon reaksiyonları için yeterli ısı küre henüz maruz kalamamıştır. Diğer dayanım deneylerinden elde edilen sonuçlar da numunenin henüz tam anlamıyla priz almadığını ve dayanım kazanmadığını göstermektedir.

4.1.3 Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyinden Edinilen Sonuçlar

- Üretilen geopolimer harç numuneleri arasında en yüksek ultrasonik dalga hızına sahip olan numune 4317 m/s hızla %8 Na⁺ içerip etüvde bekletilerek kalıptan çıkması beklenen ve kalıptan çıktıktan sonra 100°C etüvde 4 gün kür edilen karışım olurken en düşük ultrasonik dalga hızına sahip olan numune 2930 m/s hızla %4 Na⁺ içerip etüvde bekletilerek kalıptan çıkarılan ve kalıptan çıktıktan sonra 100°C etüvde 7 gün kür edilen karışım olmuştur.
- Elde edilen sonuçlara göre; optimum süreye ulaşılan kadar uygulanan ısıl kür ile ultrasonik dalga hızlarında artış elde edildiğini, optimum kür miktarından daha fazla ısıl kür uygulanmasının ise numunelerin iç yapısında bozulmalar meydana getirerek ultrasonik dalga hızlarının düşmesine neden olduğu değerlendirilmiştir.
- Artan aktivatör miktarı, numunelerin ultrasonik dalga hızlarını artırmaktadır.
- Numuneler üretildikten sonra uygulanan 2 farklı kalıptan çıkarma metodunun numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızları üzerinde kayda değer bir etki oluşturmadığı belirlenmiştir.
- Isıl kür sıcaklığı, numune gruplarının ulaşabildikleri en yüksek dalga hızları üzerinde ciddi bir etki yaratmamış olup en yüksek dalga hızına kaçınıcı günde ulaşıldığının saptanmasında belirleyici unsur olmuştur.

4.1.4 Eğilme Dayanımı Deneyinden Edinilen Sonuçlar

- Eğilme dayanımı deneyi sonucunda üretilen tüm numuneler arasında en düşük ve en yüksek eğilme dayanımı değerleri (0,74 ve 16,03 MPa) %8 Na⁺ sodyum içeren ve havada bekletilerek kalıptan çıkarılan numune grubuna aittir. Bu sonuçlar eğilme dayanımı değerinin özellikle numunelerin maruz bırakıldığı ısıl kürün

sıcaklığı ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı sıcaklıkta (50°C) kür edilen numuneler ise kendi grupları içinde değerlendirildiğinde eğilme dayanımının 1. günden 6. güne kadar yaklaşık 18 kat artabildiği deneyimlenmiştir.

- Numunelerin aktivatör oranındaki artış, beklendiği üzere eğilme dayanımlarına da pozitif yönde etki etmiştir.

4.1.5 Basınç Dayanımı Deneyinden Edinilen Sonuçlar

- Basınç dayanımı deneyinden elde edilen sonuçlarda en düşük dayanım 0,37 MPa ile havada bekletilerek kalıptan çıkarılan ve 50°C sıcaklıkta 1 gün kür edilen numuneye aittir. Numunenin fiziksel muayenesinde uygulanan ısıl kürün geopolimerizasyon reaksiyonlarını sürdürmek için yeterli olmadığı anlaşılmıştır. Aynı numune grubundan 6. gün sonunda elde edilen basınç dayanımı değerinin 49,03 MPa olması da bu durumu destekler niteliktedir.
- Numunelerin kalıptan çıkarılmasında kullanılan iki farklı metodun numunelerin basınç dayanımları üzerinde kayda değer bir farklılık oluşturmadığı görülmüştür.
- Artan aktivatör oranının numunelerin basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkisi bariz şekilde ortaya koyulmuştur.

4.1.6 Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyinden Edinilen Sonuçlar

- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık tayini deneyi kapsamında gerçekleştirilen değerlendirmelere göre tüm yüksek sıcaklık değerlerinde numunelerin iç yapı bozulması etkisiyle birim ağırlık, ultrasonik dalga hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımlarında yüksek sıcaklık öncesi değerlere göre trajik bir düşüş saptanmıştır.
- Etüvde bekletilerek kalıptan çıkarıldıktan sonra 300, 600 ve 900°C sıcaklıklarda yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımlarında yüksek sıcaklık öncesine göre sırasıyla %17, %45 ve %59 kayıp yaşanırken bu kayıp havada bekletilerek kalıptan çıkması sağlanan numunelerde sırasıyla %18, %39 ve %61 olmuştur.

4.1.7 İç Yapı Analizlerinden Edinilen Sonuçlar

- İç yapı analizleri kapsamında değerlendirilen FESEM görüntülerine göre en iyi dayanımların elde edildiği 75°C sıcaklıkta 1 gün ısıtılma uygulanan numunede yetersiz ısıtılma nedeniyle matrisin diğer numunelere göre henüz kompakt bir forma ulaşmadığı, en iyi dayanımın elde edildiği 4. günden sonra ise ısıtılma etkisiyle bağlayıcı fazda gevreklemeler meydana gelerek mekanik özelliklerinin negatif etkilendiği sonucuna varılmıştır.
- Yine FESEM görüntülerine göre 50°C sıcaklıkta 4 günlük ısıtılma matris oluşumu ve sıkışması için yetersiz kaldığı, 100°C sıcaklıkta 4 günlük ısıtılma yüksek sıcaklık etkisiyle bağlayıcı fazda mikro çatlaklara sebep olduğu, en kompakt iç yapının elde edildiği 75°C sıcaklığın ise 4 günlük ısıtılma için optimum sıcaklık olduğu sonucuna varılmıştır.
- Gerçekleştirilen EDX analizleri genel olarak FESEM görüntüleri ve mekanik deney sonuçlarıyla örtüşmekte olup mekanik özelliklerin bağlayıcı fazın kimyasal kompozisyonunun artışı ile paralel şekilde gelişmekte olduğunu göstermektedir.

4.1.8 Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinden Elde Edilen Sonuçlar

- İğnimbirit bazlı geopolimer harçların Portland çimentolu harca göre enerji tüketimi, karbon ayak izi ve karasal ekotoksikite gibi kategorilerde daha iyi çevresel performanslar sergiledikleri görülmüştür. Ancak ozon tabakası tüketimi, insan toksisitesi ve ekotoksikite gibi kategorilerde olumsuz etkilere sahiptirler.
- Havada bekletilerek kalıptan çıkarılan, kalıptan çıkarıldıktan sonra 4 gün boyunca 75°C etüvde kuru edilen iğnimbirit bazlı geopolimer harç numunesi (8Na-75H-4) enerji tüketimi açısından daha sürdürülebilir bir seçenek olmuştur.
- Portland çimentolu harcın YDD sonuçları incelendiğinde en yüksek çevresel etkinin çimentodan kaynaklandığı belirlenmiştir.
- İğnimbirit bazlı geopolimer numunelerde en yüksek çevresel yükler NaOH kullanımı, ulaşım ve öğütme süreçlerinden kaynaklanmıştır. Buna karşılık harç üretiminde yer alan ısıtılma, mikserle karıştırma ve vibrasyon gibi işlemlerin çevresel etkisi ise daha sınırlı kalmıştır.

4.2 Öneriler

- Ülkemizde volkanik geçmişi zengin olan bölgelerde doğal puzolan kaynaklarının araştırmaları artırılmalı, ülke ekonomisine katkısı için puzolanların geopolimer bağlayıcı olarak kullanımı konusundaki çalışmalar desteklenmelidir.
- İğnimbirit temelli geopolimer sistemlerin kür maliyetinin düşürülmesi yönünde çalışmalar yapılmalıdır.
- İğnimbirit ile üretilen geopolimer harç/beton sisteminin farklı aktivatör/bağlayıcı sistemleri ile kullanılabilirliği araştırılmalıdır.

KAYNAKÇA

- [1] <https://www.thbb.org/sektor/dunyada-sektor> (Erişim tarihi: Aralık 2024)
- [2] Ali, M. B., Saidur, R., Hossain, M. S., 2011. **A review on emission analysis in cement industries.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2252-2261.
- [3] Durak, U., 2019. Nanoparçacık Katkıların Geopolimer Harcın Dayanım Ve Dayanıklılık Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [4] <https://tr.wikipedia.org/wiki/ignimbirit> (Erişim tarihi: Aralık 2024)
- [5] Korkanç, M., 2007. **İgnimbiritlerin jeomekanik özelliklerinin yapı taşı olarak kullanımına etkisi: Nevşehir taşı.** Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 31 (1).
- [6] https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/birimler/tuvak/volkanlar/turkiye_holosen_volkanlar.pdf (Erişim tarihi: Aralık 2024)
- [7] Kantarcı, M. D., 2015. Açık taş ocağı işletmesinin çevreye etkileri ve sürdürülebilirliği. İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi, Çevre ve Orman Raporu.
- [8] Helvacı, C. ve Ergül, F., 2001. Volkanik kayalar (Oluşumu genel özellikleri ve sınıflaması), 285, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayını
- [9] Şahin, S., 2018. İgnimbirit taş ocağı atıklarından ısıtma işlemi yoluyla elde edilen yapay taşların fiziksel ve mekanik özellikleri. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [10] Wibowo, A., 2015. **Returns to scale in buildings construction costs: Indonesian cases.** *Procedia Engineering*, 125, 18-24.

- [11] Fernandez-Jimenez, A. M., Palomo, A., Lopez-Hombrados, C., 2006. **Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete.** ACI Materials Journal, 103(2), 106.
- [12] Dutta, D., Chakrabarty, S., Bose, C., Ghosh, S., 2012. **Evaluation of Geopolymer properties with temperature imposed on activator prior mixing with fly ash.** International Journal of Civil & Structural Engineering, 3(1), 205-213.
- [13] Castel, A., Foster, S. J., 2015. **Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement.** Cement and Concrete Research, 72, 48-53.
- [14] Sınıksaran, M. 2012. Volkanik tüf tozları ile polimer esaslı kompozit malzeme üretimi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [15] Uzun, O., 2016. Doğal puzolanların karakteristik özellikleri ve katkı malzemesi olarak beton dayanımına etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [16] Bilgil, A., Özdel, H., 2017. **Pomza esaslı ve ignimbirit katkılı hafif yapı malzemesinin fiziksel ve mekanik özellikleri.** Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6 (2), 475-482.
- [17] Gökçe, H. S., Şimşek, O., 2013. **İgnimbirit tozunun ASR genleşmesine etkisi.** Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- [18] Erdal, M., Şimşek, O., 2010. **Ahlat taşı atıklarının taşunu olarak beton içinde kullanılabilirliğinin araştırılması.** Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü.
- [19] Aydın, A. C., Karakoç, M. B., Düzgün, O. A., Bayraktutan, M. S., 2010. **Düşük kaliteli agregaların hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi.** Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

- [20] Mayta-Ponce, D. L., Soto-Cruz, P., Huamán-Mamani, F. A., 2019. **Yıkım atıklarından ve ignimbirit yarıklarından yeni geopolimer bağlayıcı üretimi.** Universidad Católica San Pablo, Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales-CITEM.
- [21] TSE EN 1008, 2003. Beton - karma suyu - numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. Ankara: TSE.
- [22] TSE EN 1015-3, 2000. Methods of test for mortar for masonry: Part 3. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Ankara: TSE.
- [23] TS EN 12504-4, 2012. Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. Ankara: TSE.
- [24] TS EN 1015-11, 2000. Mortar Testing Method, Part 11. Measurement of Compressive and Flexural Tensile Strength of Mortar. Ankara: TSE.
- [25] TSE, 2007, TS EN ISO 14040 standardı, Çevre yönetimi - Hayat boyu değerlendirme - İlkeler ve çerçeve
- [26] TSE, 2007, TS EN ISO 14044 standardı, Çevre yönetimi- Hayat boyu değerlendirme- Gerekler ve kılavuz
- [27] Kul, A., Ozel, B.F., Ozcelikci, E., Gunal, M.F., Ulugol, H., Yildirim, G., Sahmaran, M., 2023. **Characterization and life cycle assessment of geopolimer mortars with masonry units and recycled concrete aggregates assorted from construction and demolition waste.** J. Build. Eng. 78, 107546.
- [28] Örklemmez, E., İlkentapar, S., Durak, U., Gülçimen, S., Uzal, N., Uzal, B., ... & Atış, C. D. (2024). **Characterizing boron-enhanced one-part alkaline-activated mortars: Mechanical properties, microstructure and environmental impacts.** Construction and Building Materials, 426, 136078.
- [29] E. A. Whitehurst, 1966. *Evaluation of concrete properties from sonic tests*, 2nd ed. Detroit: American Concrete Institute.

- [30] Atış, C. D., Görür, E. B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S., Luga, E. 2015. **Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration.** Construction and building materials, 96, 673-678.
- [31] Çınar, M., Erbaşı, B., 2022. **Geoteknik uygulamalarda geopolimerlerin kullanılabilirliğinin incelenmesi: literatür çalışması.** Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25 (4), 774-789.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet Ayberk Şimşek

Uyruğu : Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri

Medeni Durum

E-posta

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği ABD	2025
Lisans	Erciyes Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği	2022
Lise	Fatma Kemal Timuçin Anadolu Lisesi, Kayseri	2018

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2022-2025	İKG Yapı Denetim Ltd. Şti.	İnşaat Mühendisi
2025-Halen	Arven Yapı Endüstrisi A.Ş.	İnşaat Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Durak, U., Şimşek, A.A. (2022). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu temelli geopolimer sistemlerde atık demir tozunun agrega yerine kullanımının araştırılması. **Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 5 (2): 812-828.