

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

**POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÜRETİLEN
HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Abdullahi Nur BARKHADLE**

**Danışman
Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2023
KAYSERİ**

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

**POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÜRETİLEN
HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Abdullahi Nur BARKHADLE**

**Danışman
Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR**

Yüksek Lisans Tezi

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından FYL-2023-12522 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ağustos 2023
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.

Abdullahi Nur BARKHADLE

“Pomza Agregası Kullanılarak Üretilen Hafif Geopolimer Harçların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Abdullahi Nur BARKHADLE

Danışman

Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR

İnşaat Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ahmet Alper ÖNER

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince ilgisi ve desteği hiç eksik olmayan, değerli bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, çalışmanın yürütülmesi ve malzeme temini konusunda yardımcı olan, karşılaştığım her türlü zorlukta her zaman yanımda olan saygıdeğer danışmanım Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR' a derin teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, deneysel çalışmalarım sırasında yanımda bulunarak deneylerin gerçekleşmesine katkı sağlayan İnşaat Mühendisliği Bölümü doktora öğrencisi Ezgi ÖRKLEMEZ' e, Emine YAVUZ' a ve Turan Şevki KÖKER' e destekleri için teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAP Proje No: FYL-2023-12522) teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tez çalışmasında her adımda yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme de en derin teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Beni her zaman cesaretlendiren, motivasyonumu yüksek tutan ve hayallerimi gerçekleştirmemde her zaman destek olan sevgili aileme minnettarım.

Kayseri, Ağustos2023

POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÜRETİLEN HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Abdullahi Nur BARKHADLE
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2023
Danışman: Doç. Dr. Serhan İLKENTAPAR

ÖZET

Bu çalışmada F sınıfı uçucu kül ile geopolimer hafif harçlar üretilmiştir. Geopolimer hafif harç üretiminde agrega olarak Kayseri yöresine ait pomza kullanılmıştır. Geopolimer hafif harç üretiminde aktivatör olarak NaOH kullanılmıştır. Aktivatör oranı bağlayıcıya göre ağırlıkça %8, %10 ve %12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca karışımlara bağlayıcı oranına göre %1 ve %2 oranında Al tozu ikame edilmiştir.

Üretilen geopolimer taze harçlar üzerinde işlenebilirlik deneyi yapılmış, sertleşmiş harçlarda ise birim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrasonik atımlı dalga hızı deneyi, yüksek sıcaklık direnci deneyleri ve içyapı deneyleri kapsamında FESEM ve EDX analizleri yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre Kayseri yöresine ait hafif pomza agregası ile uçucu kül tabanlı hafif geopolimer harçlar üretilmiştir. Üretilen bu hafif harçlarda her bir grupta aktivatör oranının artmasıyla işlenebilirlik değeri artmıştır. Ayrıca Al tozu ikamesi de işlenebilirlik değerine olumlu katkı yapmıştır. Al tozu ikamesi daha boşluklu bir harç meydana getirmiş ve birim ağırlığı değerlerinin düşmesini sağlamıştır. 48 saat kür süresinde % 1 Al ikamesi ile eğilme ve basınç dayanımları genellikle artış göstermiştir. Geopolimer harçların yüksek sıcaklığa direçlerini incelediğimizde özellikle 600 °C den 900 °C ye çıktığında çarpıcı şekilde mekanik dayanımlarda artış olduğu sonucuna varılmıştır. İç yapı incelemeleri sonucunda FESEM görüntülerinde 900 °C sonrası daha yoğun bir iç yapı meydana gelmiş olup basınç dayanımlarındaki kısmi artışlar ile paralellik göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, uçucu kül, pomza, fiziksel ve mekanik özellikler, içyapı

INVESTIGATION OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHT GEOPOLYMER MORTARS MANUFACTURED USING PUMICE AGGREGATE

Abdullahi Nur BARKHADLE

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, July 2023

Advisor: Assoc. Dr. Serhan İLKENTAPAR

ABSTRACT

In this study, F class fly ash and geopolymer light mortars were produced. In the production of geopolymer light mortar, pumice from Kayseri region was used as aggregate. NaOH was used as activator in the production of geopolymer light mortar. The activator ratio was adjusted to be 8%, 10% and 12% by weight, depending on the binder. In addition, 1% and 2% Al powder was substituted in the mixtures according to the binder ratio.

Workability test was carried out on the produced geopolymer fresh mortars, and on the hardened mortars, FESEM and EDX analyzes were carried out within the scope of unit weight, flexural strength, compressive strength, ultrasonic pulsed wave velocity test, high temperature resistance tests and internal structure tests.

According to the results obtained, lightweight pumice aggregate from Kayseri region and fly ash based lightweight geopolymer mortars were produced. The workability value of these produced light mortars increased with the increase of the activator ratio in each group. In addition, Al powder substitution contributed positively to the machinability value. Al powder substitution created a more porous mortar and reduced unit weight values. Flexural and compressive strengths generally increased with 1% Al substitution in 48 hours curing time. When we examine the high temperature resistance of geopolymer mortars, it is concluded that there is a striking increase in mechanical strength, especially when it rises from 600 °C to 900 °C. As a result of the internal structure examinations, a denser internal structure was formed after 900 °C in the FESEM images and it was parallel with the partial increases in the compressive strengths.

Keywords: Geopolymer, fly ash, pumice, physical and mechanical properties, internal structure

İÇİNDEKİLER

POMZA AGREGASI KULLANILARAK ÜRETİLEN HAFİF GEOPOLİMER HARÇLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL ONAY SAYFASI.....	iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Uçucu Kül	2
1.2. Uçucu Külün Sınıflandırılması	2
1.3. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları.....	3
1.3.1. Çimento ve Beton Üretiminde Uçucu Kül Kullanımı	4
1.4. Geopolimer Betonu	4
1.5. Hafif Beton.....	5
1.6. Literatür Özeti.....	5

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1.Yöntem	7
2.1.1. Karışım Oranları.....	7
2.1.2. İşlenebilirlik.....	7
2.1.3. Birim Ağırlık Deneyi.....	8
2.1.4. Ultrasonik Geçiş Hızı Tayini.....	9
2.1.5. Eğilme Dayanımı Deneyi	9
2.1.6. Basınç Dayanımı Deneyi.....	11
2.1.7. Yüksek Sıcaklığa dayanıklılık Deneyi.....	12

2.1.8. FESEM İncelemeleri.....	13
2.2. Materyaller	13
2.2.1. Uçucu Kül	13
2.2.2. Aktivatör	15
2.2.3. Pomza	16
2.2.4. Karışım Suyu	16

3. BÖLÜM BULGULAR

3.1. İşlenebilirlik.....	17
3.2. Birim ağırlık Deneyi.....	18
3.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini.....	19
3.4. Eğilme ve Basınç Dayanımı.....	20
3.5. Yüksek Sıcaklığa dayanıklılık Deneyi.....	22
3.6. FESEM İncelemeleri.....	24
3.7. EDX ANALİZİ	34

4. BÖLÜM TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar	37
4.1.1. İşlenebilirlik Deneyi ile İlgili Sonuçlar	37
4.1.2. Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları	37
4.1.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyi ile İlgili Sonuçlar	38
4.1.4. Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri ile İlgili Sonuçlar	38
4.1.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyi ile İlgili Sonuçlar	38
4.1.6. FESEM İncelemeleri ile İlgili Sonuçlar	39
4.2. Öneriler	39
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ.....	42

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	ASTM C618'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması.....	3
Tablo 1.2.	TS EN 197-1'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması	3
Tablo 2.1.	Hafif Geopolimer Harçların Karışım Tablosu.....	7
Tablo 2.2.	Uçucu Külün Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	14
Tablo 2.3.	Alüminyum tozunun kimyasal bileşimi (%).....	15
Tablo 3.1.	İşlenebilirlik deney sonuçları	17
Tablo 3.2.	Birim ağırlık sonuçları.....	18
Tablo 3.3.	Ultrasonik atımlı dalga hızı tayini sonuçları	19
Tablo 3.4.	Ultrasonik dalga geçiş hızına göre beton kalitesinin değerlendirilmesi ..	20
Tablo 3.5.	75°C'de kür edilen numunelerin eğilme dayanım değerleri	21
Tablo 3.6.	75°C'de kür edilen numunelerin basınç dayanım değerleri	22
Tablo 3.7.	Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım değerleri	23
Tablo 3.8.	Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım değerleri.....	24

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	İşlenebilirlik Deneyi	8
Şekil 2.2.	Birim Ağırlık Deneyi.....	8
Şekil 2.3.	Ultrasonik Geçiş Hızı Tayini.....	9
Şekil 2.4.	Eğilme Deneyi.....	10
Şekil 2.5.	Basınç Deneyi.....	11
Şekil 2.6.	Yüksek Sıcaklık Direnci Deneyii	12
Şekil 2.7.	FESEM İncelemeleri	13
Şekil 2.8.	Uçucu kül dış görünümü	14
Şekil 2.9.	Alüminyum (a), alüminyum SEM görüntüsü (b), alüminyum XRD grafiği (c).....	15
Şekil 2.10.	Sodyum hidroksit (NaOH)	15
Şekil 2.11.	Pomza agregası.....	16
Şekil 3.1.	Taze geopolimer harç numunelerinin işlenebilirlik değerleri	17
Şekil 3.2.	Numunelerin birim ağırlık değerleri.....	18
Şekil 3.3.	Ultrasonik atımlı dalga hızının değerleri.....	19
Şekil 3.4.	75°C’de kür edilen numunelerin eğilme dayanım değerleri.....	21
Şekil 3.5.	75°C’de kür edilen numunelerin basınç dayanım değerleri	22
Şekil 3.6.	Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım değerleri	23
Şekil 3.7.	Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım değerleri.....	24
Şekil 3.8.	% 8 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri,500 büyütme	25
Şekil 3.9.	% 10 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 500 büyütme	26
Şekil 3.10.	% 12 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri,500 büyütme	27
Şekil 3.11.	% 8 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 3000 büyütme	28
Şekil 3.12.	% 10 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri,3000 büyütme	29
Şekil 3.13.	% 12 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 3000 büyütme	30

Şekil 3.14.	% 8 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 5000 büyütme	31
Şekil 3.15.	% 10 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 5000 büyütme	32
Şekil 3.16.	% 12 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri ,5000 büyütme	33
Şekil 3.17.	%8 Na içeren Hafif Geopolimerlerin EDX Analizi	34
Şekil 3.18.	%8 Na içeren, %1 AL ikameli Hafif Geopolimerlerin EDX Analizi.....	35
Şekil 3.19.	900°C Yüksek Sıcaklık Sonrası %8 Na içeren Hafif Geopolimerlerin EDX Analizi	35
Şekil 3.20.	900°C Yüksek Sıcaklık Sonrası %8 Na içeren, %1 Al ikameli Hafif Geopolimerlerin EDX Analizi.....	36

GİRİŞ

Ülkemizin de taraf olduğu Birleşmiş Milletler İklim Antlaşması, Kyoto protokolü, Paris İklim Anlaşması ve son olarak da Avrupa Yeşil mutabakatı gereğince karbon salınımının azaltılması için birtakım önlemlerin alınması gerektiği açıkça görülmektedir. Özellikle 2050 yılı karbon nötr hedefi için Türkiye' nin de yapması gereken bazı uygulamalar olduğu kaçınılmazdır. 2030 yılı iklim değışikliği ile mücadele için kritik bir öneme sahip olup, enerji yoğun beş sektör için bazı uygulamaların hayata geçmesi artık kaçınılmaz olmuştur. Enerji yoğun beş sektörün içerisinde çimento sektörü de bulunmakta olup, çimento sektörü ve dolaylı olarak inşaat sektöründe de iklim değışikliği kapsamında uygulamalar yapılmaktadır. Bu sebeple dünya genelinde çimentosuz(cement free) beton ve yapı malzemeleri yaygın hale gelmiş ve ticari olarak satışları yapılır duruma gelmiştir.

Bu tez kapsamında çevre dostu yapı malzemelerinin uygulanabilirliği ile alakalı olması sebebiyle hafif geopolimer harçlar çalışılmıştır. Adana Su gözü termik santralinden elde edilen F sınıfı uçucu kül bağlayıcı olarak, sodyum hidroksit aktivatör olarak, Kayseri yöresine ait pomza agregası hafif agrega olarak kullanılmıştır. Kayseri yöresine ait pomza nın özellikle son yıllarda popüler hale gelen geopolimer sistemlerde kullanımı incelenmiştir.

Çalışmanın temel amaçları;

- Ülkemizde yüksek miktarda açığa çıkan uçucu külün kullanım alanlarını artırmak
- Kayseri yöresine ait pomza agregasının kullanılabilirliğini artırmak
- Avrupa yeşil mutabakatı perspektifinde düşük karbonlu yapı malzemelerinin üretimine katkı sağlamak
- Elde edilen hafif geopolimer harçların fiziksel, mekanik ve iç yapı özelliklerinin araştırılması ve raporlanması

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Uçucu Kül

Elektrik üretimi için kullanılan yöntemlerden birisi de termik santrallerdir. Termik santrallerde elektrik üretimi için kömür yakıt olarak kullanılır. Kömürün yanması ile geriye kömürün külü kalmaktadır. Kömür külü kendi içerisinde değişkenlik göstermekle birlikte çok ince tanecikli küresel yapıya sahip olan uçucu kül santral bacalarında çevreyi kirletmemesi için çeşitli yöntemlerle tutulur. Santral bacalarında çevre kirliliğini önlemek amacıyla tutulan bu uçucu küller yapısında SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 yüksek oranda bulundururken CaO , MgO ve Na_2O yu ise düşük miktarda bulundurmaktadır. Yan ürün olarak açığa çıkan bu uçucu küller inşaat sektöründe mineral katkı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır.[1]

1.2. Uçucu Külün Sınıflandırılması

Uçucu küller kimyasal içeriklerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma yapılırken kullanılan yaygın standartlardan birisi de ASTM C 618 standartıdır[2]. Uçucu külün ASTM C 618' e göre sınıflandırılması Tablo 1.1'de verilmiştir. Buna göre ASTM C618'e göre içerisinde CaO oranı %10'dan az oranda ise "düşük kireçli uçucu küller", içerisinde CaO oranı %10'dan fazla oranda ise "yüksek kireçli uçucu küller" şeklinde sınıflandırılır. Türk standartlarına göre uçucu küllerin sınıflandırılması yapılacak olursa V (Silissi) ve W (Kalkersi) olmak üzere iki sınıf uçucu kül karşımıza çıkmaktadır. TS EN 197-1'e [3] göre belirlenen uçucu küllerin sınıfları Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. ASTM C618'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması

Sınıf	Tanım
F	Toplam $Fe_2O_3+Al_2O_3+SiO_2 \geq \%70$ bitümlü veya antrasit kömürlerden elde edilmektedir. Sadece puzolanik özelliğe sahiptir.
C	Toplam $Fe_2O_3+Al_2O_3+SiO_2 \geq \%50$ düşük bitümlü veya linyit kömürlerden elde edilmektedir. Puzolanik özelliği ile beraber bir miktar bağlayıcılık özelliğine de sahiptir. (CaO içeriği $> \%10$)
N	Şeyller, tüfler, diatomik topraklar, doğal puzolanlar, ısıl işleminden geçirilmiş bazı killer, volkanik küller, chertz ve apolindir.

Tablo 1.2. TS EN 197-1'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması

Sınıf	Tanım
V (Silissi)	Puzolanik özelliktedir. Genellikle alüminyum oksitten (Al_2O_3) ve reaktif silisyum dioksitten (SiO_2) oluşur. Bir miktar Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri de bulundurur. Reaktif kireç miktarı $\%10$ 'dan daha az, reaktif silis içeriği ise $\%25$ 'ten daha fazladır.
W (Kalkersi)	Puzolanik özelliktedir. Reaktif SiO_2 , reaktif CaO ve Al_2O_3 'den oluşur. Kalan kısmı ise Fe_2O_3 ve diğer bileşenlerden oluşur. Reaktif kireç miktarı $\%10$ 'dan daha fazladır. Reaktif silis içeriği de $\%25$ 'ten daha fazladır.

1.3. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları

Uçucu küller fiziksel ve kimyasal özellik açısından incelendiğinde bu malzemelerin inşaat sektöründe kullanımının uygun olduğu görülmüştür. Uçucu küller değerlendirildiğinde bu malzemeler ile doğal hammadde kaynaklarını tüketimini azaltmakta, enerji üretimine fayda sağlamakta ayrıca ekolojik dengenin korunmasında fayda sağlamaktadır. Özellikle inşaat sektöründe uçucu kül kullanım alanları; çimento sektörü, beton üretimi ve çeşitli yapı malzemeleri üretimi olarak karşımıza çıkmaktadır[4].

1.3.1. Çimento ve Beton Üretiminde Uçucu Kül Kullanımı

Çimento ve beton sektöründe uçucu kül kullanımı oldukça yaygındır. Çimento hammaddesi kil ve kalkere uçucu kül eklenmesi yoluyla klinker üretiminde kullanılmaktadır. Özellikle uçucu kül, mineral katkı olarak çimentoya ikame edildiğinde daha tasarruflu, daha ekonomik ve çimentonun bazı dezavantajlarını azaltan bir bağlayıcı oluşturmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca çimento üretiminde gerek klinker kaynaklı gerekse yakıt kaynaklı yüksek miktarda CO₂ atmosfere salınmaktadır. Bu sebeple uçucu külün bağlayıcı olarak çimentoya ikamesi CO₂ salınımını azaltıcı etki sağlamakta olup çevrenin korunmasına katkı sağlamaktadır [5,6].

TS EN 197-1'e göre dört tip Portland uçucu küllü çimento bulunmaktadır. Bunlar; CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/A-W, CEM II/B-W çimentolarıdır. A grubunda bulunan çimentolarda kütlece %6-20 arasında ve B grubunda bulunan çimentolarda %21-35 arasında uçucu kül kullanılmıştır [7].

Uçucu küllerin beton karışımında kullanımı özellikle taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde bazı faydalar sağlamaktadır. Uçucu küllerin inceliklerinin çimentodan daha fazla olması sebebiyle bağlayıcı miktarında artış sağlamaktadır. Belirli yüzdelerde taze betonda işlenebilirlik özelliğini iyileştirmekte, betonun hidrasyon ısısını azaltmakta olduğu yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Ayrıca %20 oranında uçucu kül ikamesi betonda ileri yaş beton dayanımında (28 günlük ve ilerisi) artış sağladığı önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Buna karşın erken yaş dayanımı ve geç priz alma gibi olumsuz özellikleri de beton tasarımında dikkat edilmesi gereken özellikler arasında yer almaktadır[8].

1.4. Geopolimer Betonu

Çimento üretimi esnasında atmosfere önemli ölçüde CO₂ salınımı yapılmaktadır. Özellikle atmosfere salınan CO₂ gazının yaklaşık % 10 çimento üretimi esnasında oluşmaktadır. Çimento üretimi esnasında açığa çıkan CO₂ iki sebeple oluşmaktadır. Bu sebepler çimento üretimi için gerekli olan yüksek enerji gereksinimi ve CaCO₃' ün 900 °C de ayrışması olarak ifade edilmektedir [9,10]. Çimento üretimi kaynaklı oluşan bu çevresel olumsuz sonuçlar sebebiyle araştırmacılar çimentosuz bağlayıcı türü olan geopolimer yapılara yönelmişlerdir [11,12]. 1970 yılında Fransız araştırmacı Joseph

Davidovits tarafından geopolimer terimi katı alüminasilikat ve alkali solüsyonla ile birlikte sentezlenen malzeme olarak tanımlanmıştır [13]. Geopolimer yapılar tasarlanırken endüstriyel yan ürün olarak elde edilen uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemeler bağlayıcı olarak kullanılmaktadır [14].

1.5. Hafif Beton

TS EN 206:2013+A1'e göre beton yoğunluklarına göre üç gruba ayrılmaktadır. Buna göre normal beton, etüv kurusu durumdaki birim hacim kütlesi (yoğunluğu), 2000 kg/m³ 'ten büyük olup 2600 kg/m³ 'ü geçmeyen betondur. Hafif beton etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 800 kg/m³ veya daha büyük olup 2000 kg/m³ 'ü geçmeyen betondur. Ağır beton etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 2600 kg/m³ 'ten daha büyük olan betondur [15]. Hafif betonlarda birim ağırlıklarına göre üç gruba ayrılmıştır. Buna göre birim ağırlığı 300 kg/m³ ile 800 kg/m³ arasında olanlar yalıtım betonu, 800 kg/m³ ile 1400 kg/m³ arasında olanlar orta mukavemetli hafif beton, 1400 kg/m³ den büyük olanlar taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmıştır [16].

1.6. Literatür Özeti

Eren ve ark. alkali ile aktive edilmiş harçlarda atık EPS granülleri ile ırmak kumunu yer değiştirmişlerdir. Atık EPS granülleri hacimce %20, %40, %60, %80, %100 oranlarında yer değiştirilmiştir. Aktivatör olarak sodyum metasilikat kullanılmış ve üretilen numuneler 28 gün suda kür edilmiştir. Kür süresi sonucunda elde edilen atık EPS li hafif harçların birim ağırlık, ultrasonik atımlı dalga hızı, ısı geçirimsizlik özellikleri ile eğilme ve basınç dayanımları incelenmiştir. Buna ilaveten hafif harçların yüksek sıcaklık dirençleri de incelenmiştir. Sonuç olarak birim ağırlık sonuçlarına göre taşıyıcı ve orta mukavemetli hafif beton ile yalıtım betonu elde edilebileceği gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası EPS ikameli alkali ile aktive edilmiş harçların basınç dayanımlarında 600°C ve 900°C sıcaklık sonrasında önemli miktarda kayıplar yaşanmıştır[17]. İlkentapar ve ark. geopolimer hafif harçları uçucu kül bağlayıcısı, NaOH aktivatörü ile 75 °C de 24 ve 48 saat ısıl kür uygulayarak elde etmişlerdir. Üretilen harçların fiziksel, mekanik ve içyapı özelliklerini incelemişlerdir. Birim ağırlık değerinde EPS ikamesinin oranının artmasıyla hem 24 saatte hem de 48 saatte kür uygulanan harçlarda azalma meydana geldiği rapor edilmiştir. Buna ilaveten boşluk oranı yüzdesi ve su emme miktarlarının EPS ikame oranı ile arttığı belirtilmiştir. 24 saat

ve 48 saat sıcaklık kürü yapılan iki durumda da, EPS ikame oranının artmasıyla eğilme ve basınç dayanımlarının düştüğü belirtilmiştir. Basınç dayanımı açısından incelendiğinde genel olarak hafif geopolimer harçlarda 48 saat sıcaklık kürü etkisi çok fazla olmadığı görülmüştür[18]. Karakaş ve ark. hafif geopolimer harç üretimi yaparken ham ve geliştirilmiş perlit agregası kullanmışlardır. Geliştirilmiş perlit agregasını, ham perlit agregası ve ırmak kumu ile yer değiştirilerek hafif harç elde edilmiştir. Üretilen harçların fiziksel özellikleri, mekanik özellikleri ve iç yapı özellikleri incelenmiştir. Geopolimer hafif harçların ısı geçirgenlik özellikleri ham ve geliştirilmiş agregalarda, özellikle geliştirilmiş agregalarda iyileştirme yapmıştır. Gözenekli yapıda olan doğal malzeme olan perlit agregasının geopolimer yapılarda çevre dostu ısı yalıtımı sağlayan malzemelerin üretiminde kullanılabileceği rapor edilmiştir [19]. Örüç ve ark. bağlayıcı olarak uçucu kül kullanmış, ve agrega olarak hafif agregalardan geliştirilmiş kil ve geliştirilmiş perlit kullanmışlardır. Alkaliler kullanarak geopolimer hafif harç üretmişlerdir. Karışım tasarımı yaparken Taguchi metodu kullanmışlardır. Geliştirilmiş perlit agregası kullanarak birim ağırlığı $0,83 \text{ g/cm}^3$ seviyelerinde hafif harç imal edilmiştir. Isı yalıtım özellikleri iyileştirilmiş ve 4,6 MPa seviyesinde basınç dayanımına sahip geopolimer hafif harçlar ile sürdürülebilir malzeme üretimini gösterip katkı sağlamışlardır [20].

2. BÖLÜM

YÖNTEM VE MATERYAL

2.1.Yöntem

2.1.1. Karışım Oranları

Geopolimer harç numuneleri üretimi için Uçucu kül, aktivatör, pomza agregası, alüminyum ve su kullanılmıştır. Harç karışımına ait karışım oranları tablosu Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Hafif Geopolimer Harçların Karışım Tablosu

	Karışım Kodu	Pomza(gr)	Uçucu Kül (gr)	Alüminyum (gr)	NAOH (gr)
1	R1	650	450	0	62
2	1A8N	650	445,5	4,5	62
3	2A8N	650	441	9	62
4	R2	650	450	0	78
5	1A10N	650	445,5	4,5	78
6	2A10N	650	441	9	78
7	R3	650	450	0	94
8	1A12N	650	445,5	4,5	94
9	2A12N	650	441	9	94

2.1.2. İşlenebilirlik

Çalışmada üretilen geopolimer harçların işlenebilirlikleri TS EN 1015-3 (Taze harç kıvamının tayini) [21] standardına göre Şekil 2.1’de gösterildiği gibi yapılmıştır. Buna göre deney için konik kabın üst çapı 70 mm, taban çapı 100 mm ve yüksekliği 60 mm dir. Geopolimer hafif harçların işlenebilirlik deneyleri ilgili konik kap sayesinde 2 aşamalı yerleştirme ile yapılmıştır. Buna göre her aşamada 10 vuruş yapılmış

sonrasında yayılma tablasında 15 düşüş gerçekleştirilmiştir. 15 düşüş sonrasında konik kap harcın etrafından kaldırılmış ve yayılan harç birbirine dik iki doğrultuda ölçülmüştür. Elde edilen ölçüm bulgularının mm cinsinden aritmetik ortalaması alınmış ve sonuç olarak kaydedilmiştir.



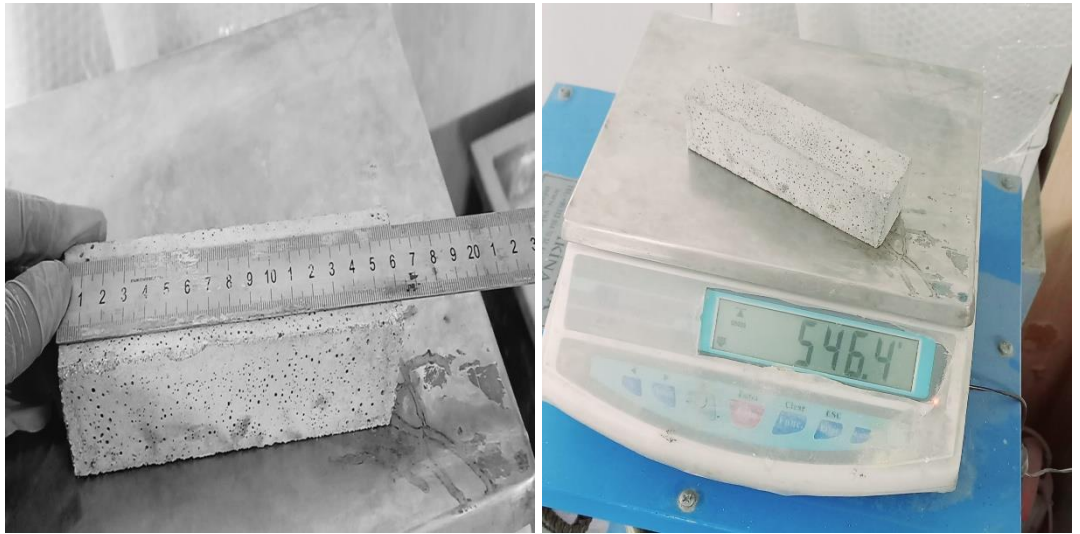
Şekil 2.1. İşlenebilirlik Deneyi

2.1.3. Birim Ağırlık Deneyi

Deneysel çalışmalarda üretilen geopolimer hafif harçlar ısıl kür sonrası Şekil 2.2’de gösterildiği gibi tartılmış ve daha sonra kumpas ile geometrik ebatları ölçülmüştür. Sonrasında birim ağırlık değerleri yaklaşık olarak elde edilmiştir.

$$\text{Birim Ağırlık (g/cm}^3\text{)} = \frac{AFK}{\text{Numune Boyutları}}$$

AFK : Fırın kurusu ağırlığı (g)



Şekil 2.2. Birim Ağırlık Deneyi

2.1.4. Ultrasonik Geçiş Hızı Tayini

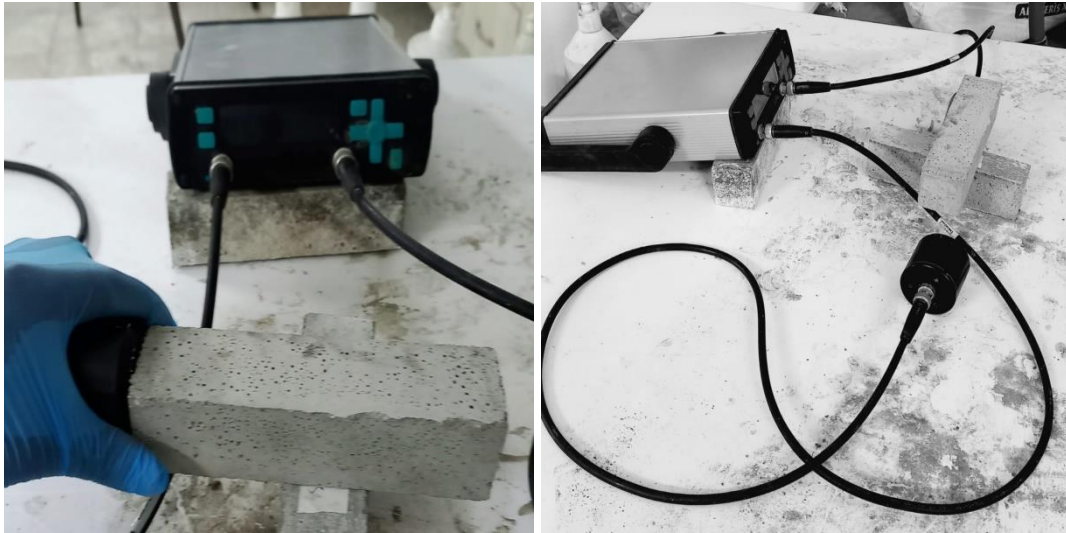
Hafif geopolimer harç numunelerinin ultrasonik atımlı dalga hızları TS EN 12504-4 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.3’de gösterilen Proceq marka cihaz ile dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Numune ölçümleri için cihazda bulunan alıcı ve verici transduserler yer almaktadır. Transduserlerin daha sağlıklı sonuç verebilmesi için harç yüzeylerinin mümkün olduğu kadar düz olması gerekmekte olup ölçüm öncesinde bu yüzeylere ultrasonik jel sürülmüştür. 40x40x160 mm’ lik geopolimer harç numunelerinin 160 mm’ lik doğrultusu boyunca ultrasonik dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Sinyallerin numuneler içinden geçiş süresinin numunedeki boşluk, çatlak ve yoğunluğuna bağlı olduğu bilinmektedir. İlgili test sonucu için her bir gruptan üç adet harç numunesinde ölçüm yapılmış olup bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Hesaplar aşağıda gösterilen bağıntı yardımıyla elde edilmiştir.

Ultrasonik atımlı dalga hızları aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$L = V \cdot T$ Burada; V: Ultrasonik hız, km/s

L: Geçiş uzunluğu, mm

T: Geçiş zamanı, μ s



Şekil 2.3. Ultrasonik Geçiş Hızı Tayini

2.1.5. Eğilme Dayanımı Deneyi

Geopolimer harç numunelerinin ısıl kür süreleri dolduktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar fırın dışarısında oda koşullarında bekletilmiştir. 40×40×160 mm

boyutlarındaki prizma numuneleri tek noktadan eğilme deneyine TS EN 1015-11 standartına göre Şekil 2. 4 de gösterildiği gibi uygulanmıştır. Mesnet açıklığı $10 \pm 0,5$ olacak şekilde ayarlanan numunelere eğilme dayanımı deneyi 50 N/s hızında tatbik edilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçlarında elde edilen kuvvet değeri ilgili formül kullanılarak N/mm^2 cinsine dönüştürülmüştür. Deneye tabi tutulan 3 adet prizma numunesinin aritmetik ortalaması alınarak eğilme dayanımı sonucu belirlenmiştir.

Formül:

$$R_f = 1,5 \frac{Fxl}{b^3}$$

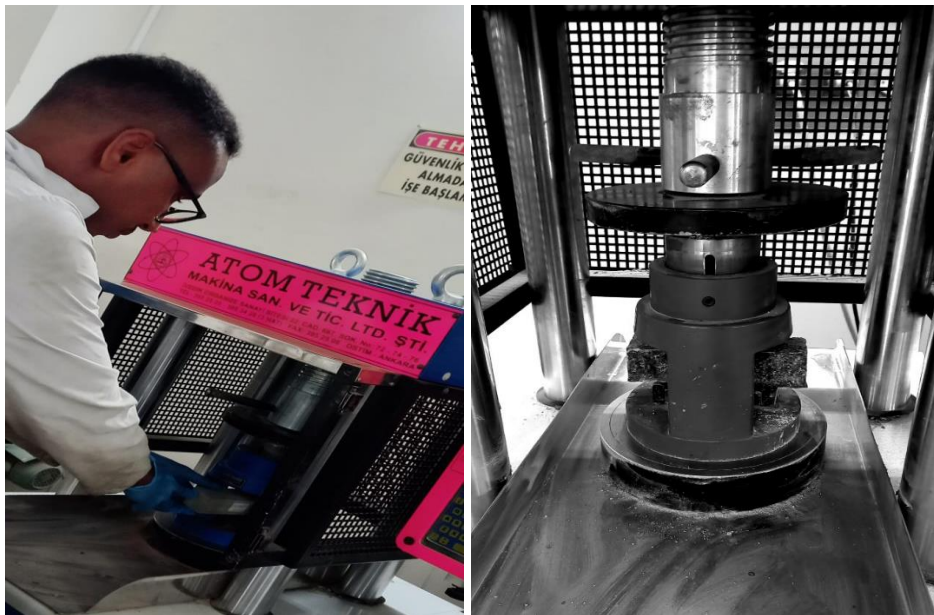
Burada;

R_f : Eğilmede çekme dayanımı, N/mm^2

b : Numunenin kesitinin genişliği, (40 mm)

F : Numuneye orta noktasından uygulanan kuvvet, (Newton)

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



Şekil 2.4. Eğilme Deneyi

2.1.6. Basınç Dayanımı Deneyi

Geopolimer harç numunelerine eğilme dayanımı uygulandıktan sonra her birisinden elde edilen 2 harç numunesine basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyi TS EN 1015-11 standardına göre yapılmıştır. Basınç dayanımı 10 mm kalınlığında 40 x 40 mm genişliğinde başlık kullanılarak yapılmıştır. Buna göre yükleme hızı 500 N/ s olarak yüklenen numuneler Şekil 2.5’de gösterildiği gibi kırılmıştır. Her bir eğilme deneyine tabi tutulan prizmadan toplamda elde edilen 6 adet basınç prizma numuneleri sonuçlarının aritmetik ortalamaları alınarak basınç dayanımı deneyi belirlenmiştir.

Formül:

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Burada;

R_c: Basınç mukavemeti, N/mm²

b: Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F_c: Kırılmadaki en büyük kuvvet, (Newton)



Şekil 2.5. Basınç Deneyi

2.1.7. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi

Geopolimer harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları incenmiş, sonrasında 48 saat kür edilen geopolimer harç numunelerinin yüksek sıcaklığa tabi tutulması kararlaştırılmıştır. Buna göre 40 x 40 x 160 mm boyutlarındaki harç numuneleri 300 °C, 600 °C ve 900 °C de yüksek sıcaklığa tabi tutulmuştur. Buna göre ilgili sıcaklığa dakikada 10 °C olarak çıkacak ve ilgili sıcaklıkta 60 dk süre kalacak şekilde ayarlanmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalma işlemi bittikten sonra fırının içerisinde kendi haline bırakılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar beklenmiş ve harç numunelerine eğilme ve basınç dayanımı uygulanmıştır. Geopolimer harç numunelerinin yüksek sıcaklık öncesi (25 °C) ve sonrası ağırlık ölçümleri ve ultrasonik dalga hızı ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 2.6. Yüksek Sıcaklık Direnci Deneyii

2.1.8. FESEM İncelemeleri

Geopolimer harç numunelerinin mikro yapılarını görüntülemek amacıyla FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) incelemeleri yapılmıştır. Kırık yüzey olarak yapılan incelemeler de numuneler görüntüleme öncesinde altın- paladyum kaplama ile yapılmıştır. Sonrasında harç numuneler Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) da bulunan Zeiss (GeminiSEM 500) marka modeli cihazda görüntüleme yapılmıştır.



Şekil 2.7. FESEM İncelemeleri

2.2. Materyaller

2.2.1. Uçucu Kül

Tez çalışması esnasında Su gözü termik santralinden temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2' de verilmiştir. Uçucu küle ait görüntü Şekil 2.8 de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Uçucu Külün Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

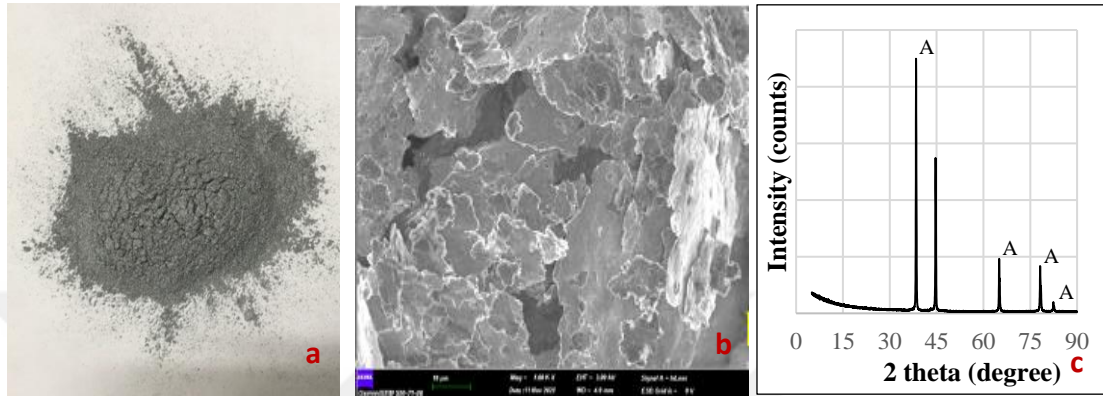
Kimyasal ve Fiziksel Özellikler	Sugözü Uçucu Külü
SiO ₂ (%)	52,70
Al ₂ O ₃ (%)	25,80
Fe ₂ O ₃ (%)	6,70
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ ≥ %70	85,2
K ₂ O (%)	4,45
Na ₂ O (%)	0,65
MgO (%)	1,59
CaO (%)	2,85
SO ₃ (%)	0,33
Cl ⁻ (%)	0,0043
Serbest CaO (%)	0,02
Kızdırma Kaybı (%)	3,30
Yoğunluk (kg/m ³)	2,14
BET Yüzey Alanı (m ² /g)	1,72
CaO (%)	2,85



Şekil 2.8. Uçucu kül dış görünümü

Alüminyum

Bu çalışmada kullanılan mikronize alüminyum tozu $2,69 \text{ g/cm}^3$ özgül ağırlığa sahiptir. Mikronize alüminyum parçacıklarının fotoğrafı, kimyasal kompozisyonu, XRD analizi ve SEM görüntüsü Şekil 2.9'da ve Tablo 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.9. Alüminyum (a), alüminyum SEM görüntüsü (b), alüminyum XRD grafiği (c)

Tablo 2.3. Alüminyum tozunun kimyasal bileşimi (%)

Element	Al	Fe	Si	S	Mg	Kızdırma kaybı	Diğer
Alüminyum	97.46	0.59	0.40	0.13	0.26	0.95	0.21

2.2.2. Aktivatör

Çalışmada kullanılan aktivatör % 97 saflık oranında NaOH kullanılmıştır. Sodyum hidroksitinin görüntüsü Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Sodyum hidroksit (NaOH)

2.2.3. Pomza

Çalışmada agrega olarak kullanılan Pomza Kayseri Yöresinden elde edilmiş olup Yeni Yılmazlar Bims Pomza madencilik şirketinden temin edilmiştir. Pomza agregası 0-4 mm arasında olup görüntüsü Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Pomza agregası

2.2.4. Karışım Suyu

Çalışmada şehir şebeke içme suyu kullanılmıştır.

3. BÖLÜM

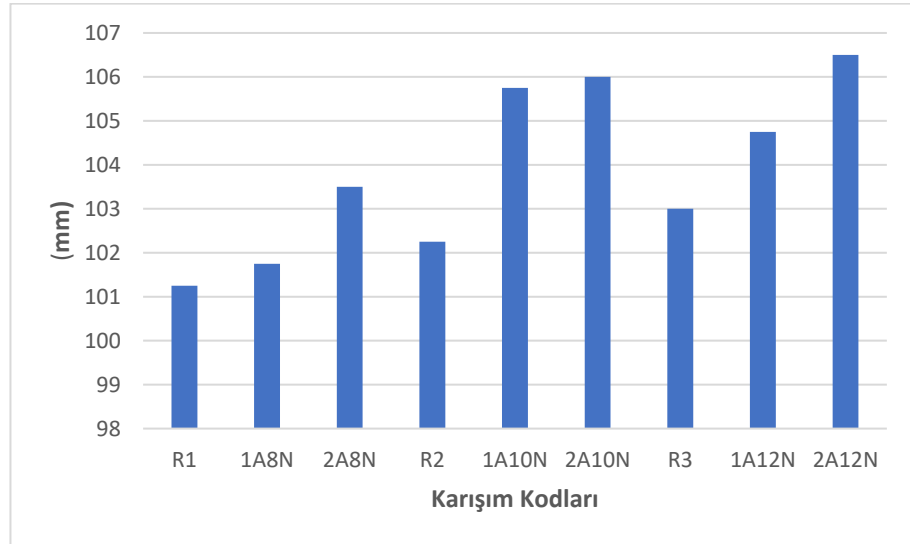
BULGULAR

3.1. İşlenebilirlik

Geopolimer hafif harç numunelerine taze halde işlenebilirlik deneyi uygulanmıştır. İşlenebilirlik deneyi TS EN 1015-3 standardına göre yapılmıştır. İşlenebilirlik deney sonuçları Tablo 3.1 de ve Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. İşlenebilirlik deney sonuçları

Numune Kodu	R1	1A8N	2A8N	R2	1A10N	2A10N	R3	1A12N	2A12N
Ortalama (mm)	101,3	101,8	103,5	102,3	105,8	106,0	103,0	104,8	106,5



Şekil 3.1. Taze geopolimer harç numunelerinin işlenebilirlik değerleri

Geopolimer hafif harç numune karışımlarında su / bağlayıcı oranı hepsinde sabit tutulmuştur. Aktivatör oranı %8, %10 ve %12 olacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca alüminyum tozu bağlayıcının %1 ve %2 oranında ilave edilmiştir. Tüm geopolimer harç

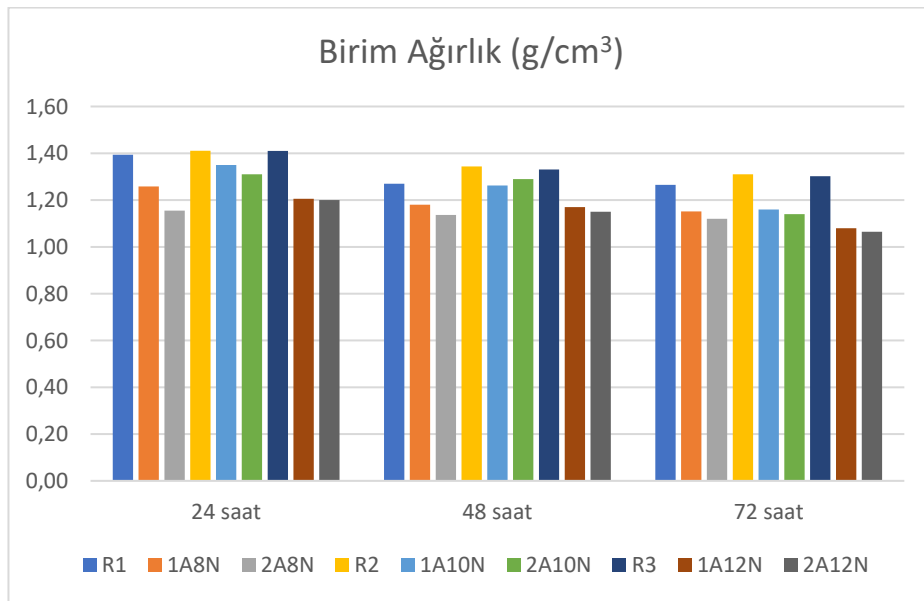
numuneleri incelendiğinde işlenebilirlik değeri 101,3 mm ile 106,5 mm arasında değişmektedir. Karışımlarda referans numuneler incelendiğinde alkali oranı arttıkça işlenebilirlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Buna göre en iyi işlenebilirlik değeri %12 Na içeren numune serisinde görülmüştür. Ayrıca sisteme eklenen Al tozu ilaveside işlenebilirliğe olumlu katkı yapmıştır. Tüm alkali yüzdelerinde ilave edilen Al tozu işlenebilirliği arttırmıştır. Sonuç olarak 106,5 mm işlenebilirlik değeri ile 2A12N kodlu %12 Na içeren %2 Al tozu ikameli geopolimer harç numunesinin işlenebilirlik değeri en yüksek çıkmıştır.

3.2. Birim ağırlık Deneyi

Deneysel çalışmalarda 40 x 40 x 160 mm lik prizmatik harçlar kullanılmıştır. 75 °C de 24, 48, 72 saat ısıtılma uygulanan nümeler ısıtılma sonrası oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiştir. Sonrasında ağırlık ölçümleri yapıp geometrik hacimlerine bölünmüş ve birim ağırlık değerleri elde edilmiştir. Elde edilen birim ağırlık sonuçları Tablo 3.2 ve Şekil 3.2 de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Birim ağırlık sonuçları

Birim Ağırlık (gr/cm ³)									
Kür Süresi	R1	1A8N	2A8N	R2	1A10N	2A10N	R3	1A12N	2A12N
24 saat	1,39	1,26	1,16	1,41	1,35	1,31	1,41	1,21	1,20
48 saat	1,27	1,18	1,14	1,34	1,26	1,29	1,33	1,17	1,15
72 saat	1,26	1,15	1,12	1,31	1,16	1,11	1,30	1,08	1,06



Şekil 3.2. Numunelerin birim ağırlık değerleri

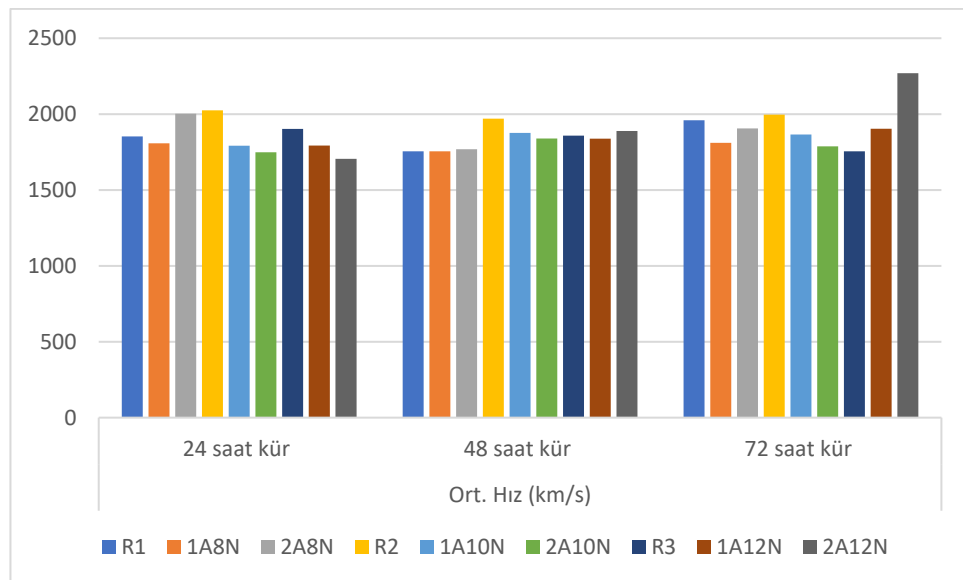
Geopolimer hafif harçların birim ağırlık değerleri incelendiğinde her üç farklı grup içinde Al tozu ikamesi ile birim ağırlık değerlerinde düşüş olduğu görülmüştür. Al tozu ikamesi ile elde edilen daha hafif geopolimer harçlarda en çarpıcı sonuçlar 72 saat ısıtılma uygulanan %12 Na içeren, % 2 Al tozu ikameli harçlarda görülmüştür. Buna göre R1 şahit harcının olduğu seride %12 oranında bir azalma, R2 şahit harcının olduğu seride %18 oranında bir azalma, R3 şahit harcının olduğu seride %22 oranında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir.

3.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızının Tayini

75 °C de 24, 48, 72 saat ısıtılma uygulanan geopolimer harç numunelerine ait ultrasonik atımlı dalga hızı tayini sonuçları Tablo 3.3 ve Şekil 3.3 de verilmiştir.

Tablo 3.3. Ultrasonik atımlı dalga hızı tayini sonuçları

	R1	1A8N	2A8N	R2	1A10N	2A10N	R3	1A12N	2A12N
Ort. Hız (km/s) 24 saat kür	1853	1808	2003	2025	1792	1748	1902	1793	1705
48 saat kür	1754	1754	1769	1970	1876	1839	1858	1838	1889
72 saat kür	1960	1811	1906	1996	1866	1788	1754	1904	2270



Şekil 3.3. Ultrasonik atımlı dalga hızının değerleri

Üç farklı sıcaklık ve üç farklı Na oranında üretilen geopolimer hafif harçların ultrasonik geçiş hızı sonuçları genel olarak aynı olduğu görülmüştür. Buna göre sonuçlar 1754 km /s ile 2270 km/s arasında değişkenlik göstermiştir. Bu kapsam da UPV değerleri Whitehurst'ün [22] betonlar için önerdiği Tablo 3.4'de verilen Ultrasonik atımlı dalga hızı değerlerine göre beton kalitesinin değerlendirilmesi' limitlerine göre incelenmiştir. Bu kapsam da üretilen numunelerin zayıf ya da çok zayıf kalitesinde olduğu görülmüştür. Bu da üretilen hafif betonun düşük birim ağırlığını sağlamak için kullanılan yüksek boşluklu pomza agregası ile üretilmesine bağlanmaktadır. Ayrıca beton kalitesinin çok zayıf olması geopolimer harçlarda ekstra boşluk üretmesi için kullanılan Al tozunun ikamesine bağlanmaktadır.

Tablo 3.4. Ultrasonik dalga geçiş hızına göre beton kalitesinin değerlendirilmesi

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

3.4. Eğilme ve Basınç Dayanımı

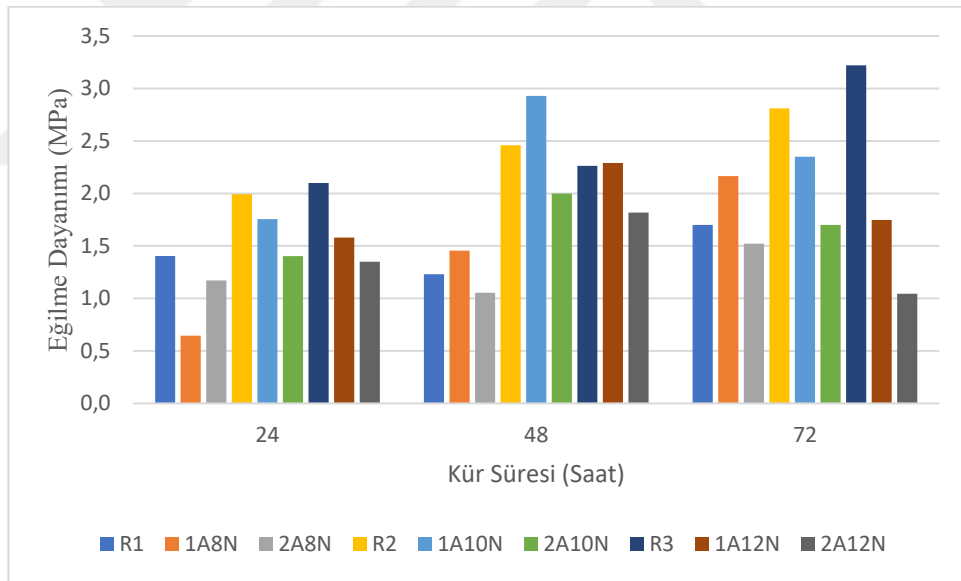
Deneyisel çalışmada geopolimer hafif harçların eğilme ve basınç dayanımları incelenmiştir. R1, R2, R3 kodlu referans harçların bağlayıcıya ağırlıkça alkali oranları sırasıyla %8, %10 ve %12 olarak belirlenmiştir. Ayrıca referans numune karışımlarına bağlayıcı ile ağırlıkça %1 ve %2 oranında Al tozu ikame edilmiştir. Üretilen geopolimer hafif harçlar 75 °C sıcaklıkta 24, 48,72 saat ısı küre tabi tutulmuştur. Deneylerde eğilme dayanımını belirlemek için 40 x 40 x 160 mm lik prizmatik kalıplar kullanılmıştır. Eğilme dayanımı deneyi sonrası ikiye kırılan geopolimer hafif harç numuneleri 40 X 40 mm lik plaklar üzerinde basınç deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme deneyi sonucu elde edilen 3 numune sonucunun, basınç deneyi sonucu elde edilen 6 numune sonucunun ortalama dayanımları alınıp nihai dayanım olarak gösterilmiştir.

75°C sıcaklıkta kür edilen geopolimer harçlara ait eğilme dayanımı sonuçları Tablo 3.5 ve Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre 24 saat ısıl kür süresinde referans harçlar alüminyum ikameli harçlara göre daha yüksek dayanım göstermiştir. 48saat ısıl

kür süresinde %1 Al ikameli harçlar referans harçlara göre daha yüksek sonuçlar vermiştir.72 saat ısıl kür süresinde 1A8N kodlu numune referansına göre daha yüksek sonuç verse de genel olarak Al ikamesi eğilme dayanımlarını düşürdüğü görülmektedir. Özellikle 48 saat ısıl kür uygulanan karışımda %8 ve %10 Na içeren harçlarda %1 Al ikamesinin uygunluk açısından olumlu olduğu görülmüştür. 72 saat ısıl kür süresinin Al tozu içeren harçlarda genel olarak eğilme dayanımlarına olumsuz etkilediği sonucu çıkartılmıştır.

Tablo 3.5. 75°C’de kür edilen numunelerin eğilme dayanım değerleri

Kür Süresi	Eğilme Dayanımı (MPa)								
	R1	1A8N	2A8N	R2	1A10N	2A10N	R3	1A12N	2A12N
24 Saat	1,4	0,6	1,2	2,0	1,8	1,4	2,1	1,6	1,4
48 Saat	1,2	1,5	1,1	2,5	2,9	2	2,3	2,3	1,8
72 Saat	1,7	2,2	1,5	2,8	2,4	1,7	3,2	1,7	1,0



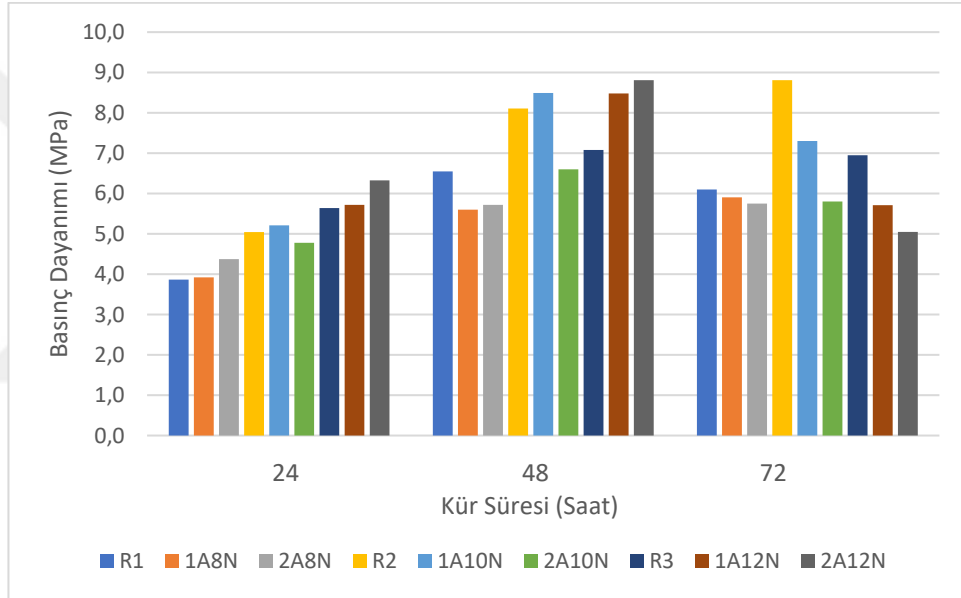
Şekil 3.4. 75°C’de kür edilen numunelerin eğilme dayanım değerleri

75°C sıcaklıkta kür edilen geopolimer harçlara ait basınç dayanımı sonuçları Tablo 3.6’’de ve Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre 24 saat ısıl kür süresinde referans harçlar kendi alkali oranındaki alüminyum ikameli harçlara göre benzer dayanım göstermiştir. 48saat ısıl kür süresinde %8 ve %10 alkali içeren %1 Al ikameli harçlar referans harçlara göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. 72 saat ısıl kür süresinde Al ikameli harçlar referansa basınç dayanımlarını düşürdüğü görülmektedir. Özellikle 48 saat ısıl kür uygulanan karışımda %10 ve %12 Na içeren harçlarda %1 ve %2 Al

ikamesinin basınç dayanımına uygunluk açısından olumlu olduğu görülmüştür. 72 saat 151l kür süresinin Al tozu içeren harçlarda genel olarak basınç dayanımlarını olumsuz etkilediği sonucu çıkartılmıştır.

Tablo 3.6. 75°C’de kür edilen numunelerin basınç dayanım değerleri

Kür Süresi	Basınç Dayanımı (MPa)								
	R1	1A8N	2A8N	R2	1A10N	2A10N	R3	1A12N	2A12N
24 saat	3,9	3,9	4,4	5,0	5,2	4,8	5,6	5,7	6,3
48 saat	6,5	5,6	5,7	8,1	8,5	6,6	7,1	8,5	8,8
72 saat	6,1	5,9	5,8	8,8	7,3	5,8	7,0	5,7	5,0



Şekil 3.5. 75°C’de kür edilen numunelerin basınç dayanım değerleri

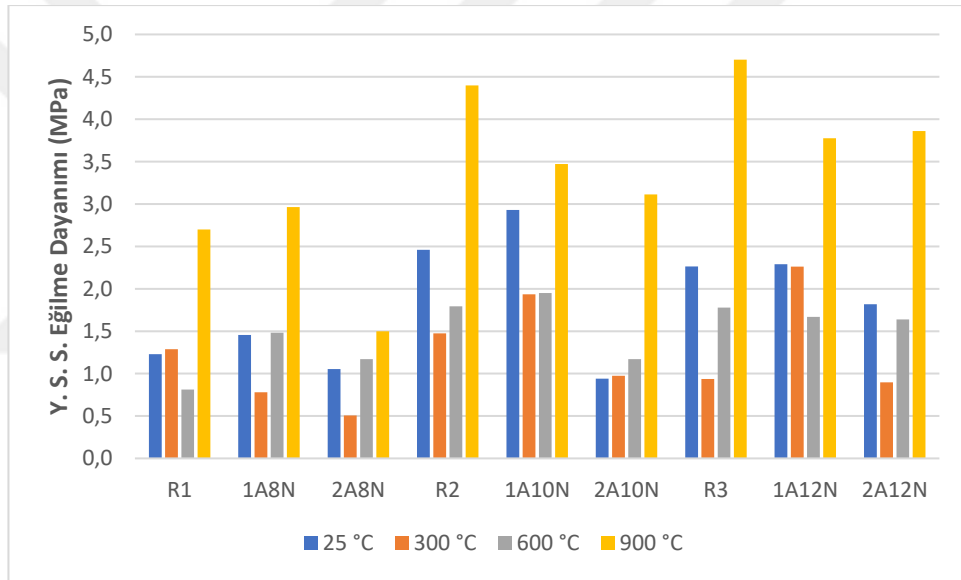
3.5. Yüksek Sıcaklığa dayanıklılık Deneyi

Geopolimer hafif harçların yüksek sıcaklığa dayanıklılığını belirlemek için 5 °C / dakika sıcaklık artışı uygulanarak numuneler ayrı ayrı 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklara ulaşmaları sağlanmış ve ilgili sıcaklıkta 60 dk bekletilmiştir. 60 dk ilgili sıcaklıkta bekletilen numuneler daha sonra oda sıcaklığına gelene kadar bekletilmiştir. Yüksek sıcaklık öncesi (25 °C) ve sonrası geopolimer harçların eğilme dayanım sonuçları Tablo 3.7 ve Şekil 3.6’de gösterilmiştir. Genel olarak 300 °C sonrasında numunelerin eğilme dayanım değerleri yangın öncesi eğilme dayanım değerlerine göre düştüğü görülmektedir. Ancak 900 °C sonrasında geopolimer harçların eğilme

dayanımlarında hem 600 °C sonrası hemde yüksek sıcaklık öncesi (25 °C) eğilme dayanımlarına göre artışlar olduğu kaydedilmiştir.

Tablo 3.7 Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım değerleri

	Eğilme Dayanımı (MPa)								
	R1	1A8N	2A8N	R2	1A10N	2A10N	R3	1A12N	2A12N
25 °C	1,2	1,5	1,1	2,5	2,9	0,9	2,3	2,3	1,8
300 °C	1,3	0,8	0,5	1,5	1,9	1,0	0,9	2,3	0,9
600 °C	0,8	1,5	1,2	1,8	2,0	1,2	1,8	1,7	1,6
900 °C	2,7	3,0	1,5	4,4	3,5	3,1	4,7	3,8	3,9

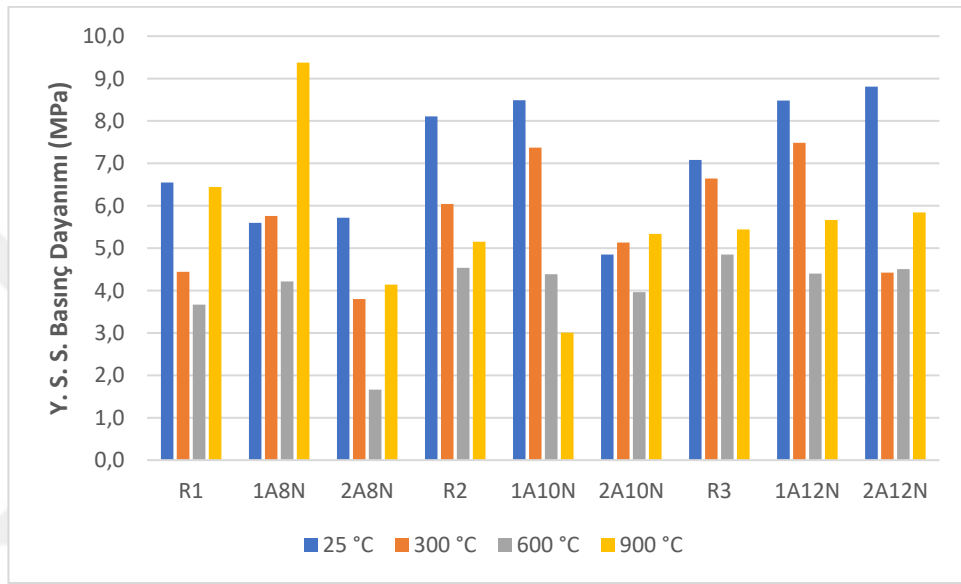


Şekil 3.6. Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanım değerleri

Yüksek sıcaklık öncesi (25 °C) ve sonrası geopolimer harçların basınç dayanım sonuçları Tablo 3.8 ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Genel olarak 300 °C sonrasında numunelerin basınç dayanım değerleri yangın öncesi basınç dayanım değerlerine göre düştüğü görülmektedir. Ancak 900 °C sonrasında geopolimer harçların basınç dayanımlarında hem 600 °C sonrası hem de yüksek sıcaklık öncesi (25 °C) basınç dayanımlarına göre artışlar olduğu kaydedilmiştir. Özellikle 1A8N kodlu numune 900 °C sonrasında 9,4 MPa basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir. 900 °C sıcaklık sonrası geopolimer harçlara ait FESEM görüntüleri Şekil 3. 8 ile Şekil 3.16 arasında gösterilmiştir. Mekanik dayanımlarda oluşan dayanım artışları FESEM görüntülerinde de görülen içyapı da oluşan yoğunlaşma ve daha kompakt bir yapının meydana gelmesi ile açıklanabileceği sonucuna varılmıştır.

Tablo 3.8 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım değerleri

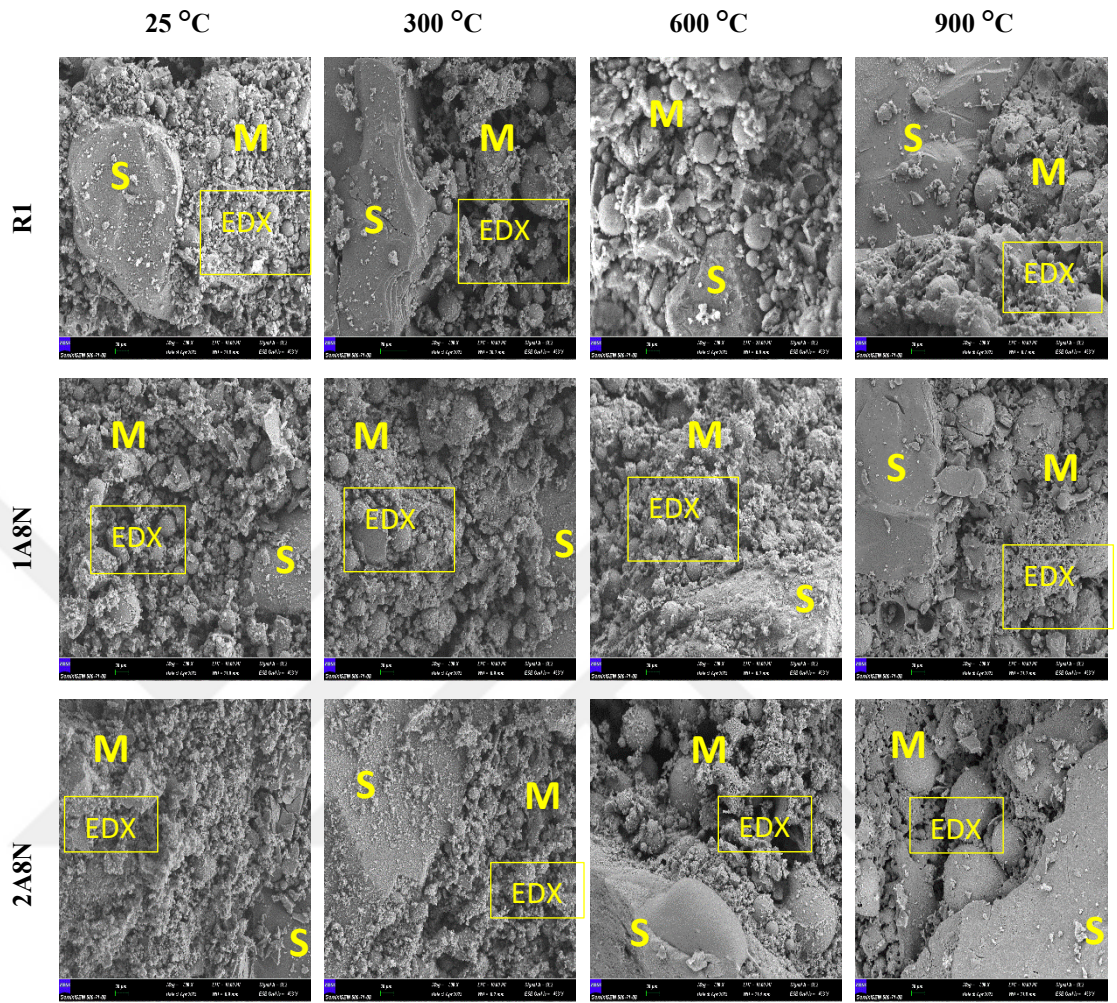
	Basınç Dayanımı (MPa)								
	R1	1A8N	2A8N	R2	1A10N	2A10N	R3	1A12N	2A12N
25 °C	6,5	5,6	5,7	8,1	8,5	4,9	7,1	8,5	8,8
300 °C	4,4	5,8	3,8	6,0	7,4	5,1	6,6	7,5	4,4
600 °C	3,7	4,2	1,7	4,5	4,4	4,0	4,9	4,4	4,5
900 °C	6,4	9,4	4,1	5,2	3,0	5,3	5,4	5,7	5,8



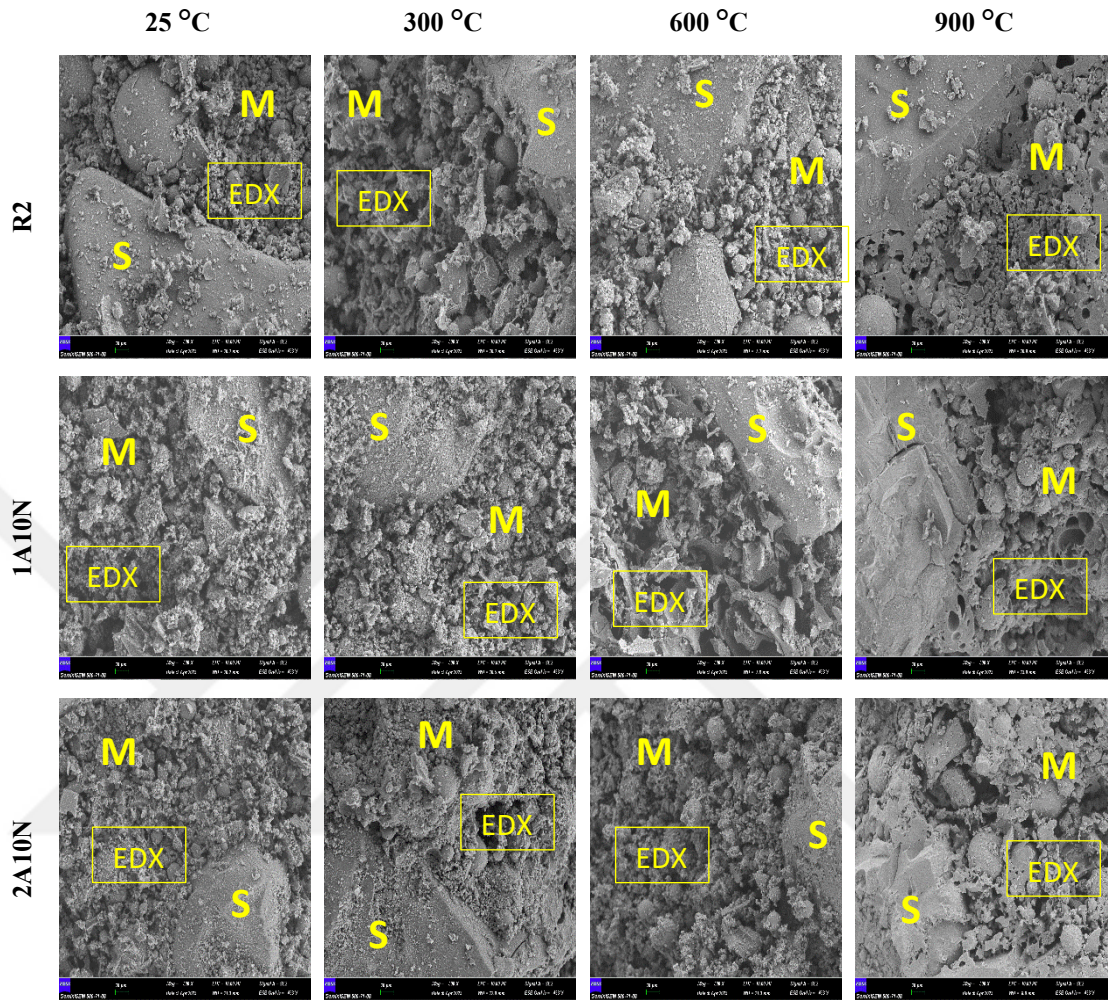
Şekil 3.7. Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım değerleri

3.6. FESEM İncelemeleri

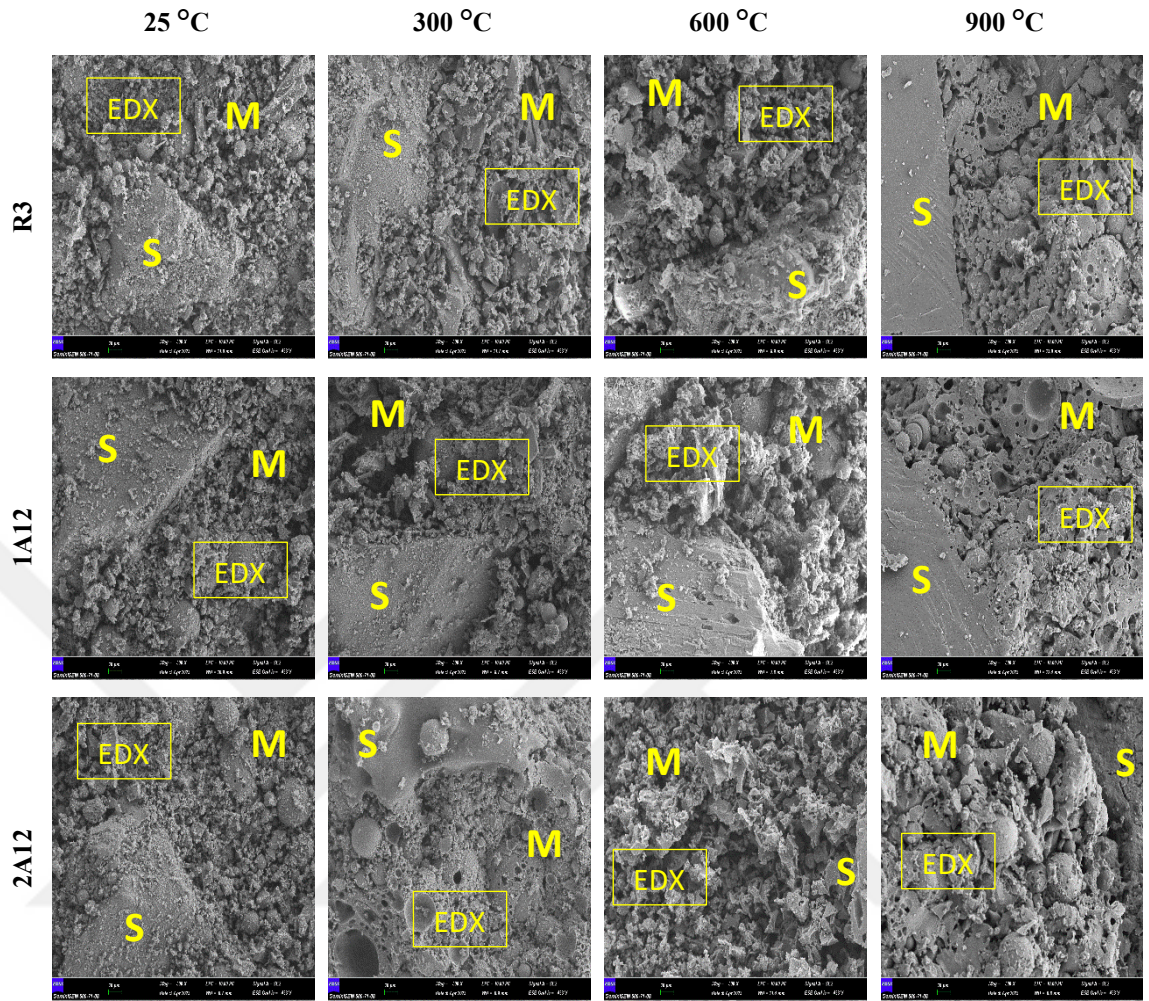
Üretilen geopolimer hafif harçların yüksek sıcaklık öncesi ve yüksek sıcaklık sonrası elektron mikroskop görüntüleri üzerinde görüntülemeler yapılmıştır. Elektron mikroskop FESEM (Field Emmision Scanning Electron Microscop) görüntüleri 500,3000 ve 5000 büyütmede alınmıştır. Hafif geopolimer harçlarda kum (S) ile hamur (M) ile gösterilmiştir. Ayrıca her hamur numunesinden EDX analizi yapılmış ve görüntüler üzerinde gösterilmiştir. 500 büyütme Şekil 3.8, Şekil 3.9, Şekil 3.10'de, 3000 büyütme Şekil 3.11, Şekil 3.12, Şekil 3.13'de, 5000 büyütme Şekil 3.14, Şekil 3.15, Şekil 3.16'de gösterilmiştir.



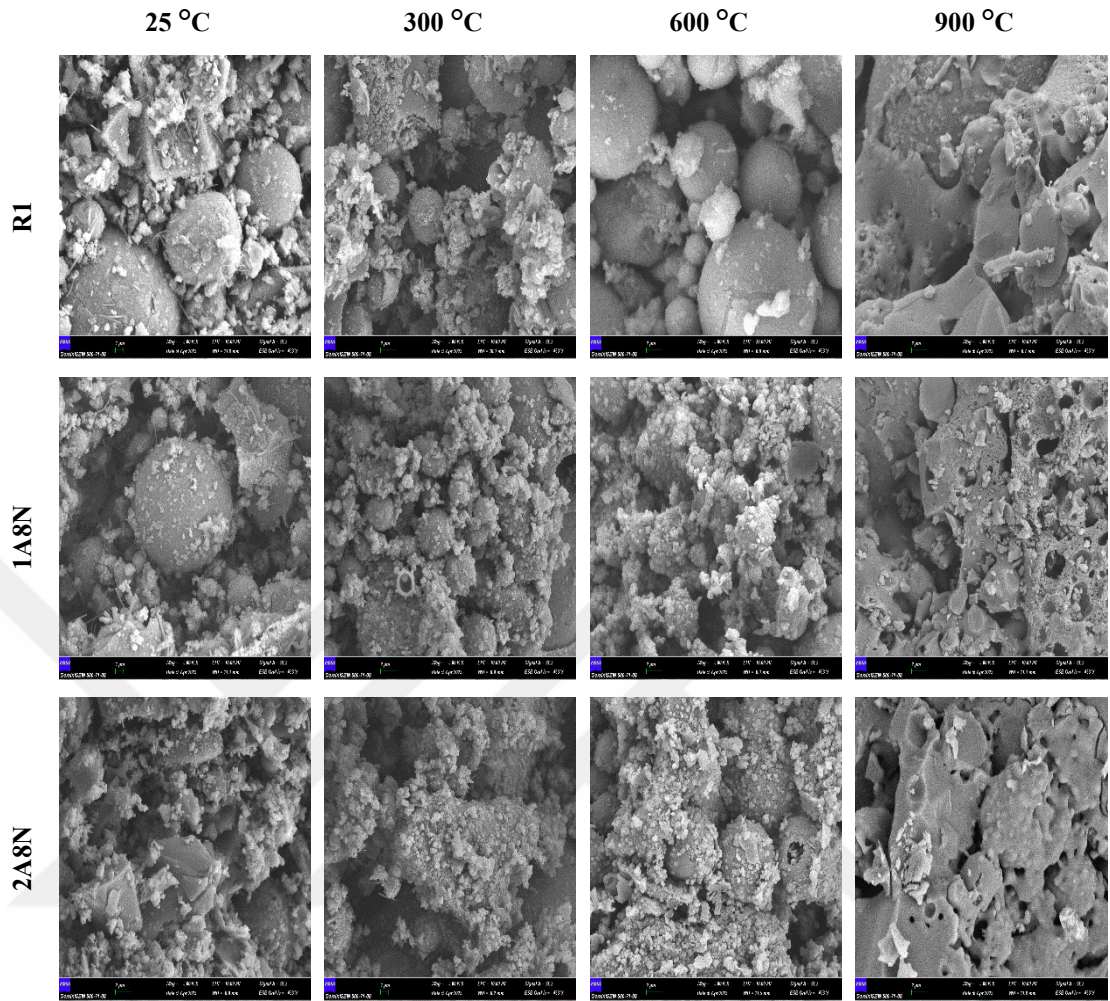
Şekil 3.8. % 8 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri,500 büyütme



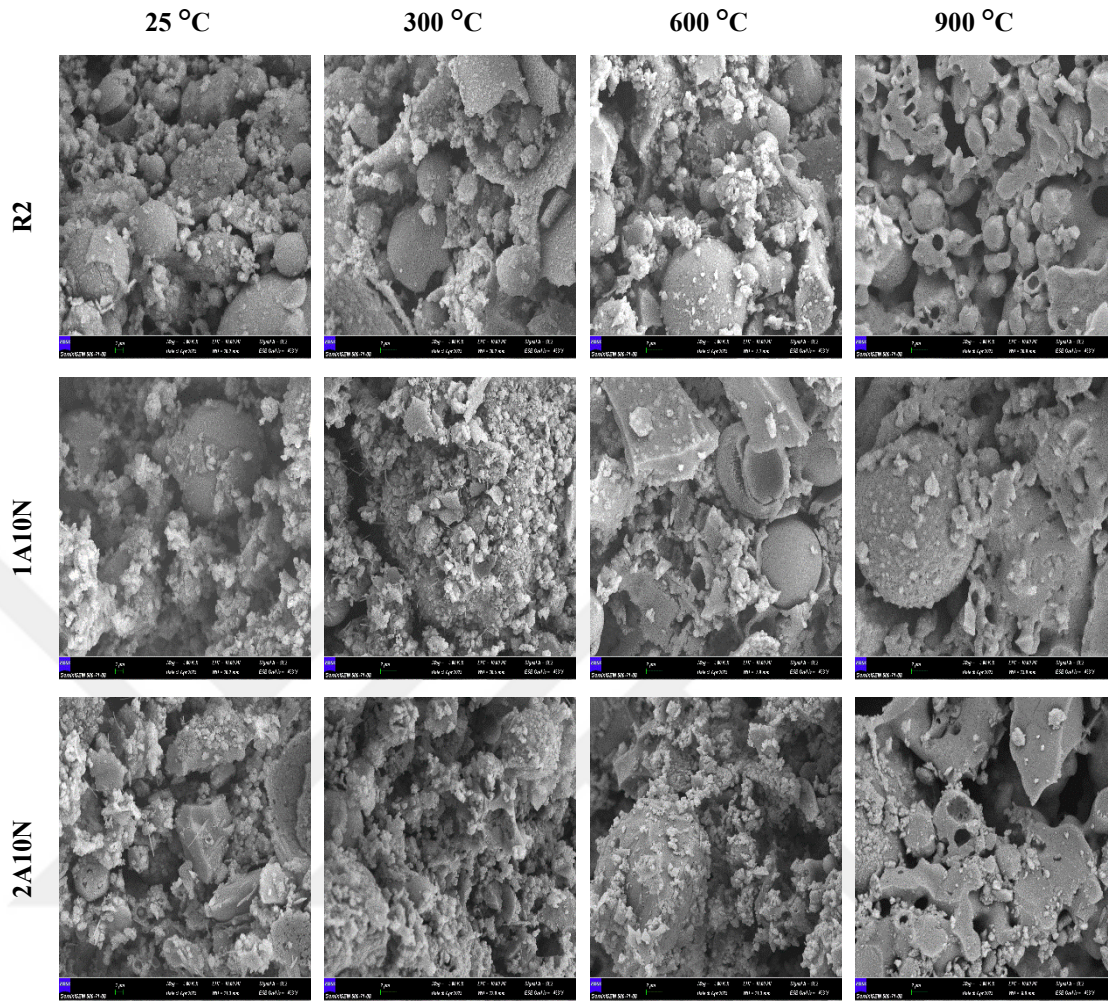
Şekil 3.9. % 10 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 500 büyütmeye



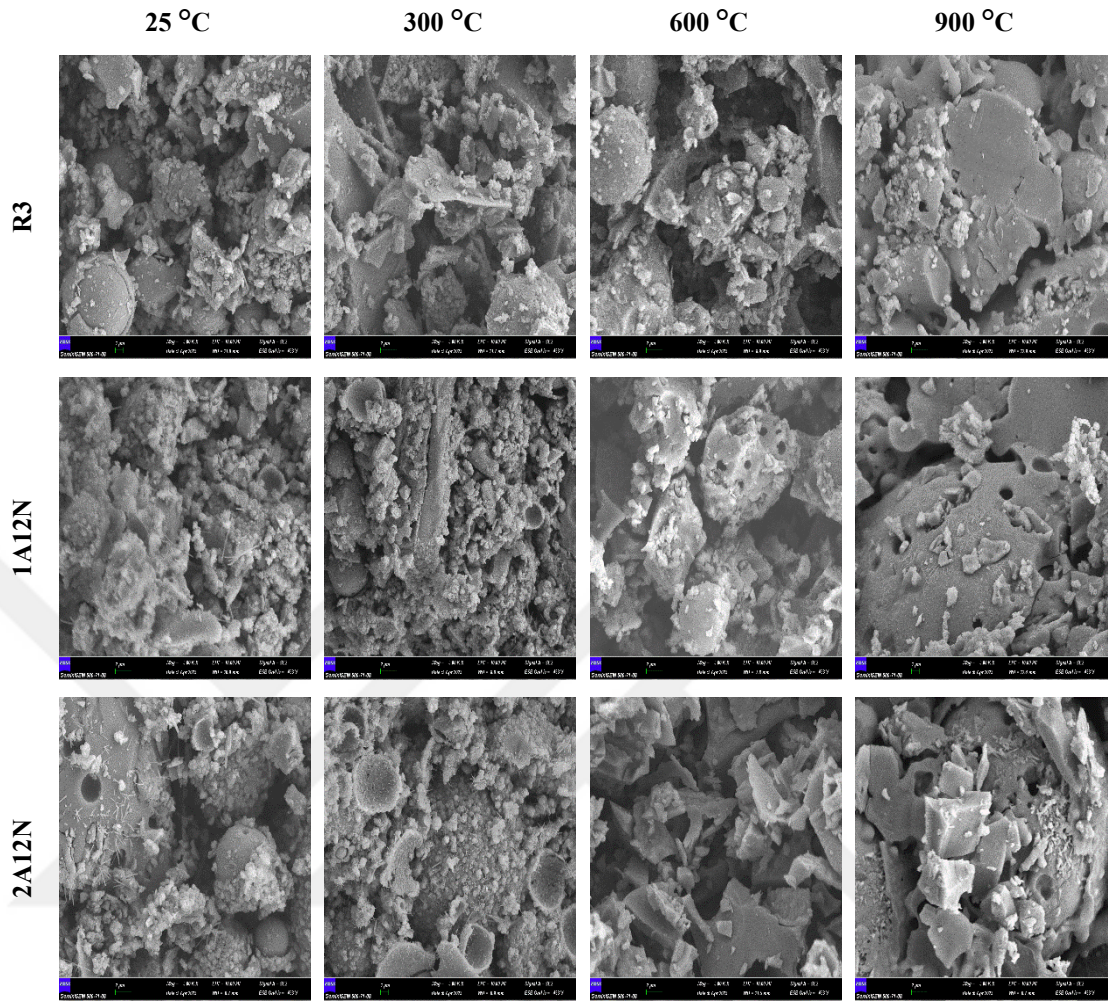
Şekil 3.10. % 12 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri,500 büyütme



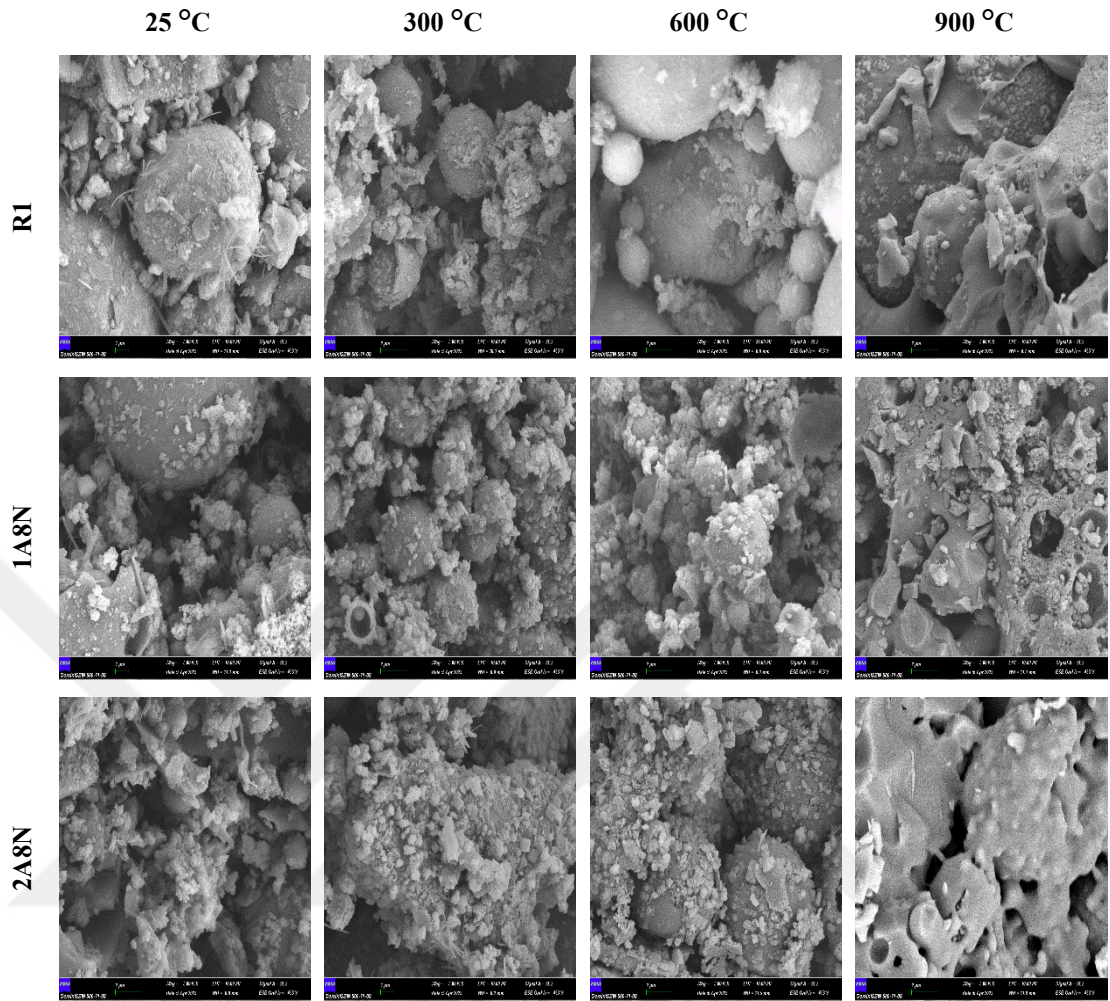
Şekil 3.11. % 8 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 3000 büyütme



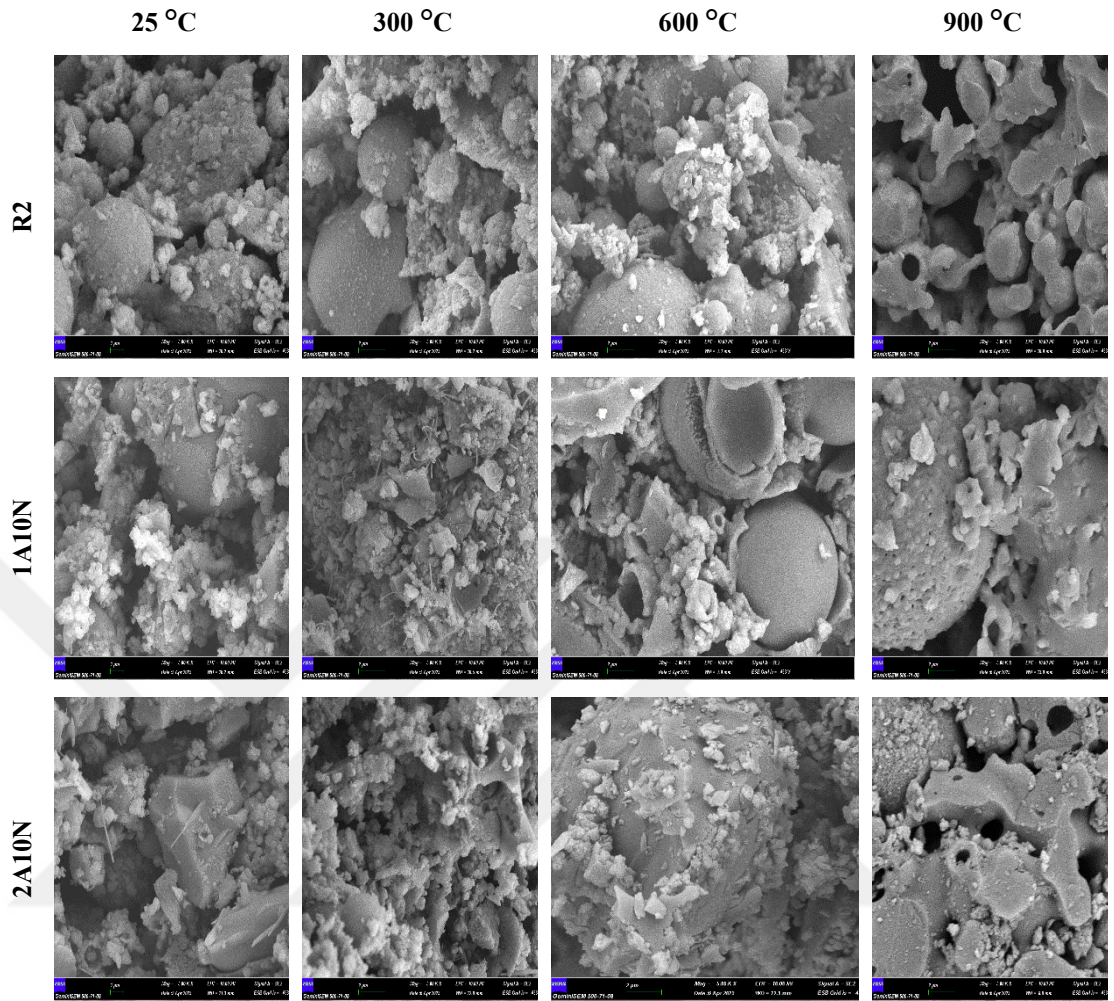
Şekil 3.12. % 10 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri,3000 büyütme



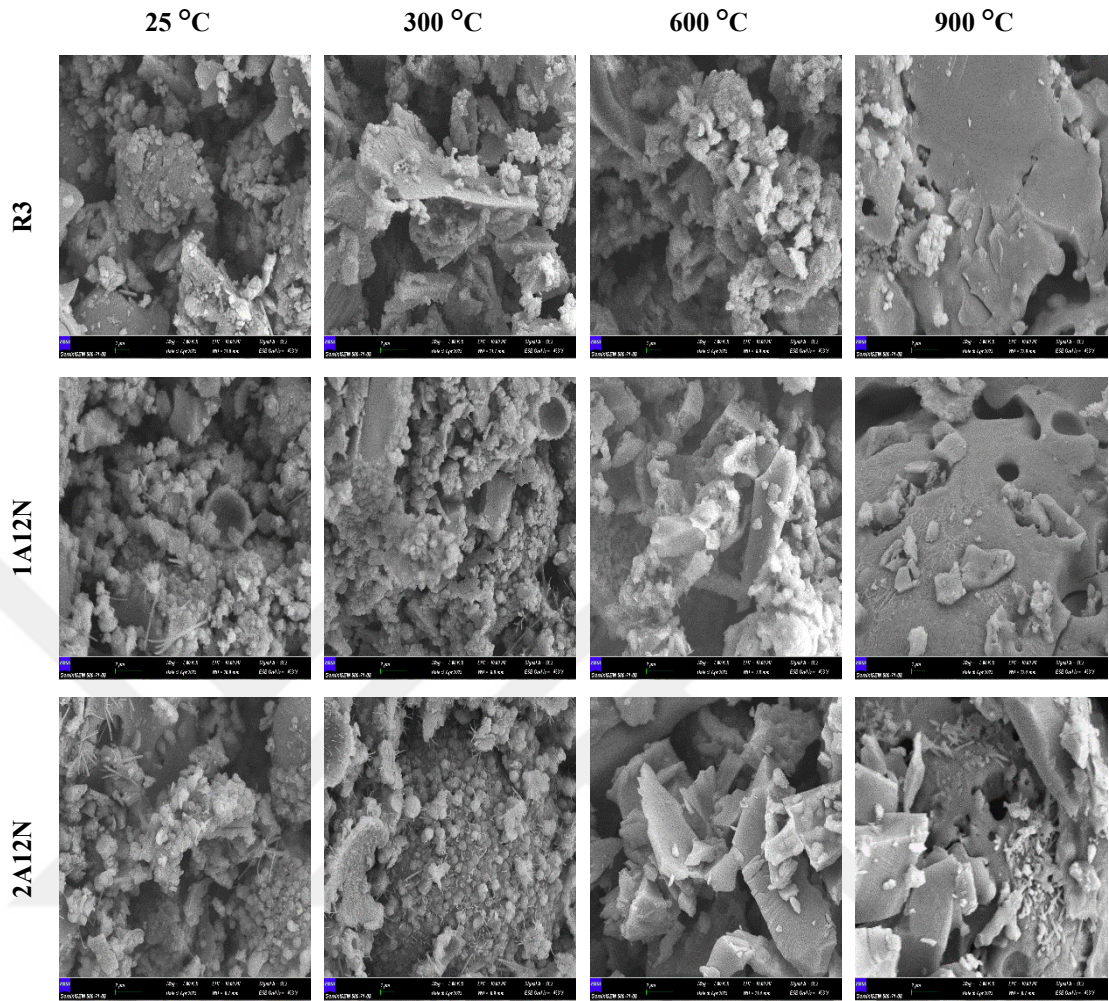
Şekil 3.13. % 12 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 3000 büyütme



Şekil 3.14. % 8 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 5000 büyütme



Şekil 3.15. % 10 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri, 5000 büyütme

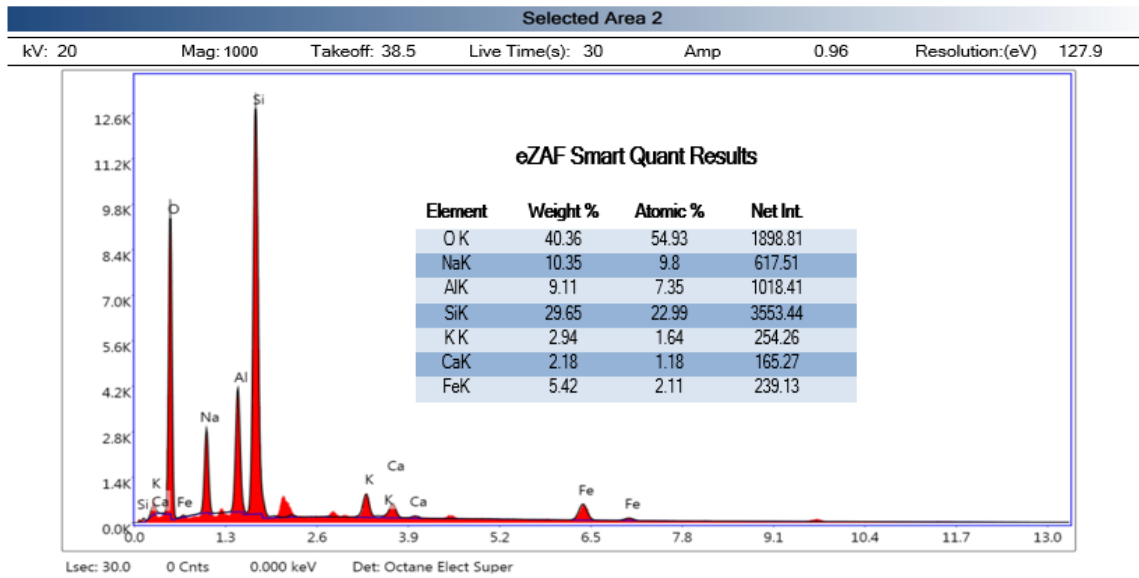


Şekil 3.16. % 12 Na içeren geopolimer hafif harçların FESEM görüntüleri ,5000 büyütme

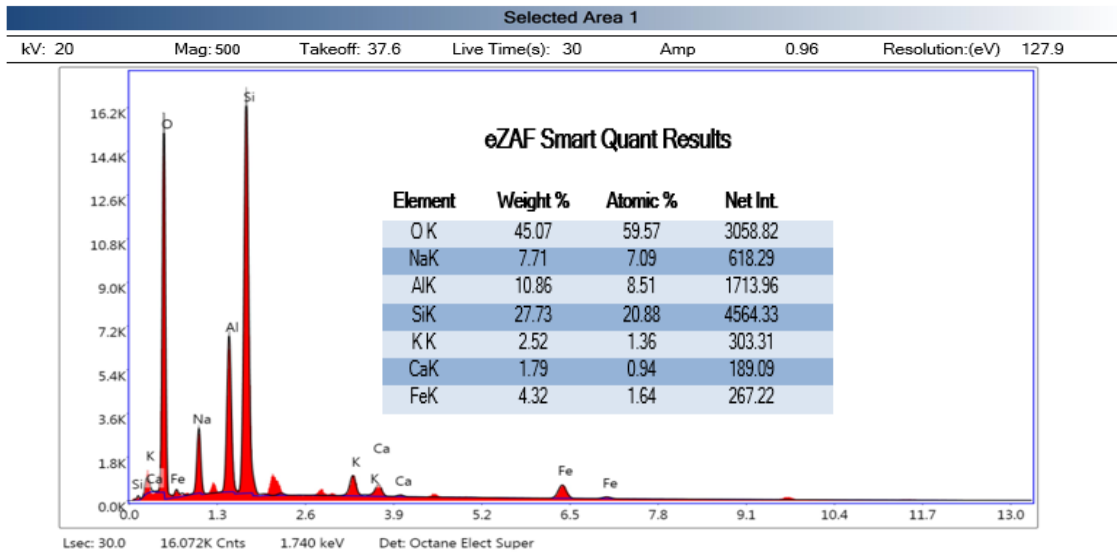
Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 da 300, 600 ve 900 °C sonrası geopolimer hafif harçların FESEM görüntülerini incelediğimizde yüksek sıcaklık öncesine göre daha az reaksiyona girmemiş uçucu kül tanecikleri görülmektedir. Yüksek sıcaklık sonrası(Şekil 3.11 de 300KXda 2A8N- 900 C de, Şekil 3.12 de 300 KX de 2A10N- 900 C, Şekil 3.16 de 500 Kx de 600 ve 900 C de R3, 1A12N, 2A12N) de mikro çatlaklar, boşluklu yapı oluşumları görülmektedir. Özellikle 900 °C sonrası daha fazla boşluk ve çatlak oluşsa da genel yapıda daha yoğun ve sıkı bir matrix hamuru gözlenmektedir. Bu durum 900 °C sonrası daha yoğun bir iç yapı meydana getirmiş olup basınç dayanımlarındaki kısmı artışlar ile paralellik göstermektedir.

3.7. EDX Analizi

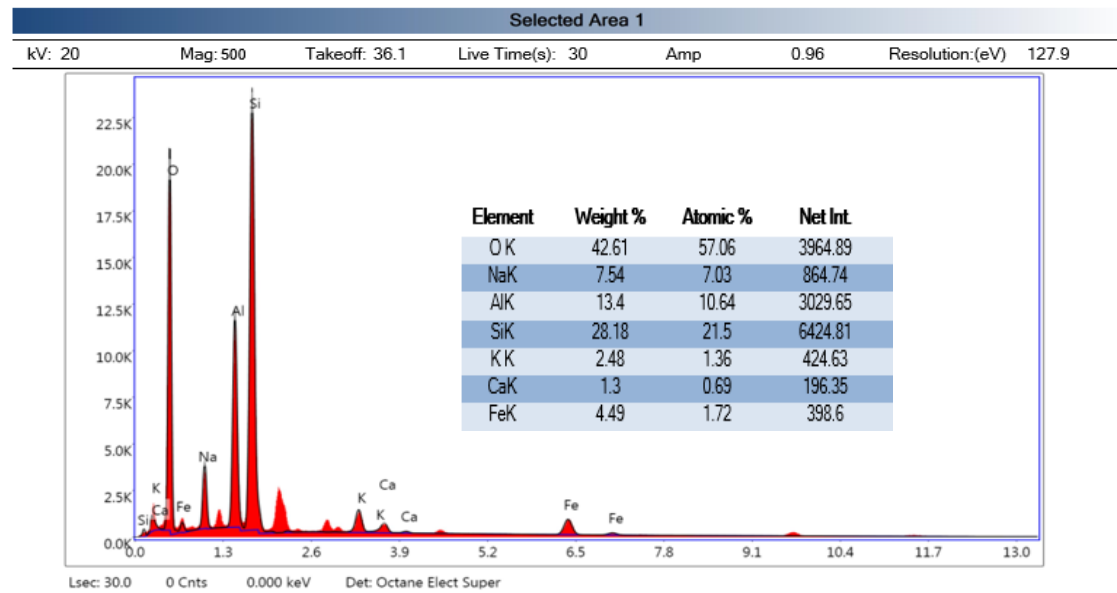
Şekil 17, 18, 19, ve 20’de gösterilen 500 büyütme ile gösterilen FESEM görüntülerin hamur kısımlarından EDX analizleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık öncesi ve 900 °C sonrası alınan EDX analizleri sonuçlarına göre hamur yapılarında geopolimer bağlayıcılarda bulunan elementler görülmektedir. 25 °C sonrasında reaksiyona girmemiş uçucu kül tanecikleri görülmekle birlikte, bu taneciklerin yüksek sıcaklıklara çıkıldığında giderek azaldığı görülmektedir. Kısmen reaksiyona girmiş şekle dönüştüğü ya da tamamen reaksiyona girmiş ve NASH jellerini oluşturmuştur. Bu durum gerek FESEM görüntülerinden görülmekte gerekse EDX analizleri ile doğrulanmaktadır. Özellikle Şekil 3.20 de alüminyum ikameli hamur da Al içeriğinin oranı yaklaşık %24 çıkarken, Şekil 3.19 da referans harçta Al oranı %13 oranının da tespit edilmiştir. İkame edilen Al nin EDX analizinde yüzde olarak fazla çıkması hamura yaptığı etkisinin bir göstergesidir.



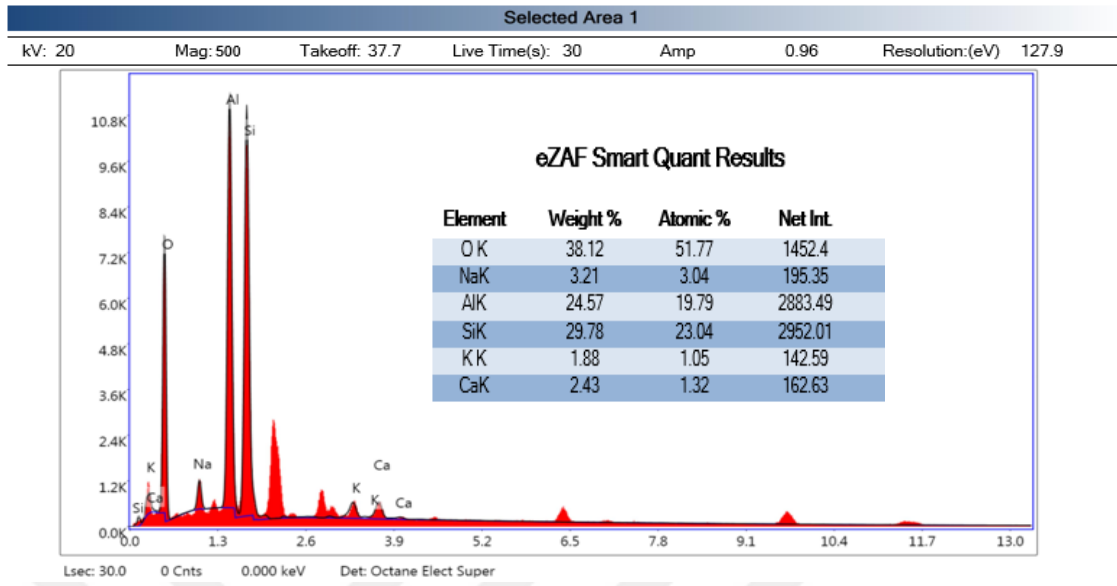
Şekil 3.17. %8 Na içeren Hafif Geopolimerlerin EDX Analizi



Şekil 3.18. %8 Na içeren, %1 AL ikameli Hafif Geopolimerlerin EDX Analizi



Şekil 3.19. 900°C Yüksek Sıcaklık Sonrası %8 Na içeren Hafif Geopolimerlerin EDX Analizi



Şekil 3.20. 900°C Yüksek Sıcaklık Sonrası %8 Na içeren, %1 Al ikameli Hafif Geopolimerlerin EDX Analizi

4. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında yapılan geopolimer harçların üretimleri yapılmış, akabinde numuneler gerekli deneylere tabi tutulmuştur. Bu kapsamda fiziksel özellikler, mekanik özellikler ve içyapı özellikleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

4.1.1. İşlenebilirlik Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Pomza agregalı taze hafif harçlarda alkali oranı arttıkça işlenebilirlik değerlerinde artış olmuştur. En iyi işlenebilirlik %12 Na içeren taze hafif harçlarda elde edilmiştir.
- Aliminyum tozu ilavesi işlenebilirlik değerlerinde olumlu sonuç vermiştir.
- Herbir alkali oranı göze alındığında en yüksek işlenebilirlik değerleri %2 AL ikame edilmiş (2A8N, 2A10N, 2A12N) harçlarda görülmüştür.

4.1.2. Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

- 24, 48 ve 72 saat ısıtma süreleri incelendiğinde en düşük birim ağırlık değerleri 72 saat sonunda elde edilmiştir.
- Alüminyum tozu ikamesi ile geopolimer taze harçlarda daha boşluklu bir yapı oluştuğu ve daha hafif bir yapı malzemesi elde edildiği görülmüştür.

- Herbir alkali oranında üretilen gruplarda (R1, R2, R3) alkali oranı arttıkça birim ağırlıklarda düşüşler olmuş ve daha hafif malzemeler üretilmiştir. Bu durum alkali ile alüminyum arasında beklenen bir durumdur.

4.1.3. Ultrasonik Atımlı Dalga Hızı Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Ultrasonik atımlı dalga hızı değerlerine göre beton zayıf ya da çok zayıf kalitesinde olduğu görülmüştür. Bu da üretilen hafif betonun düşük birim ağırlığını sağlamak için kullanılan yüksek boşluklu pomza agregası ile üretilmesine bağlanmaktadır.

4.1.4. Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri ile İlgili Sonuçlar

- Geopolimer hafif harçların eğilme dayanımları incelendiğinde % 8 Na oranı içeren harçlarda en yüksek eğilme dayanımı 2,2 MPa değeri ile 72 saat kür edilen 1A8N kodlu numune olmuştur. % 10 Na oranı içeren harçlarda en yüksek eğilme dayanımı 2,9 MPa değeri ile 48 saat kür edilen 1A10N kodlu numune olmuştur. % 12 Na oranı içeren harçlarda en yüksek eğilme dayanımı 3,2 MPa değeri ile 72 saat kür edilen R3 kodlu numune olmuştur.
- Geopolimer hafif harçların basınç dayanımları incelendiğinde % 8 Na oranı içeren harçlarda en yüksek basınç dayanımı 6,5 MPa değeri ile 48 saat kür edilen R1 kodlu numune olmuştur. % 10 Na oranı içeren harçlarda en yüksek basınç 8,8 MPa değeri ile 72 saat kür edilen R2 kodlu numune olmuştur. % 12 Na oranı içeren harçlarda en yüksek basınç dayanımı 8,5 MPa değeri ile 48 saat kür edilen R3 kodlu numune olmuştur. Özellikle %1 alüminyum ikameli 48 saat kür edilen harçlar tatmin edici basınç dayanımları sağlamıştır.

4.1.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Tayini Deneyi ile İlgili Sonuçlar

- Geopolimer harçların yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde genel eğilim 600 °C ye kadar sıcaklık artışı ile dayanımlarda azalmalar olduğu görülmüştür. Ancak 600 °C den 900 °C ye geçildiğinde geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımlarında artışların olduğu görülmektedir. Özellikle 1A8N kodlu geopolimer harcın 900 °C sonrası basınç dayanımı 9,4 MPa olarak elde edilmiştir. 2A8N kodlu karışımda 600 °C den

sonraki basınç dayanımı 1,7 MPa iken 900 °C sonrasında 4,1 MPa olarak elde edilmiştir. Böylece bu dayanım artışı %241 oranında artış ile en fazla artış gözlemlenmiştir. Bu durum pomza agregasında bulunan mikron seviyesindeki reaktif silise sahip partiküllerin uygun orandaki aktivatörler ile reaksiyonu ile açıklanabilmektedir.

4.1.6. FESEM İncelemeleri ile İlgili Sonuçlar

- 25 °C sonrasında elde edilen FESEM görüntülerinde reaksiyona girmemiş ya da kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül tanecikleri gözlemlenmiştir.
- Yüksek sıcaklık sonrası mikro çatlaklar, boşluklu yapı oluşumları görülmektedir. Özellikle 900 °C sonrası daha fazla boşluk ve çatlak oluşsa da genel yapıda daha yoğun ve sıkı bir matrix hamuru gözlenmektedir.
- 900 °C sonrası daha yoğun bir iç yapının meydana gelmiş olması basınç dayanımlarındaki artış ile paralellik göstermektedir.

4.2. Öneriler

1. Pomza agregasının geopolimer harç için kullanılmasında farklı sıcaklıktaki ısıtma kür denenebilir ve buna ilaveten mikrodalga kürü denenebilir.
2. Pomza agregası ile yüksek fırın cürufu, metekaolin gibi başka bağlayıcılar aktive edilerek denenebilir.
3. Pomza agregası ile üretilecek geopolimerler de farklı aktivatörler denenebilir.

KAYNAKLAR

1. Erdoğan, S. T., 2015. Beton. Ankara: Odtü Yayıncılık.
2. ASTM C618, 2014. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Material.
3. TS EN 197-1, 2012. Cement-composition, specifications and conformity criteria-part 1: common cements. Ankara: TSE.
4. Aruntaş, H.Y., 2006. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, **21** (1): 193-203.
5. Ferreira, C., Ribeiro, A., Ottosen, L., 2003. "Possible Applications for Municipal Solid Waste Fly Ash", **Journal of Hazardous Materials**, **96**(2-3) 201-216.
6. Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998. Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, ArGe, Ankara, 69s.
7. Karahan, O. , 2006. Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana, 256 s.
8. Topçu, İ.B., Canbaz, M., 2001. Uçucu kül kullanımının betonadaki etkileri. **Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi**, **14**(2):12-23.
9. V.M. Malhotra, 2022. Introduction: sustainable development and concrete technology, **ACI Concr. Int.** **24** (7).
10. X. Guo, H. Shi, W.A. Dick, Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer, **Cem. Concr. Compos.** **32**, 142–147, 201
11. M.J.A. Mijarsh, M.A. Johari, Z.A. Ahmad, Synthesis of geopolymer from large amounts of treated palm oil fuel ash: application of the Taguchi method in investigating the main parameters affecting compressive strength, **Constr. Build. Mater.** **52**, 473–481, 2014
12. J. He, Y. Jie, J. Zhang, Y. Yu, G. Zhang, Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites, **Cem. Concr. Compos.** **37**, 2013
13. J. Davidovits, 2011. Geopolymer Chemistry and Applications, third ed., Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, Juli.

14. Fernandez-Jimenez, A. M., Palomo, A., Lopez-Hombrados, C., 2006. Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. **ACI Materials Journal**, **103**(2), 106.
15. TS EN 206-1, Beton – Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2002.
16. Taşdemir C., Şengül Ö., “Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri”, Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, İstanbul, 21-23 Şubat 2013.
17. H. Eren, S. İlkentapar ve U. Durak , "Alkali ile Aktive Edilmiş EPS İkameli Harçların Mekanik Özelliklerinin, Isı Geçirimsizlik Özelliklerinin ve Yüksek Sıcaklığa Karşı Dirençlerinin Araştırılması", **Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, c. **10**, sayı. 4, ss. 1515-1526, Ara. 2021, doi:10.17798/bitlisfen.981443
18. S. İlkentapar and H. Eren , "EPS İle İkame Edilmiş Uçucu Küllü Geopolimer Hafif Harcın Fiziksel, Mekanik ve Isıl Geçirimsizlik Özelliklerinin İncelenmesi", **Academic Platform - Journal of Engineering and Science**, vol. **9**, no. 1, pp. 28-38, Jan. 2021, doi:10.21541/apjes.713547
19. Karakaş, H., İlkentapar, S., Durak, U., Örkmez, E., Özuzun, S., Karahan, O., & Atış, C. D. 2023. Properties of fly ash-based lightweight-geopolymer mortars containing perlite aggregates: Mechanical, microstructure, and thermal conductivity coefficient. **Construction and Building Materials**, **362**, 129717.
20. Örüç B., 2022. Genleştirilmiş Perlit ve Genleştirilmiş Kil Agregalı Hafif Geopolimer Harcın Üretimi ve Optimizasyonu, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli
21. TS EN 1015-3., 2000. Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara
22. E. A. Whitehurst, 1966. Evaluation of concrete properties from sonic tests, 2nd ed. Detroit: American Concrete Institute.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: ABDULLAHI NUR

BARKHADLE

Uyruğu: SOMALI

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans		
Lisans		
Lise		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2017-Halen		

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR