

**T.C.**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NEVŞEHİR TAŞI KESİM ATIĞININ GEOPOLİMER  
ÜRETİMİNDE GERİ DÖNÜŞÜMÜNÜN ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan**

**Tuğrul ÇAM**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yüksek Lisans Tezi**

**ŞUBAT 2022**

**NEVŞEHİR**

**T.C.**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NEVŞEHİR TAŞI KESİM ATIĞININ GEOPOLİMER  
ÜRETİMİNDE GERİ DÖNÜŞÜMÜNÜN ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan**

**Tuğrul ÇAM**

**Tez Danışmanı**

**Doç. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yüksek Lisans Tezi**

**ŞUBAT 2022**

**NEVŞEHİR**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK danışmanlığında Tuğrul ÇAM tarafından hazırlanan "Nevşehir Taşı Kesim Atığının Geopolimer Üretiminde Geri Dönüşümünün Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

07/02/2022

### JÜRİ

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Esen DAĞAŞAN

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEY

Üye : Doç.Dr.Zahide BAYER ÖZTÜRK

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Prof. Dr. Şahlan ÖZTÜRK  
Enstitü Müdürü

## TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Tuğrul ÇAM



## TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmalarım için büyük destek veren veemeğini esirgmeden beni yönlendiren saygıdeğer danıŐman hocam Doç. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK'e, tez çalıŐmalarım için laboratuvar ve ekipman desteği sağlayan Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEY hocama, Nevşehir Taşı kesim atıklarının temini için z Kapadokya SarıtaŐ (Nevşehir)firmasına (Merkez/Nevşehir), uçucu kül temininde yardımcı oldukları için Araz Metal Madencilik Tic.Ltd.Őti.'ye (İskenderun/Hatay), tez çalıŐmalarım için malzeme ve analiz desteği sağlayarak ABAP20F40numaralı proje ile çalıŐmalarımı yürütmeme destek veren Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel AraŐtırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma sürecinde ve her zaman beni destekleyen aileme ve sevgili eŐim Aybike ALBAYRAK AM'a sevgi ve teŐekkürlerimi sunarım.

Tuğrul AM

Şubat, 2022

# NEVŞEHİR TAŞI KESİM ATIĞININ GEOPOLİMER ÜRETİMİNDE GERİ DÖNÜŞÜMÜNÜN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

TUĞRUL ÇAM

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ

ŞUBAT 2022

## ÖZET

Bu çalışmada; Nevşehir taşı kesim atığı, uçucu kül ile üretilen geopolimer harçlara farklı oranlarda ikame edilerek oluşturulan geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Harçların üretiminde aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Üretilen numuneler 24 saat 90°C ısıtma küre tabii tutulmuştur. Taze harçlara yayılma tablası deneyi, sertleşmiş harçlara su emme ve boşluk oranı, eğilme, basınç dayanımı ve 400°C, 600°C ve 800°C’de yüksek sıcaklık deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca geopolimer harçlara Nevşehir taşı kesim atıklarının etkisini araştırmak için atıklara kimyasal analiz (XRF) ve kristal faz analizi (XRD) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonunda Nevşehir taşı kesim atıklarının % 40 oranına kadar kullanımının uçucu küllü geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirdiği görülmüştür.

*Anahtar Kelimeler:* Geopolimer, Taş kesim atığı, Dayanım

**Tez Danışmanı:** Doç. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK

**Sayfa sayısı:** 42

# INVESTIGATION OF THE RECYCLING OF NEVŞEHİR STONE CUTTING WASTE IN GEOPOLYMER PRODUCTION

(M. Sc. Thesis)  
Tuğrul ÇAM

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY  
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

FEBRUARY, 2022

## ABSTRACT

In this study; the physical and mechanical properties of the geopolymers formed by substituting Nevşehir Stone cutting waste into geopolymer mortars based flyash at different rates were investigated. Sodium hydroxide (NaOH) was used as an activator in the production of mortars. Produced samples were thermal cured at 90°C for 24 hours. Workability, unit weight and specific gravity, flexural strength, compressive strength, water absorption and porosity, and fire resistance tests (400°C, 600°C, and 800°C) were applied on the produced geopolymer mortars. In addition, the chemical analysis (XRF) and crystal phase analysis (XRD) of wastes were carried out to investigate the effect of Nevşehir Stone cutting wastes on geopolymer mortars. At the end of the experimental study, it was seen that the use of Nevşehir Stone cutting wastes up to 40% improved the physical and mechanical properties of flyash-based geopolymer mortars.

**Keywords:** *Geopolymer, Waste of Cuttingstone, strength*

**Thesis Supervisor:** Assoc.Prof.Dr.Zahide BAYER ÖZTÜRK

**Page Number:** 42

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI .....	ii
TEZ BİLDİRİM SAYFASI .....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xi
<b>1. BÖLÜM</b>	
<b>GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. BÖLÜM</b>	
<b>GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....</b>	<b>3</b>
2.1.Geopolimer.....	3
2.2.Nevşehir Taşı .....	6
<b>3. BÖLÜM</b>	
<b>MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>11</b>
3.1. Malzemeler.....	11
3.1.1. Uçucu Kül .....	11
3.1.2. Nevşehir Taşı Kesim Atığı.....	11
3.1.3. Dere Kumu .....	14
3.1.4. Aktivatör .....	14
3.1.5. Su.....	14
3.2. Numunelerin Hazırlanması .....	14
3.5.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	18
3.5.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi .....	19
3.5.3. Eğilme Dayanımı Deneyi.....	19
3.5.4. Basınç Dayanımı Deneyi .....	20
3.5.5. Su Emme, Boşluk Oranı Deneyi.....	21
3.5.6. Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Etkisi.....	21
3.5.7. Mikroyapı İncelemeleri.....	22



## **4. BÖLÜM**

<b>BULGULAR</b> .....	<b>23</b>
4.1. Yayılma Tablası (İşlenebilirlik) Deneyi Sonuçları .....	23
4.2. Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları .....	24
4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	25
4.4. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları .....	27
4.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi Sonuçları.....	29
4.7. Mikroyapı Analizi Sonuçları.....	31

## **5. BÖLÜM**

<b>SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>36</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>38</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>42</b>

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Uçucu Külün Kimyasal Analizi .....	11
Tablo 3.2. Taş Kesim Atıklarının Kimyasal Analizi .....	12
Tablo 3.3. Aktivatör Seçimi Ön Çalışması .....	16
Tablo 3.4. Taş Kesim Atıklarının Kıyaslamasının Ön Çalışması .....	16
Tablo 3.5. 125 Miron altı SNT ile Hazırlanan Karışımların Kıyaslanması .....	17
Tablo 3.6. Uygun Bağlayıcı/Su Oranının Tespiti.....	17
Tablo 3.7. Karışım Oranları .....	18
Tablo 4.1. Yayılma Çapları.....	23
Tablo 4.2. Numunelerin Birim Ağırlık Ve Yoğunlukları .....	25
Tablo 4.3. Sarı Taş Kırığı İçeren Numunelerin Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	26
Tablo 4.4. Kırmızı Taş Kırığı İçeren Numunelerin Eğilme Dayanımı Sonuçları.....	27
Tablo 4.5. Sarı Taş Kırığı İçeren Numunelerin Basınç Dayanımı Sonuçları.....	28
Tablo 4.6. Kırmızı Taş Kırığı İçeren Numunelerin Basınç Dayanımı Sonuçları.....	28
Tablo 4.7. Numunelerin Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı Sonuçları .....	30
Tablo 4.8. Numunelerin Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Sonuçları .....	30
Tablo 4.9. Numunelerin Su Emme, Boşluk Oranları .....	31

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Geopolimerler .....	3
Şekil 2.2. Portland Çimento .....	4
Şekil 2.3. Damat İbrahim Paşa Külliyesi .....	7
Şekil 2.4. Nevşehir Taşı Üretim Tesisi .....	7
Şekil 2.5. Nevşehir Taşı Uygulama Örnekleri .....	8
Şekil 3.1. Uçucu Kül .....	11
Şekil 3.2. Nevşehir Taşı Kesim Atıkları .....	12
Şekil 3.3. Kırmızı Nevşehir Taşı Kesim Atığının Faz Analizi .....	13
Şekil 3.4. Sarı Nevşehir Taşı Kesim Atığının Faz Analizi .....	13
Şekil 3.5. Dere Kumunu (0-3 mm) .....	14
Şekil 3.6. Sodyum Hidroksit .....	14
Şekil 3.7. Numune Hazırlama Aşamaları .....	15
Şekil 3.8. Kalıptan Çıkarılan Numuneler .....	15
Şekil 3.9. Yayılma Tablası (İşlenebilirlik) Deneyi .....	18
Şekil 3.10. Eğilme Dayanımı Deneyi .....	20
Şekil 3.11. Basınç Dayanımı Deneyi .....	20
Şekil 3.12. Su Emme, Boşluk Oranı Deneyi .....	21
Şekil 3.13. Yüksek Sıcaklık Fırını .....	22
Şekil 4.1. Yayılma Çapı Grafikleri .....	24
Şekil 4.2. Sarı Taş Kesim Atığı İçeren Numunelerin Eğilme Dayanımı Grafiği .....	26
Şekil 4.3. Kırmızı Taş Kesim Atığı İçeren Numunelerin Eğilme Dayanımı Grafiği .....	27
Şekil 4.4. Sarı Taş Kesim Atığı İçeren Numunelerin Basınç Dayanımı Grafiği .....	28
Şekil 4.5. Kırmızı Taş Kesim Atığı İçeren Numunelerin Basınç Dayanımı Grafiği .....	29
Şekil 4.6. Yangın Dayanımı Deneyi Sonrası Numuneler .....	29
Şekil 4.7. Referans Numunenin Mikroyapı Görüntüleri .....	32
Şekil 4.8. Mikroyapı Görüntüleri (10 SNT ve 10 KNT) .....	33
Şekil 4.9. Mikroyapı Görüntüleri (40 SNT ve 40 KNT) .....	33
Şekil 4.10. Mikroyapı Görüntüleri (30 KNT) .....	34
Şekil 4.11. Mikroyapı Görüntüleri (30 KNT) .....	35

## KISALTMALAR VE SİMGELER

<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbon dioksit
<b>CaO</b>	Kalsiyum Oksit
<b>Si</b>	Silis, Silisyum
<b>Al</b>	Alüminyum
<b>YFC</b>	Yüksek fırın cürufu
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Alüminyum Oksit
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silisyum Oksit
<b>NaOH</b>	Sodyum Hidroksit
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	Sodyum Silikat (cam suyu)
<b>MPa</b>	Mega Paskal
<b>M</b>	Molar
<b>MPC</b>	Magnezyum fosfat çimentosu
<b>MK</b>	Metakaolen
<b>µm</b>	Mikron metre
<b>TS-EN</b>	Türk Standartları- Avrupa Formu
<b>ASTM</b>	Amerikan Test ve Materyal Topluluğu
<b>g/cm<sup>3</sup></b>	Gram/santimetreküp
<b>N/mm<sup>2</sup></b>	Newton/milimetrekare
<b>N-C-A-S-H</b>	Sodyum Kalsiyum AlüminaSilikat Hidrat
<b>C-S-H</b>	Kalsiyum Silikat Hidrat
<b>SNT</b>	Sarı Nevşehir Taşı
<b>KNT</b>	Kırmızı Nevşehir Taşı
<b>UK</b>	Uçucu Kül

# 1. BÖLÜM

## GİRİŞ

Doğal kaynakların kontrolsüz tüketimi sonucu hammadde ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Doğal hammadde kaynaklarının sınırlı olması yeni hammadde kaynakları arayışını doğurmuştur. Bunun sonucunda katı atıkların alternatif hammadde olarak değerlendirilmesi gündeme gelmiştir. Bu katı atıkların depolanması çevresel sorunlar oluşturmasına rağmen; farklı sektörlerde değerlendirilmesi ile önemli kazançlar sağlanmaktadır. Bu atıkların geri kazanımı sırasında kullanılan teknolojinin ekonomik olması da önem taşımaktadır[1,2].

İnşaat sektörü göz önüne alındığında; çimento ve beton üretimi esnasında oldukça fazla miktarda sera gazı salınımı meydana gelmektedir. Bu gaz salınımının çevreye verdiği zarar düşünüldüğünde, endüstriyel ikincil ürünlerin kullanımı ve zehirli atıkların yapıya hapsedilerek ısıya ve aşınmaya dirençli malzemelerin üretimi ile birlikte geopolimerler bu tür problemlere alternatif çözümler sunabilmektedir. Geleneksel çimentoya kıyasla geopolimerlerin en önemli avantajı geopolimer üretiminde çok düşük miktarda CO<sub>2</sub> açığa çıkmasıdır. Geopolimer sentezi sırasında yüksek sıcaklıkta kalsinasyon basamağının olmaması bu avantajı doğurmaktadır. İnşaat sektörünün öneminin artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte daha hafif ve sağlam olan geopolimerlerin önemi de artmıştır[3,4].

Kapadokya bölgesinde taş işçiliğinin tarihi çok eski uygarlıklara kadar uzanmaktadır ve bölge için önemli bir potansiyele sahiptir. Bölgenin yaygın mimari malzemesi olan Nevşehir taşı, yörenin volkanik yapısından dolayı ocaktan çıktığında yumuşak yapıda olduğundan kolaylıkla işlenebilmektedir. Ancak hava ile teması sonrası sertleşerek çok dayanıklı bir yapı malzemesine dönüşmektedir. Kullanılan malzemenin çok miktarda olması ve kolay işlenebilmesinden dolayı yöreye has olan taş işçiliği, gelişerek mimari bir gelenek halini almıştır. Bölgede bu taşların üretiminin gerçekleştirildiği birkaç firma bulunmaktadır. Bu firmalarda taşların ürüne dönüştürülmesi aşamasında ortaya yüksek miktarda kesim atıkları çıkmaktadır[5,6].

Bu tez çalışmasında, uçucu kül ile üretilen geopolimerlerde, Nevşehir ilinde taş kesimi sonrası açığa çıkan Nevşehir taşı kesim atıklarının kullanımı ile geopolimer ürün özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Yüksek miktarda kesim atığının olduğu taş işletmesinden temin edilen kesim atıkları, geopolimer üründe uçucu kül yerine kullanılmıştır ve oluşturulan geopolimerlerin fiziksel ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. atıkların yanı sıra butaş kesim atığının da kullanılması sağlanarak geopolimer üretimi için alternatif bir hammadde kaynağı bulunmuştur. Bu sayede Nevşehir ilinde her yıl fazla miktarda açığa çıkan, taş ocaklarında üretim-kesim sahalarında bekletilen atıkların, alternatif hammadde olarak geopolimerlerde kullanımı sağlanmıştır. Böylece hem inşaat sektörüne hem de ülke ekonomisine önemli katkı verilmiştir.

## 2. BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

#### 2.1. Geopolimer

Geopolimerler (Şekil 2.1.), uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlerden elde edilip beton için geliştirilmiş olan alternatif bağlayıcılardır. Genellikle sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve sodyum hidroksit (NaOH) gibi aktivatörler ile uçucu kül (UK) gibi silis ve alüminyum açısından zengin endüstriyel atık malzemelerle reaksiyon sonucunda üretilir[7,8]. Kömür ile çalışan termik santrallerde fazla miktarda üretilen uçucu kül, beton üretiminden kaynaklı  $\text{CO}_2$  emisyonunu düşürmek için geopolimer üretiminde verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Geopolimerlerin üretiminde puzolanik özellik gösteren ve işletmelerde depolama sahası sorunu oluşturan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve taban külü gibi endüstriyel atıkların kullanılması geopolimerlerin çevreci beton olarak tanınmasına da olanak sağlamaktadır[9].



Şekil 2.1. Geopolimerler

Uçucu kül, geopolimer için önemli ana malzemelerden birini oluşturmaktadır. Bu kül, kömürün yanması ile oluşan, toz halinde atmosfere karışan, mikron boyutundaki taneciklerin termik santral bacalarındaki elektrostatik çöktürücü filtreler veya filtre torbaları tarafından tutulması ve uçucu kül silolarında istiflenmesiyle elde edilen endüstriyel bir atıktır[10].

Külün kimyasal bileşimi, kömürün inorganik mineral içeriğine bağlı olarak değişim gösterir. CaO içeriği %20'den büyük ise çimentolu malzeme, %10-20 arasında ise çimentolu ve puzolanik malzeme olarak sınıflandırılır. Geopolimerizasyon için, içeriği oluşturan malzemedeki silisyum ve alüminyum atomlarının çözünüp geopolimer harcın oluşması için alkali aktivasyon çözeltileri kullanılır[11,12].

Beton endüstrisinin, küresel ısınmaya etkisi olan temel faktörler arasında yer aldığı düşünülmektedir. Bu durum bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu (PÇ) (Şekil2.2.) kullanımıyla ilişkilidir. Çimento üretiminin, 2014 yılı üretim verilerine göre küresel anlamda CO<sub>2</sub>emisyoununun yaklaşık %8'inden sorumlu olduğu bilinmektedir [13].



**Şekil 2.2.**Portland Çimento

Son yıllarda, beton endüstrisinin çevresel etkilerini azaltmak amacıyla,PÇ'ye alternatif malzeme bulma arayışları hız kazanmıştır. Alümino-silikat kaynaklı malzemeleri (metakaolin, uçucu kül ve cüruf gibi) aktive eden aktivatörler ile üretilen yeni çevre dostu inorganik bağlayıcı olan geopolimer, son yıllarda PÇ'ye kıyasla alternatif olarak büyük ilgi görmüştür[14,15].

Çimento üretiminde, kireçtaşının 1500°C'de fırında kil ile kalsinasyonu sonucu oluşan klinker genellikle “CO<sub>2</sub> eşdeğeri” bazen de “gömülü karbon” olarak adlandırılan önemli bir sera gazı emisyonu kaynağıdır. Mevcut uygulamalarla üretilen her ton çimento için yaklaşık 900 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeri serbest kalmaktadır[16]. Klinker üretimi sırasında doğrudan kalsinasyondan oluşan CO<sub>2</sub>emisyounu, çimento üretiminden kaynaklanan emisyonların %50'sinden sorumludur. Kalan emisyonlar ise kalsinasyon için kullanılan fosil yakıtların yakılmasından ve ayrıca hafriyat yani ham maddenin elde edilmesi, paketlenme ve öğütme işlemlerinden kaynaklanmaktadır[17].

Standart betona kıyasla geopolimer beton, gömülü karbon veya sera gazını büyük ölçüde azaltmasının yanı sıra, uçucu kül ve cüruf gibi endüstriyel yan ürünlerin kullanılabilir olması ile inşaat sektöründe sürdürülebilirliğin artırılmasına önemli katkı sağlayabilmektedir [18].



Geopolimerlerin, beton endüstrisinin yanında farklı endüstriyel ve bilimsel alandaki kullanımları da araştırılmaktadır. Yanmaz ve yanıcı olmayan plastikler üretmek amacıyla organik geopolimer kimyasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan bu araştırmalar doğrultusunda, yüksek sıcaklık dayanımına sahip polimer üretiminde, uçak kabinleri ve pist alanlarında çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Yine yapılan bazı araştırmalara göre dekoratif taş ürünlerde, düşük teknoloji ürünü bina malzemelerinde, seramik karolarda, refrakter malzemelerde, biyoteknolojide, altyapı için kompozit malzemelerde, tamir ve güçlendirmede, otomobillerde, yüksek teknolojiye reçine ürünlerinde, radyoaktif ve toksik atık önlemede, eski tarihi yapı binalarda vb. alanlarda kullanıldığı tespit edilmiştir[19,20].

Geopolimer üretimine; hammadde, aktivatör cinsi, sıcaklık vb. birçok parametre etki etmektedir. Bu parametrelerin, geopolimer üretiminde etkilerinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur.

Bu çalışmalardan birinde Brough ve Atkinson; farklı yüksek fırın cürufalarının farklı aktivatörler (sodyum silikat ve potasyum hidroksit) ve oranları kullanarak, sodyum silikat içeren harçlarda basınç dayanımını 40 MPa'ya ulaştırmışlardır. Sodyum silikatla aktive edilmiş harçlar daha az boşluk oranı içerdiğinden yüksek dayanım gösterirken, potasyum hidroksit ile aktive edilmiş harçlar boşluk oranı yüksek olduğundan daha düşük dayanım göstermiştir[21]. Farklı aktivatörlerin kullanıldığı benzer bir başka çalışmada Kong ve Sanjayan; uçucu külü sodyum silikat ve potasyum hidroksit aktive ederek geopolimerler üretmişlerdir. Deneysel çalışmalarında, agrega boyutu, agrega tipi, numune boyutu ve süper akışkanlaştırıcı gibi parametrelerin yüksek sıcaklık (800°C) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ortam şartının ve karışım özelliklerinin aynı olduğu karışımlarda agrega boyutu 10mm üzerinde daha iyi dayanım göstermiştir. Geopolimer matris ve agregadaki termal uyumsuzluktan dolayı basınç dayanımlarında düşüşler olduğu belirtilmiştir[22].

Sıcaklığın etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada, Zuda ve arkadaşları; ısıya dayanıklı hafif agrega içeren alkali ile aktive edilmiş alüminosilikat kompozitlerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması sonucunda 800°C'de basınç dayanımının %35, eğilme dayanımının ise %66 oranında düştüğünü tespit etmiştir. 1200 °C de ise %30 oranında daha düşük çıktığı belirlenmiştir[23].

Farklı hammaddelerin kullanıldığı bir çalışmada, kireçtaşı tozu, C tipi uçucu kül ve su kullanılarak çimentosuz bir duvar elemanı üretilmiştir. Kireçtaşı tozu hacimce %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ile birlikte yeni karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar suyla karıştırılarak hamur kıvamındaki malzeme çelik kalıplar içinde 20 MPa basınç altında preslenerek sıkıştırılmıştır. 7, 28 ve 90 gün süresince kür yapılan numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Sonuç olarak kireçtaşına eklenen uçucu kül oranı arttıkça basınç dayanımlarının da önemli oranda arttığı gözlenmiştir. %30 uçucu kül ilavesiyle 28 ve 90 gün yaşlarında 15 ve 18 MPa dayanım elde edilmiştir[24].

Kür koşulları değişiminin incelendiği bir çalışmada, Coskun ve ark. uçucu kül bazlı alkali aktive edilen betonların basınç dayanımı ve ultrasonik ses geçirgenliğini değerlendirmiştir. Çalışmada, 60°C' deki kür sıcaklığında basınç dayanımında yüksek artış elde edilmiştir. Kür sıcaklığının artması ile basınç dayanımı değerleri ve ultrasonik ses geçirgenliği değerleri orantılı olarak artmıştır [25].

## **2.2. Nevşehir Taşı**

Doğal taşlar, eski çağlardan beri kullanılan en eski yapı malzemelerinden biridir. Dayanıklılık özelliği sebebiyle yapılarda tercih edilmektedir. Taşa özelliğini kazandıran doğal nitelikleri olan renk/desen, dayanım,değiştirilebilirlik ve fiyat avantajı sayesinde taşın kullanımı artmıştır. Devlet Planlama Teşkilatı'nın (DPT) yapmış olduğu genel tanımlamaya göre; yerkabuğundan çıkartılıp doğrudan veya işlenerek çeşitli amaçlarla yapılarda kullanılan taşlara doğal taş denilmektedir. Doğada bulunan kayaçların hemen hemen tümü bu tanıma göre doğal taş kapsamına girmektedir[26].

Erciyes Dağı ve Hasan Dağı'nın lavlarının çevreye yayılması sonucu doğal kaya şekilleri oluşmuştur. Yeryüzünde kalan tuf kayalar; rüzgâr, yağmur vb. doğa olaylarının sonucunda peri bacaları meydana gelmiştir. Yer altında kalan kısımlar ise; basınç, sıcaklık ve nem etkisi ile yapı elemanı olarak kullanılan çeşitli renklerdeki tuf kayalardır. Bu tuf kayaların özelliği, ocaktan çıkarken yumuşak ve nemli olması, kolayca işlenmesi, ocaktan sonra güneş ve havanın etkisiyle sertleşmesidir. Nevşehir taşı ile inşa edilen en önemli yapılardan biri de Nevşehir'deki Damat İbrahim Paşa Külliyesidir (Şekil 2.3.). Bu külliye yüzyıllar geçmesine rağmen özelliğinden hiçbir şey kaybetmemiş ve yapı malzemesi olan Nevşehir taşında en ufak bir yıpranma görülmemiştir[4].



**Şekil 2.3.**Damat İbrahim Paşa Külliyesi

Nevşehir’de tarihi çok eski uygarlıklara kadar uzanan yerleşimin en önemli özelliği taş işçiliğinde/üretiminde yaratılan mucizelerdir. Özellikle Ürgüp, Avanos, Uçhisar, Göreme, Ortahisar ve Mustafapaşa’da geçmişin ustalarından kalan tarihi evler, birer sanat eseri olarak göze çarpmaktadır [27].



**Şekil 2.4.** Nevşehir Taşı Üretim Tesisi (Taş İşletmesinden bir kesit)

Nevşehir taşı işçiliğinin en güzel örneklerini, Anadolu Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde görmek mümkündür. Nevşehir taşı; yalnızca yapım aşamasında değil, iç ve dış dekorasyonların da ana unsurudur (Şekil 2.4.). Geometrik örgüler, geçmeler, bitkisel bezemeler, alçak - yüksek kabartmalı hayvan figürleri ve palmetler en çok rastlanan bezemelerdir. Bu örneklerden bazıları Şekil 2.5’de görülebilmektedir. Mimaride kullanılan tuğlalarla da duvarları değişik şekillerde işlemişlerdir. Bu süslemeler daha çok açık koyu renkli tuğlaların geometrik şekillerde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Cami, türbe, kale gibi yapıtların dış duvar örgülerinde güzel örnekleri görülmektedir[27].



**Şekil 2.5.** Nevşehir Taşı Uygulama Örnekleri

### **2.3. Literatür Taraması**

Literatürde doğal taşların ve atıklarının farklı ürünlerin üretiminde kullanımı ile ilgili çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmalardan birinde, Demir ve Başpınar, mermer çökeltme havuzlarında biriken mermer tozlarının hafif duvar bloğu üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çökeltme havuzundan alınan örneklerin tane boyutu analizine göre mermer tozu 0–100 µm aralığındadır. Çalışmada kullanılan hammadde mermertozu, katkı ise genişletilmiş perlitir. Mermer tozuna gözenek oluşturmak amacıyla %2,5-5 oranında perlit katılmıştır. Mermer tozu, genişletilmiş perlit ve bağlayıcı olarak değişik oranlarda katılan kireç-alçı malzemeler önce kuru karışım yapılarak homojen şekilde sonra karışıma su ilavesi ile homojen ve plastik kıvama gelinceye kadar karıştırılmıştır. Örnekler kalıba döküldükten 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak mukavemet kazanmaları için nemli bez ile örtülerek 28 gün süre ile kür edilmiştir. Örneklerin fiziksel ve mekanik testler sonuçları incelenmiştir. Sonuç olarak, hafif beton duvar malzemeleri ile karşılaştırıldığında ekonomik şartlarda ve yeterli mekanik özellikleri sağlayan hafif duvar elamanı üretilebileceği belirlenmiştir[28].

Bir başka çalışmada, alkali aktivatör olarak 1,5,10 M NaOH ile mermer, traverten ve doğal puzolan atıkları kullanılarak geopolimer kompozit malzemeler (GCM) üretilmiştir. Kürlenme işlemi fırında 20, 45 ve 75 °C sıcaklıklarda 24 saat süreyle yapılmıştır. Daha sonra GCM'ler ıslak ve kuru duruma ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Mukavemet testleri kür periyodunun 2., 3., 7., 28. ve 90. günlerinde yapılmıştır. Numunelerin ıslak koşullarda basınç dayanımları zamana bağlı olarak azalırken, kuru koşullarda kür süresi ile artmıştır [29].

Granit kesim atıklarının değerlendirildiği bir çalışmada, toprak-çimento tuğlasının birleştirilmesinde çimentonun %5, %10 ve %20 oranında granit kesme tortusu ile değiştirilmesi ve %20, %30 ve %40 oranında toprağın tortu ile değiştirilmesi çalışılmıştır. Basınç dayanımı, özgül kütle, su emme ve dayanıklılık açısından incelemeler için 13 numune üretilmiştir. Granit kalıntı ile çimentonun %5 kısmi özgül kütle değişimine sahip karışım, su emme değerlerini referans tuğlaya yakın tutmanın yanı sıra, diğer karışımlardan daha düşük bir kütle kaybı ve üstün basınç dayanımı ile en iyi performansı göstermiştir. Referans ile ilgili özelliklerde önemli bir değişiklik olmaksızın, toprağı %20'ye kadar granit kesim kalıntısı ile değiştirmek mümkün olmuştur. Toprak ve çimentonun kısmen granit kesme kalıntısı ile değiştirilmesiyle toprak-çimento tuğla üretiminin uygulanabilirliği, özelliklerde bir gelişme olduğunda, kalıntı malzemenin uygun bir varış noktasına izin verdiği sonucuna varılarak uygulanabilir ve sürdürülebilir bir alternatif olduğu tespit edilmiştir [30]. Granit kesim atıklarının kullanıldığı bir başka çalışmada kesim atıkları %10 Portland çimentosu yerine kullanılarak sürdürülebilir ekolojik çimento elde edilmiştir. 15 µm'yi geçmeyen atığın kullanımı ile hidrasyon reaksiyonundan sonra Kalsiyum Silikat Hidrat (C-S-H) jellerinin ve çift katmanlı hidroksit gibi reaksiyon ürünlerinin yüksek oranda oluşabildiği tespit edilmiştir [31].

Taş kesim atıklarının değerlendirildiği bir çalışmada, Brezilya'da her gün yaklaşık 365 ton açai taşı, işlenmesi sırasında büyük miktarlarda atık oluşturduğundan, 1:2:0.45 (çimento:kum:su) referans karışımına sahip yapısal harçların geliştirilmesinde, dolgu işlevine sahip doğal kumda %25'lik bir ikame olarak açai taşı kullanma potansiyelini değerlendirilmiştir. Oran olarak 1:1.5:0.5:0.45 (çimento:kum:açaitaşı:su) kullanılmış olup, değerlendirme için referans (taş ilavesiz) ve doğal taş ilaveli (işlemsiz ve NaOH ile muamele edilmiş) olmak üzere üç farklı harç yapılmıştır. Taşların eklenmesinden sonra taze harçlarda kıvam, su tutma, yoğunluk, sertleştirilmiş durumda değerlendirme için, basınç dayanımı ve yoğunluk testleri yapılmıştır. Basınç dayanımı testlerinde, doğal ve işlenmiş taş ilaveli harçların 6,25 MPa'dan (referans), 5,55 MPa'ya (doğal taş) ve 1,89 MPa'ya (işlenmiş taş) düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Değerlendirmeler, harçların belirli yapısal uygulamalar için bir potansiyel olduğunu göstermiş, tüm testlerde doğal taşla yapılan bileşim, bu atıkların atılmasından kaynaklanan çevresel etkilerin çözülmesine yardımcı olmanın yanı sıra Brezilya standardına göre ideal parametreler dâhilindedir. Basınç dayanımı düşük bir harç olduğu için yük talebinin az olduğu bölgelerde kiriş, döşeme ve kolonların kalıplama aşamasında ortaya çıkan belirli yapısal kusurların onarılması amacıyla uygulanması önerilmiştir [32].

Kamiloğlu, Yurdağul ve Tekin; toz haldeki Bayburt Taşı'ını kireçli zemin stabilizasyonunda kullanmış ve yol altı stabilizasyon malzemesi olarak uygunluğunu çalışmışlardır. Bu çalışmada farklı oranlarda Bayburt Taşı'ını yol altı temel malzemesi için kullanılan kil+kireç karışımlarına ilave olarak karıştırmışlardır. Elde edilen malzemelerin optimum su muhtevalarını belirledikten sonra standart zemin deneyleri ile karakterizasyon işlemleri yapılmıştır. Çalışmanın sonunda kesme kutusu ve tek yönlü basınç deneyleri de gerçekteştirilmiştir. Sonuç olarak Bayburt Taşı farklı oranlarda kullanıldığında ağırlıkça %10'a kadar kesme ve basınç dayanımlarında artış göstermiştir[29].

Başka bir çalışmada, Bayburt taşı atıklarının geopolimer tuğla üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Taze haldeki geopolimer hamurların standart kıvam ile priz süreleri deney sonuçlarına göre Bayburt Taşı oranı arttıka çözeltili ihtiyaçı artmıştır. Geopolimer hamurlarda BT taşının işlenebilirliği zorlaştırarak yayılmayı azalttığı görölmüştür. Geopolimer hamurlarda BT oranı artması su emme oranını arttırmıştır. Yüksek sıcaklığın geopolimer tuğlanın dayanımına olan etkisi araştırmak için yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara bakıldığında sıcaklık artıka dayanım düştüğü görölmüştür. Üretilengeopolimer tuğla malzemesinin, mevcut duvar elamanlarına nispeten daha yüksek dayanım, daha hafif, daha gözenekli yapıda oldukları ortaya çıkmaktadır[33].

Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, taş kesim atıklarının hafif duvar bloğu, kompozit malzeme, tuğla bileşeni, yol stabilizasyon malzemesi gibi uygulama alanlarında kullanımının incelendiği görölmektedir. Ayrıca incelenen çalışmaların genel olarak son birkaç yıl içinde yapıldığı, taş kesim atıklarının ciddi bir çevresel sorun teşkil ettiği ve yeni yapılacak çalışmaların bu yönde araştırma-geliştirmeye araştırmacıları sevk ettiği öngörölmektedir. Tez çalışmamızda Nevşehir taşı kesim atıkları ile oluşturulan bu ürünler için standart özellikleri bozmadan ürün maliyetini düşürmek ve ilimizde üretim gerçekteştiren taş ocaklarında oluşan atıkların geopolimer ürünlerde kullanılan malzemeler (uçuocu kül) yerine ilave edilmesi ile numunelerin ağırlık, dayanım, su emme, mikroyapı üzerine etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

### 3. BÖLÜM

#### MATERYAL VE YÖNTEM

##### 3.1. Malzemeler

Geopolimer ürün üretiminde kül, dere kumu ve Nevşehir’de taş üretimi yapan Özkapadokya firmasından temin edilen taş kesim atıkları kullanılmıştır.

##### 3.1.1. Uçucu Kül

Geopolimer karışımlarında Araz Metal Madenciliğin yardımıyla (İskenderun) Sugözü Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. Bu külün kimyasal analizi Tablo 3,1.’de, toz görüntüsü ise Şekil 3.1’dedir[6].

**Tablo3.1.**Uçucu Külün Kimyasal Analizi [6]

İçerik (%)	Sugözü Uçucu Kül
SiO <sub>2</sub>	60,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,69
CaO	1,52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,85
K <sub>2</sub> O	2,58
MgO	1,65
Na <sub>2</sub> O	0,92
SO <sub>3</sub>	0,53



**Şekil 3.1.** Kullanılan Uçucu Kül

##### 3.1.2. Nevşehir Taşı Kesim Atığı

Nevşehir taşı üretiminin gerçekleştirildiği işletmelerde, taşların gelen talebe göre ürüne dönüştürülmesi aşamasında ortaya kesim atıkları çıkmaktadır. Yüksek miktarda kesim atığının olduğu işletmeden temin edilen atıklar ile geopolimer numuneler elde edilmiştir.



**Şekil 3.2.** Nevşehir Taşı Kesim Atıkları

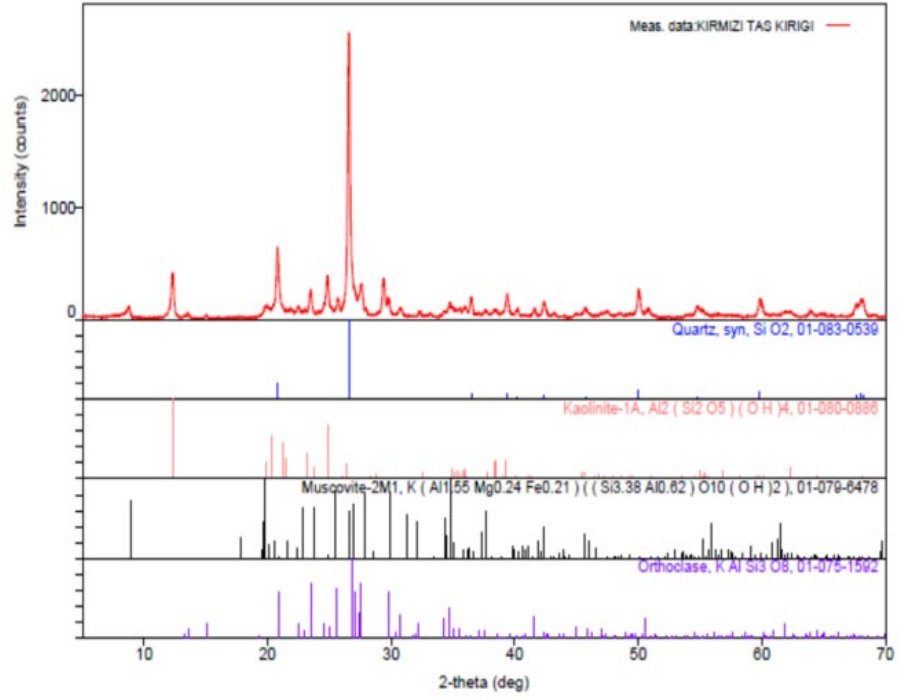
Geopolimer karışımlarında alkali ile aktive etmek amacıyla taş kesim atıkları; Özkapodokya (Nevşehir) firmasından sarı ve kırmızı taş kırıkları olarak temin edilmiş, ön denemelerde 250 µm altı olacak şekilde elenerek kullanılmış ve esas denemeler için atıklar BC Teknoloji (Nevşehir) firmasında halkalı değirmende 125µm altına gelecek şekilde öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada kullanılan sarı (SNT) ve kırmızı taş (KNT) kesim kırığı tozlarının XRF metodu ile tespit edilen kimyasal analizi Tablo 3.2.' dir.

Kimyasal içerikleri incelendiğinde; KNT'nin yaklaşık %80, SNT'nin ise yaklaşık %85'inin  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluştuğu görülmektedir. Kesim atıklarının XRD ile yapılan faz analiz sonuçları Şekil 3.3-3.4'de verilmiştir. Kırmızı taş kesim atığında kuvars, kaolinit, muskovit ve ortoklas fazları; sarı taş kesim atığında kuvars, dicit, nefelin ve ortoklas fazları tespit edilmiştir.

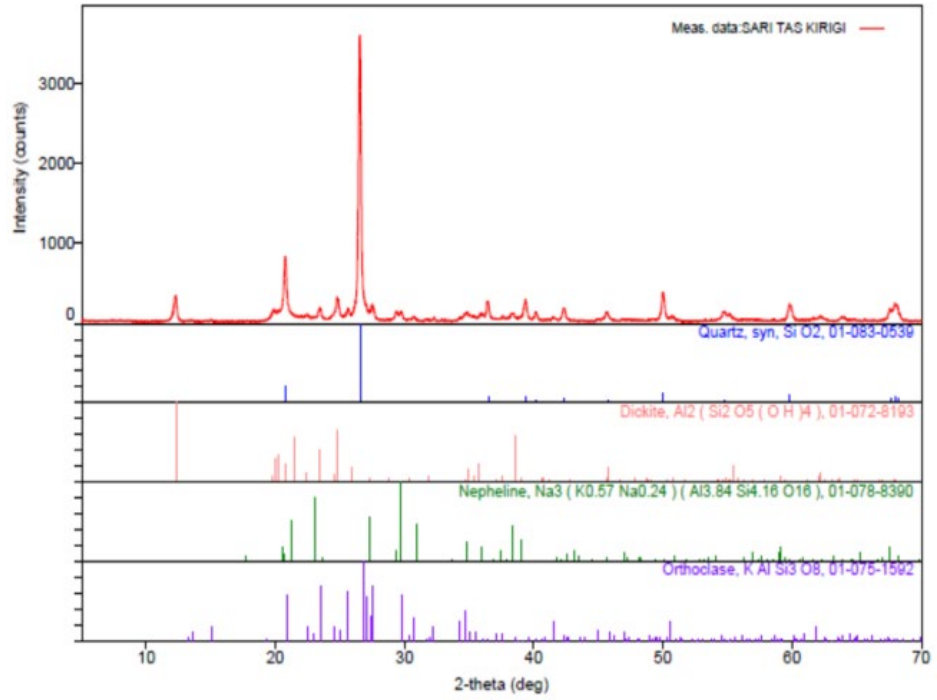
**Tablo 3.2.** Taş kesim atıklarının kimyasal analizi

Kimyasal Analiz (%)	SNT	KNT
$\text{SiO}_2$	70,14	65,39
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14,48	15,64
CaO	2,12	4,31
$\text{K}_2\text{O}$	3,00	4,45
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,23	1,57
$\text{TiO}_2$	0,26	0,33
$\text{CO}_2$	7,99	7,42
$\text{SO}_3$	0,69	0,08
MgO	-	0,42
$\text{P}_2\text{O}_5$	-	0,18
BaO	-	0,15
MnO	-	0,06





Şekil 3.3. Kırmızı taş kesim atığının faz analizi



Şekil 3.4. Sarı taş kesim atığının faz analizi

### 3.1.3. Dere Kumu

Bu çalışmada 0-3 mm dere kumu kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Dere Kumu (0-3 mm)

### 3.1.4. Aktivatör

Çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Beyaz renklidir (Şekil 3.6.). Suda eritilerek kullanılan sodyum hidroksit, bağlayıcıyı aktive etmek amacıyla kullanılmıştır. Suda eriyen aktivatör kolayca çözünmekte ve tepkime sonucu ekzotermik reaksiyona girerek yüksek ısı vermektedir.



Şekil 3.6. Sodyum Hidroksit

### 3.1.5. Su

Çalışmada şebeke suyu (içilebilir musluk suyu) kullanılmıştır.

## 3.2. Numunelerin Hazırlanması

Malzemeler, karışım oranları belirlenerek karıştırma kabına boşaltılıp mikserde TS EN 196-1 standardına göre 4 dakika karıştırılmıştır. Ardından kalıplara dökülen karışım 24 saat 90°C fırında ısıl küre tabi tutulmuştur. Geopolimer harçların hazırlama aşamaları Şekil 3.7.'de verilmiştir. Son olarak numuneler kalıptan çıkarılıp dinlenmeye alınmıştır (Şekil 3.8.).



Şekil 3.7. Numune Hazırlama Aşamaları



Şekil 3.8. Kalıptan Çıkarılan Numuneler

### 3.3. Ön Deneme Çalışmaları

Öncelikle aktivatör türünü belirleyebilmek için sarı taş kesim atığı ile denemelere başlanarak %25 ve %50 oranında uçucu kül yerine ilavesi yapılarak Tablo 3.3'de sunulan dört karışım hazırlanmıştır. Aktivatör olarak sodyum silikata kıyasla NaOH kullanımının basınç ve eğilme dayanım değerlerini bir miktar arttırmış olması nedeniyle aktivatör olarak NaOH seçilmiştir. Aktivatör seçiminden sonra, kırmızı ve sarı renkteki Nevşehir taşı kesim atıklarını kıyaslamak için her biri 250 mikron elekten elenerek 4 karışım hazırlanmış ve dayanım sonuçları kıyaslanmıştır (Tablo 3.4.).

İki taş kesim atığının uçucu kül yerine kullanımının basınç ve eğilme dayanımlarına etkisi üzerine net bir ayırım yapılamadığı için sonraki denemeler için nispeten yüksek değerlerin elde edildiği sarı taş kesim atığı esas alınarak taş kesim atığının 125 mikron altına öğütülerek uçucu kül yerine kullanımının etkisi incelenmiştir (Tablo 3.5.). Ayrıca %100 kırmızı ve sarı taş kesim atıkları ile harç hazırlanmış fakat işlenebilirliği çok düşük olup, kalıp içerisinde yayılmadığı için dökülememiş ve bu nedenle numune oluşturulamamıştır. 125 mikron altına öğütülen sarı taş kesim atığının kullanımı ile Tablo 3.4’de elde edilen dayanım değerlerine kıyasla ve %100 uçucu külün kullanıldığı numuneye kıyasla daha yüksek değerler elde edilmiştir. Son olarak uygun su bağlayıcı oranını tespit edebilmek için referans olarak göz önüne alınan %100 uçucu külün kullanıldığı karışımlar üzerinde dayanım değerleri kıyaslanmıştır (Tablo 3.6).

**Tablo 3.3.** Aktivatör Seçimi Ön Çalışması

Karışım No	Uçucu Kül,g	SNT,g	Kum,g	Aktivatör Tipi	Aktivatör Oranı,g	Su,g	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	337,5	112,5	1350	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	228	41	2,30	7,80
2	225	225	1350	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	228	41	2,20	7,70
3	337,5	112,5	1350	NaOH	81	203	3,04	11,80
4	337,5	225	1350	NaOH	81	203	2,10	7,80

**Tablo 3.4.** Taş Kesim Atıklarının Kıyaslamasının Ön Çalışması

Karışım No	Uçucu kül,g	Atık,g	Kum,g	Aktivatör Oranı,g	Su,g	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
1	337,5	112,5 SNT	1350	81	203	3,04	11,80
2	225	225 SNT	1350	81	203	2,10	7,80
3	337,5	112,5 KNT	1350	81	203	1,85	9,50
4	337,5	225 KNT	1350	81	203	1,79	11,20

**Tablo 3.5.** 125 Mikron Altı SNT ile Hazırlanan Karışımların Kıyaslaması

<b>Karışım No</b>	<b>Uçucu kül,g</b>	<b>SNT,g</b>	<b>Kum,g</b>	<b>Aktivatör Oranı,g</b>	<b>Su,g</b>	<b>Eğilme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>
<b>1</b>	450	0	1350	81	203	1,03	8,50
<b>2</b>	405	45	1350	81	203	1,64	10,00
<b>3</b>	112,5	112,5	1350	81	203	2,34	12,50
<b>4</b>	225	225	1350	81	203	1,89	12,10

125 mikron elekte elenen Nevşehir taşı kesim atığının dayanımı arttırdığı görüldükten sonra karışıma katılan su oranını düşürerek ve NaOH oranını artırarak dayanımın değişimi incelenmiştir. Numunelerde 72gr NaOH+180gr Su(10M) veya 87gr NaOH+180 gr Su(12M) kullanılmıştır. 12M NaOH kullanılan numunenin dayanımının arttığı gözlemlenmiştir.

**Tablo 3.6.** Uygun Bağlayıcı/Su Oranının Tespiti

<b>Karışım No</b>	<b>Uçucu kül,g</b>	<b>Kum,g</b>	<b>Aktivatör Oranı,g</b>	<b>Su,g</b>	<b>Eğilme Dayanımı (MPa)</b>	<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>
<b>1 (10M)</b>	450	1350	72	180	1,01	8,50
<b>2 (12M)</b>	450	1350	87	180	1,39	12,70

### 3.4. Deneysel Çalışmalar

Ön çalışmalarda elde edilen basınç-eğilme dayanım sonuçları göz önüne alındığında, geopolimer harç numuneleri oluşturmak için uygun su/bağlayıcı oranı (180/87), su/kum oranı ( $180/450=0,40$ ) aktivatör tipi (NaOH), uçucu kül yerine 125 mikron altı taş kesim atıklarının (sarı-kırmızı) kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. %50 SNT kullanımı ve diğer karışımlarda da %50 KNT kullanımında dayanım değerlerinin düşüşe geçtiği tespit edildiği için deneysel çalışmalar için karışımlara 125 mikron altı %10-20-30-40 taş kesim atıklarının kullanımları ile devam edilmesine karar verilmiştir ve Tablo 3.6 da verilen karışımlar hazırlanmıştır. Uçucu külün %100 olarak kullanıldığı karışım referans (100UK) olarak alınmıştır.

**Tablo 3.7.** Karışım oranları

Numune Kodu	KNT	SNT	Kum	UK	NaOH	Su
100 UK	-	-	1350	450	87	180
10 KNT	45	-	1350	405	87	180
20 KNT	90	-	1350	360	87	180
30 KNT	135	-	1350	315	87	180
40 KNT	180	-	1350	270	87	180
10 SNT	-	45	1350	405	87	180
20 SNT	-	90	1350	360	87	180
30 SNT	-	135	1350	315	87	180
40 SNT	-	180	1350	270	87	180

### 3.5. Deney Yöntemleri

#### 3.5.1. Yayılma Tablası Deneyi

Geopolimer karışımların işlenebilirliğini test etmek amacıyla TS EN 1015-3 Standardı'na uygun olarak yayılma tablası kullanılır. 300 mm çaplı tablanın üzerine ağız açık yerleştirilen koninin içerisine taze harç doldurulur. Kalıp düzgünce kaldırıldıktan sonra taze harç, saniyede 1 kez olacak şekilde 15 kez düşürülür. Son olarak yayılma çapı kumpas ile ölçülür [6]. Deney düzeneği Şekil 3.8.'de verilmiştir.



**Şekil 3.9.** Yayılma Tablası (İşlenebilirlik) Deneyi

### 3.5.2. Birim Ağırlık ve Özgül Ağırlık Deneyi

Sertleşmiş harçların kuru yoğunluk, görünür yoğunluk, doymun kuru yüzey yoğunluk ve görünür birim ağırlık değerleri ASTM C 642'ye göre Bağıntı 1, Bağıntı 2, Bağıntı 3 ve Bağıntı 4 ile belirlenmiştir[34].

$$\text{Görünür birim ağırlık} \left( \frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{Mk}{\text{Numune boyutları}} (1)$$

$$\text{Görünür yoğunluk} \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Mk}{Mk - Msu} (2)$$

$$\text{Kuru yoğunluk} \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Mk}{Md - Msu} (3)$$

$$\text{Kuru yüzey doymun yoğunluk} \left( \frac{gr}{cm^3} \right) = \frac{Md}{Md - Msu} (4)$$

Mk: Etüvden sonraki kuru ağırlık (g)

Md: Kuru yüzey doymun ağırlık (g)

Msu: Su içindeki ağırlık (g)

### 3.5.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

Geopolimer numunelere TS EN 1015-11 standardına göre eğilme dayanımı deneyi uygulanır. Mesnet açıklığı 100 mm, yükleme hızı 50 N/s olacak şekilde tek noktadan yükleme yapılarak 3 numunenin ortalama sonucu eğilme dayanımı değeri Bağıntı 5'e göre hesaplanır [34]. Eğilme dayanımı test cihazı Şekil 3.10.'da verilmiştir.

$$\text{Eğilme mukavemeti} \frac{N}{mm^2} = 1,5 * \frac{F * l}{b^3} (5)$$

F: Prizmanın ortasına uygulanan kuvvet (N)

l: Destek silindirleri eksenleri arasındaki mesafe (100mm)

b: Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (40 mm)



Şekil 3.10. Eğilme Dayanımı Deneyi

#### 3.5.4. Basınç Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyi sonucunda ikiye bölünen harç numunelerinin düzgün olarak çıkan kalıp yüzeyine basınç dayanımı deneyi, TS EN 1015-11 standardına göre uygulanır (Şekil3.11.). Test cihazı başlığı arasına yerleştirilen 500 N/s hızda yük uygulanmış numuneler için basınç dayanım hesabı Bağıntı 6 ile hesaplanır[34].

$$\text{Basınç dayanımı} \left( \frac{N}{mm^2} \right) = \frac{F}{b^2}(6)$$

b: basınç plakasının kenar uzunluğu (40 mm)

F:Kırılmadaki en büyük kuvvet (N)



Şekil 3.11. Basınç Dayanımı Deneyi



### 3.5.5. Su Emme, Boşluk Oranı Deneyi

Sertleşmiş numunelere ait su emme ve boşluk oranları deneyi, kür sonrasında 40×40×160 mm'lik prizma numunelere Arşimet terazisi yardımıyla (Şekil 3.12.) su içinde ağırlık ölçümü yapılarak Bağıntı 7 ve 8 yardımı ile su emme ve boşluk oranı belirlenir.

$$\text{Boşluk oranı (\%)} = \frac{Md - Mk}{Md - Msu} * 100 \quad (7)$$

$$\text{Su emme oranı (\%)} = \frac{Md - Mk}{Mk} * 100 \quad (8)$$

Mk: Etüvden sonraki kuru ağırlık (g)

Md: Kuru yüzey doymun ağırlık (g)

Msu: Su içindeki ağırlık (g)



Şekil 3.12. Su Emme, Boşluk Oranı Deneyi

### 3.5.6. Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Etkisi

Yüksek sıcaklığa maruz kalan beton veya geopolimer malzeme yüzeylerinde fiziksel değişim ve mekanik yapı değişimleri meydana gelir. Bu değişikliklere bağlı olarak çatlama, parça atma ve renk değiştirme gibi olaylar oluşmaktadır[9]. Bu özellikleri tespit edebilmek için Şekil 3.13'de görülen yüksek sıcaklık fırınında 5°C/dk sıcaklık artışı ile 60 dakika 400, 600 ve 800°C'de ayrı ayrı yüksek sıcaklığa numuneler maruz bırakılarak ortam sıcaklığında eğilme ve basınç dayanım kayıpları test edilmektedir [34].



**Şekil 3.13.** Yüksek Sıcaklık Fırını

### **3.5.7. Mikroyapı İncelemeleri**

Uçucu kül yerine Nevşehir Taşı Kesim Atığı ilavesi ile hazırlanan geopolimer numunelerin içyapılardaki kristal oluşumu ve morfoloji değişimine nasıl bir etkide bulunduğunu araştırmak için taramalı elektron mikroskobu ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Numunelerden kırık yüzey parçaları alınarak mikroyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

## 4. BÖLÜM

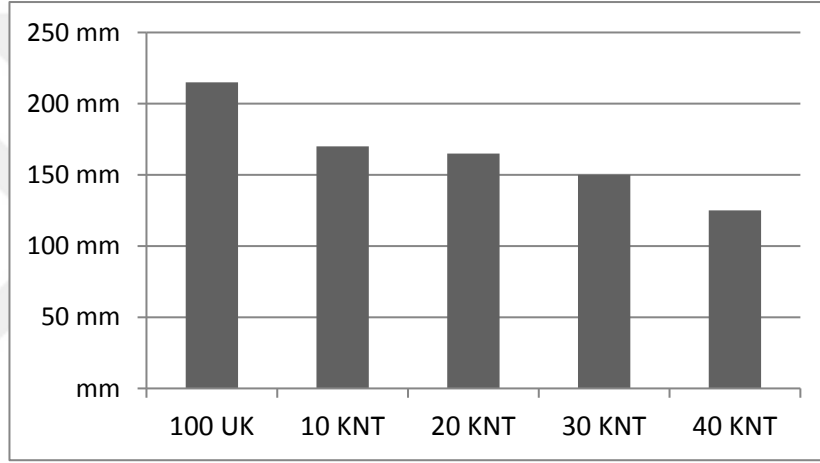
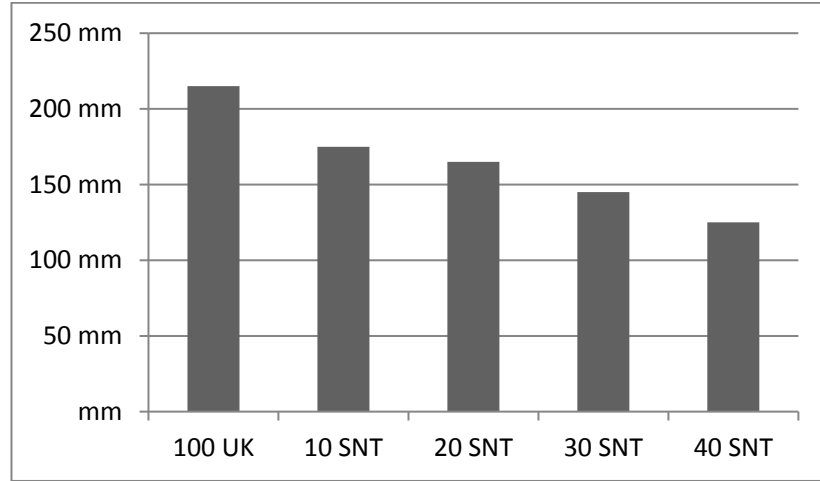
### BULGULAR

#### 4.1. Yayılma Tablası (İşlenebilirlik) Deneyi Sonuçları

Çalışmada üretilen harçlara yayılma tablası deneyi uygulanmıştır ve sonuçlar Tablo4.1’de verilmiştir. Farklı oranlarda üretilen geopolimer harçlarda en yüksek yayılma çapı değeri 100 UK’de 215 mm olarak ulaşılmıştır. En düşük yayılma çapı değeri ise yaklaşık 90 mm fark ile 40 SNT ve 40 KNT numunelerinde 125 mm olarak ölçülmüştür(Şekil 4.1.). Genel olarak SNT ve KNT oranı arttıkça yayılma çapı değerlerinde belirgin bir düşüş görülmektedir. SNT ve KNT oranının artması ile birlikte yayılma çapının düştüğü, dolayısıyla hazırlanan harcın işlenebilirliğinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, taş atıklarının içeriğindeki uçucu küle kıyasla biraz yüksek olan CaO miktarına da bağlı olarak daha çok su emme eğiliminin olması ile açıklanabilir.

**Tablo 4.1.** Yayılma Çapları

Numune	Yayılma Çapı
100 UK	215 mm
10 SNT	175 mm
20 SNT	165 mm
30 SNT	145 mm
40 SNT	125 mm
10 KNT	170 mm
20 KNT	165 mm
30 KNT	150 mm
40 KNT	125 mm



**Şekil 4.1.** Yayılma Çapı Grafikleri

#### 4.2. Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Nevşehir taşı kesim atığı ile referans geopolimer harç numunelerinin etüvde 24 saat ısıtma kürlenmesini tamamladıktan sonra ortam sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiştir. Numunelerin görünür birim ağırlık, görünür yoğunluk, kuru yoğunluk ve doymuş kuru yüzey yoğunluk değerleri ASTM C 642'ye göre ölçülmüş ve Tablo4.2.'de verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Numunelerin Birim Ağırlık ve Yoğunlukları

<b>Birim Ağırlık ve Yoğunluk(g/cm<sup>3</sup>)</b>				
<b>Numune</b>	<b>Görünür Birim Ağırlık</b>	<b>Görünür Yoğunluk</b>	<b>Kuru Yoğunluk</b>	<b>Doygun Kuru Yoğunluk</b>
<b>100 UK</b>	2,11	2,38	2,07	2,20
<b>10 SNT</b>	2,16	2,41	2,09	2,22
<b>20 SNT</b>	2,14	2,43	2,06	2,20
<b>30 SNT</b>	2,10	2,37	2,05	2,19
<b>40 SNT</b>	2,12	2,40	2,05	2,18
<b>10 KNT</b>	2,18	2,39	2,08	2,21
<b>20 KNT</b>	2,14	2,38	2,05	2,21
<b>30 KNT</b>	2,10	2,40	2,03	2,18
<b>40 KNT</b>	2,10	2,41	2,02	2,18

Referans karışımın görünür birim ağırlığı 2,11 g/cm<sup>3</sup> ve görünür yoğunluğu 2,38 g/cm<sup>3</sup>olarak ölçülmüştür. %10, 20, 30 ve 40 sarı taş atığı içeren geopolimer numunelerin görünür birim ağırlıkları sırasıyla 2,16; 2,14; 2,10 ve 2,12 g/cm<sup>3</sup>'tür. Görünür yoğunlukları ise sırasıyla 2,41; 2,43; 2,37 ve 2,40 g/cm<sup>3</sup> ölçülmüştür. Kuru yoğunluk ve doymuş kuru yoğunluk değerleri de referans numuneye benzer eğilim sergilemiştir. %10, 20, 30 ve 40 kırmızı taş atığı içeren geopolimer numunelerin görünür birim ağırlıkları sırasıyla 2,18; 2,14; 2,10 ve 2,10g/cm<sup>3</sup>'tür. Görünür yoğunlukları benzer eğilim sergilemiştir.

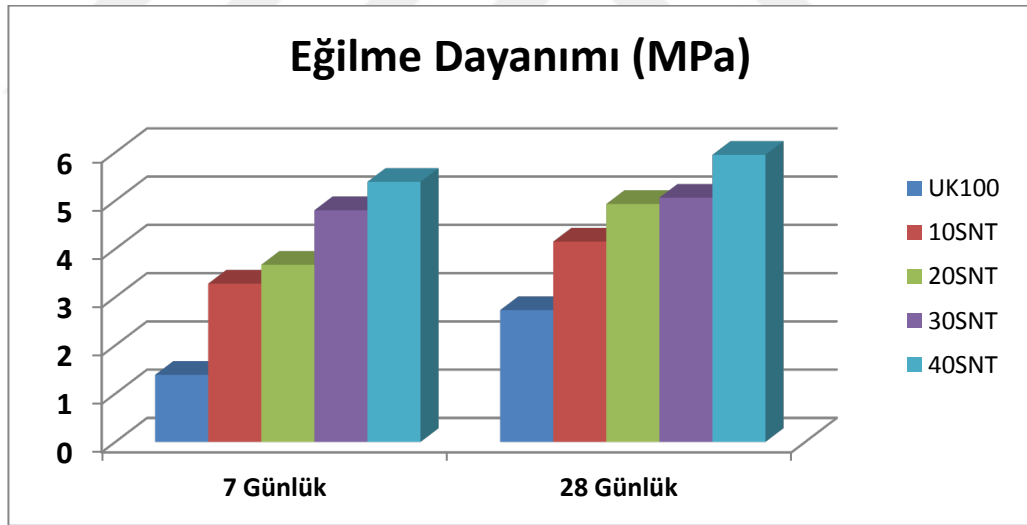
### **4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları**

Isıl kür sonrası 7-28 günlük numunelerin eğilme dayanımları arasındaki farklılıklar Tablo4.3-4.4'de incelenmiştir. Uçucu kül yerine ilave edilen sarı taş ve kırmızı taş kırığı miktarının artışı ile eğilme dayanımı değerlerinin referansa kıyasla Şekil 4.2. ve 4.3'de arttığı görülebilmektedir. En yüksek eğilme dayanımı 40 SNT ve 40 KNT numunelerinde elde edilmiştir.

**Tablo4.3.**Sarı Taş kırığı İçeren Numunelerin Eğilme Dayanımı Sonuçları

Numune	Max Gerilme (Eğilme Dayanımı)	Max Gerilme (Eğilme Dayanımı)
	7 Günlük	28 Günlük
100 UK	1,39 MPa	2,73MPa
10 SNT	3,28 MPa	4,15 MPa
20 SNT	3,67 MPa	4,93MPa
30 SNT	4,80 MPa	5,06MPa
40 SNT	5,39 MPa	5,95MPa

Numuneler hazırlandıktan sonra bekleme süresinin dayanım değerlerine olan etkisini incelemek için; 7 gün ve 28 gün sonunda numuneler kıyaslanmıştır. 28 gün sonra test edilen numunelerin 7 güne göre daha yüksek dayanım değerlerine ulaştığı tespit edilmiştir.

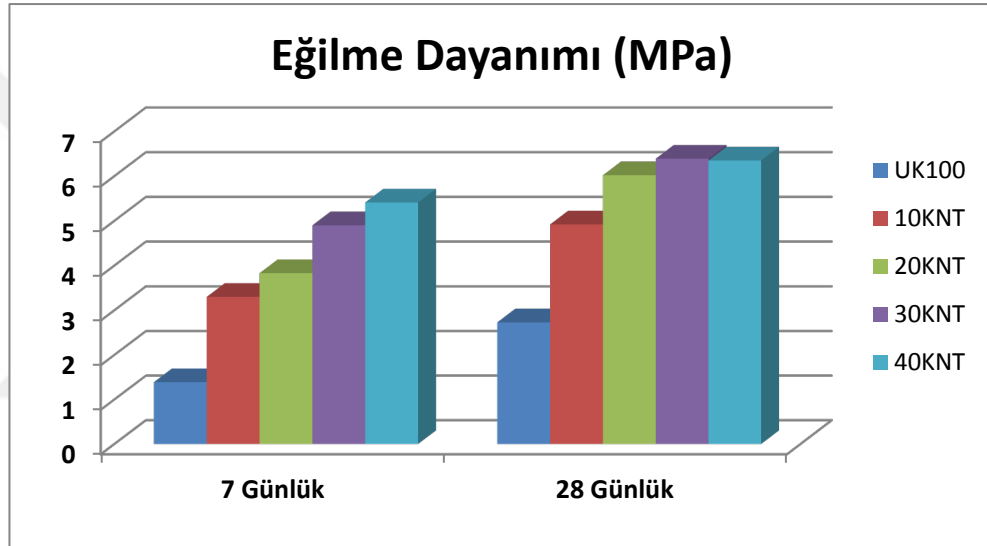


**Şekil 4.2.** Sarı Taş Atığı İçeren Numunelerin Eğilme Dayanımı Grafiği

KNT içeren numunelerin SNT içeren numunelere kıyasla daha yüksek eğilme dayanım değerlerine ulaştığı görülmüştür (Şekil 4.2.).

**Tablo4.4.** Kırmızı Taş Kırığı İçeren Numunelerin Eğilme Dayanımı Sonuçları

Numune	Max Gerilme (Eğilme Dayanımı)	Max Gerilme (Eğilme Dayanımı)
	7 Günlük	28 Günlük
100 UK	1,39 MPa	2,73MPa
10 KNT	3,30MPa	4,92 MPa
20 KNT	3,83MPa	6,02MPa
30 KNT	4,90 MPa	6,39MPa
40 KNT	5,41MPa	6,35MPa



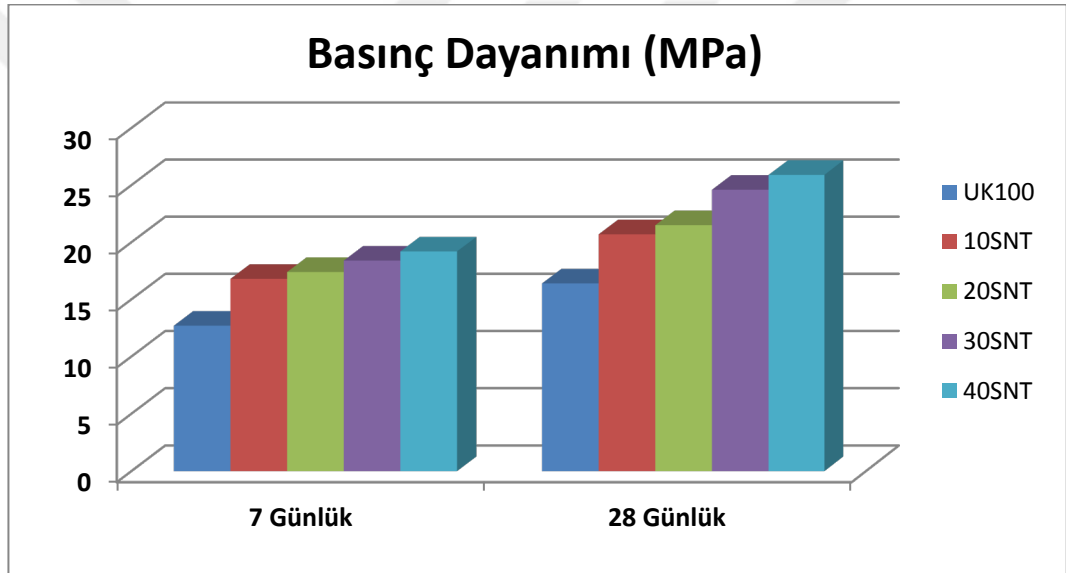
**Şekil4.3.** Kırmızı Taş Atığı İçeren Numunelerin Eğilme Dayanımı Grafiği

#### 4.4.Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Numunelere eğilme dayanımı testi uygulandıktan sonra ikiye ayrılan numunelere basınç dayanımı testi yapılarak çıkan sonuçların ortalama değeri basınç dayanım değeri olarak belirlenmiştir. Isıl kür sonrası 7-28 günlük olmak üzere basınç dayanımları arasındaki farklılıklar incelenmiştir (Şekil 4.4-4.5.).Eğilme dayanımında olduğu gibi basınç dayanımında da en yüksek dayanım değerlerine sarı taş kırığı atığı kullanılan numunelerde 40 SNT numunesinde ulaşılmıştır (Tablo 4.5.). Referansa kıyasla 40SNT için 7 günlük numunede %51 oranında, 28 günlük numunede %57 oranında basınç dayanımında artış elde edilmiştir. Kırmızı taş atığı kullanılan numunelerde %30 ve 40 katkı miktarında benzer değerler elde edilmiştir. 30KNT numunesinin referansa kıyasla 7 günlük basınç dayanım değerinde %55 oranında, 28 günlük basınç dayanımında %83 oranında artış elde edilmiştir.

**Tablo4.5.** Sarı taş kırığı içeren numunelerin basınç dayanımı sonuçları

Numune	Max Gerilme (Basınç Dayanımı)	Max Gerilme (Basınç Dayanımı)
	7 Günlük	28 Günlük
100 UK	12,70 MPa	16,40 MPa
10 SNT	16,80 MPa	20,70 MPa
20 SNT	17,40 MPa	21,50MPa
30 SNT	18,40 MPa	24,60MPa
40 SNT	19,20 MPa	25,90MPa

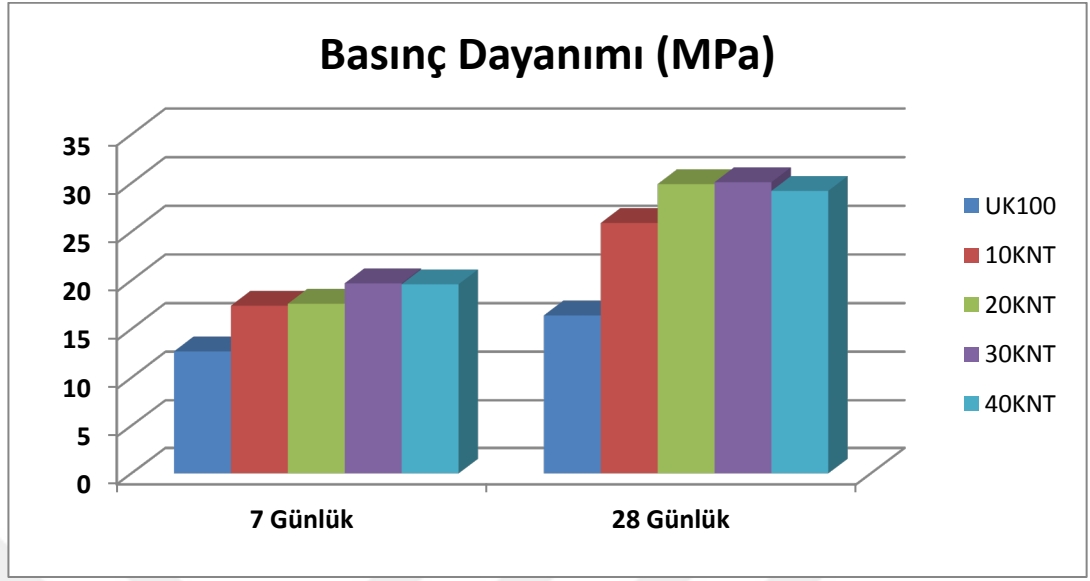


**Şekil 4.4.** Sarı taş atığı içeren numunelerin basınç dayanımı grafiği

**Tablo4.6.** Kırmızı taş kırığı içeren numunelerin basınç dayanımı sonuçları

Numune	Max Gerilme (Basınç Dayanımı)	Max Gerilme (Basınç Dayanımı)
	7 Günlük	28 Günlük
100 UK	12,70 MPa	16,40 MPa
10 KNT	17,40 MPa	25,90 MPa
20 KNT	17,60 MPa	29,90MPa
30 KNT	19,70 MPa	30,10MPa
40 KNT	19,60 MPa	29,20MPa





Şekil 4.5. Kırmızı taş atığı içeren numunelerin basınç dayanımı grafiği

#### 4.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi Sonuçları

Hazırlanan numuneler 28 gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra 60 dakika 400°C, 600°C ve 800°C'lik yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır (Şekil 4.6.). Ardından numunelerin eğilme ve basınç dayanımı değerleri karşılaştırılmıştır (Tablo 4.7-4.8).



Şekil 4.6. Yangın Dayanımı Deneyi Sonrası Numuneler

Eğilme dayanımları incelendiğinde; SNT katkı miktarı arttıkça yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin standarda kıyasla eğilme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Sıcaklık etkisi incelendiğinde, sıcaklığın artışı ile birlikte numunelerde eğilme dayanımlarının düşüş eğilimi sergilediği ancak, referansa kıyasla SNT ilaveli numunelerin (30SNT-40SNT) yüksek eğilme dayanımlarına sahip olduğu görülmektedir. Benzer davranış KNT içeren numunelerde de gözlenmektedir.

**Tablo4.7.**Numunelerin Yüksek Sıcaklık Sonrası Eğilme Dayanımı Sonuçları(MPa)

<b>Karışım Kodu</b>	<b>Yüksek Sıcaklık (28 günlük)</b>	<b>400°C</b>	<b>600°C</b>	<b>800°C</b>
100UK	1,39	2,50	1,54	1,05
10 SNT	3,28	2,60	1,96	1,78
20 SNT	3,67	2,67	2,20	1,80
30 SNT	4,80	3,10	2,21	1,88
40 SNT	5,39	3,18	2,38	1,59
100UK	1,39	2,50	1,54	1,05
10 KNT	3,30	3,98	3,63	3,28
20 KNT	3,83	4,12	3,46	3,30
30 KNT	4,90	5,57	3,80	3,46
40 KNT	5,13	5,41	2,65	2,45

**Tablo4.8.**Numunelerin Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Sonuçları(MPa)

<b>Karışım Kodu</b>	<b>Yüksek Sıcaklık (28 Günlük)</b>	<b>400°C</b>	<b>600°C</b>	<b>800°C</b>
100UK	16,40	14,30	12,45	11,40
10 SNT	20,70	19,30	16,45	15,40
20 SNT	21,50	19,90	17,00	16,55
30 SNT	24,60	21,70	17,90	17,50
40 SNT	25,90	23,80	18,45	18,00
100UK	16,40	14,30	12,45	11,40
10 KNT	25,90	26,60	22,70	22,80
20 KNT	29,70	29,90	25,90	25,50
30 KNT	30,10	31,70	24,50	23,20
40 KNT	30,70	31,20	23,90	20,60

Basınç dayanımları incelendiğinde; SNT katkı miktarı arttıkça yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin standarda kıyasla basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Sıcaklık etkisi incelendiğinde, sıcaklığın artışı ile birlikte numunelerde eğilme dayanımlarının düşüş eğilimi sergilediği ancak, referansa kıyasla SNT ilaveli numunelerin (30SNT-40SNT) yüksek eğilme dayanımlarına sahip olduğu görülmektedir. KNT içeren numunelerde sıcaklık 600 ve 800 °C’lerde dayanım değerlerinde 400°C’ye kıyasla artış gözlenmektedir. Sıcaklık etkisiyle oluşan artan amorf yapının yoğunlaşmaya etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu durum, mikroyapı görüntülerinde görülebilmektedir.

#### 4.6. Su Emme, Boşluk Oranı Deneyi Sonuçları

Numuneler, 90°C sıcaklıkta 24 saat ısıtılarak kurutulduktan sonra 28 gün oda sıcaklığında bekletilmiş ve su emme boşluk oranı deneyi uygulanmıştır. Arşimet terazisi ile su içindeki ağırlığı ve yüzeyleri kurulanıp kuru yüzey doygun ağırlıkları ölçülmüştür. Ardından numuneler 24 saat boyunca 105±5 °C sıcaklıkta etüvde kurumaya bırakılmış ve kuru ağırlıkları tartılmıştır. Su emme ve boşluk oranı miktarları Tablo 4.9’da sunulmuştur. Taş kırığı atığı miktarı artışı ile genel olarak numunelerde referansa kıyasla boşluk oranı ve su emme miktarının artma eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni mikroyapı görüntülerinde de gözlemlenebildiği gibi yapıda oluşan kristallerin gelişimi sırasında (özellikle iğnemsî kristaller) gözeneklerinde oluşum göstermesidir. İğnemsî kristaller içiçe kenetlenerek mukavemet artışına neden olmakta ancak arada kalan gözenek ve boşluklar su emme miktarının artışına neden olmaktadır.

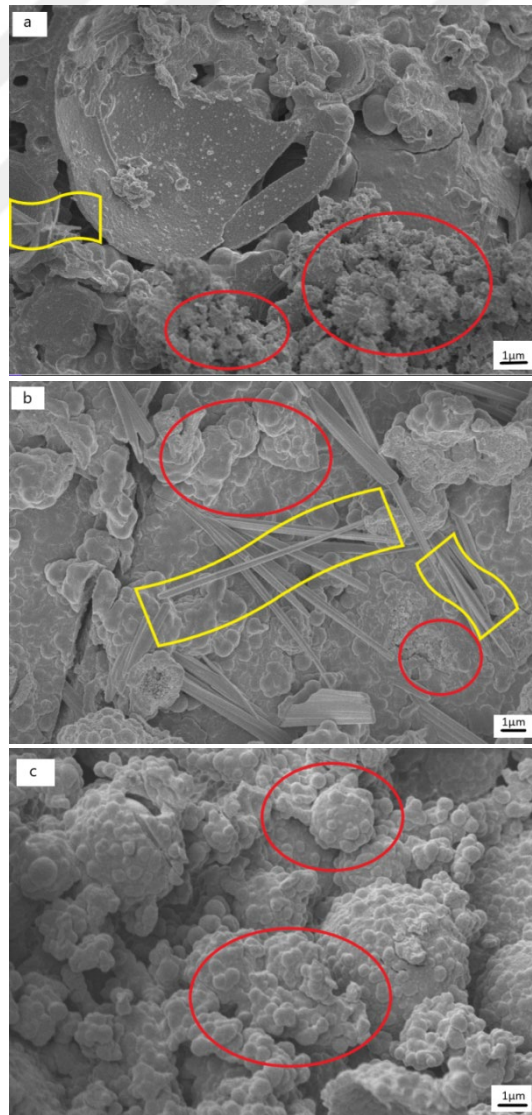
**Tablo 4.9.** Numunelerin Su Emme – Boşluk Oranları

Karışım Kodu	%Boşluk Oranı	%Su Emme Oranı
100UK	13,28	6,5
10 SNT	13,28	6,4
20 SNT	13,38	6,8
30 SNT	14,34	7,0
40 SNT	14,96	7,0
100UK	13,28	6,5
10 KNT	13,16	6,2
20 KNT	13,50	7,2
30 KNT	13,63	7,3
40 KNT	14,80	7,7

#### 4.7. Mikroyapı Analizi Sonuçları

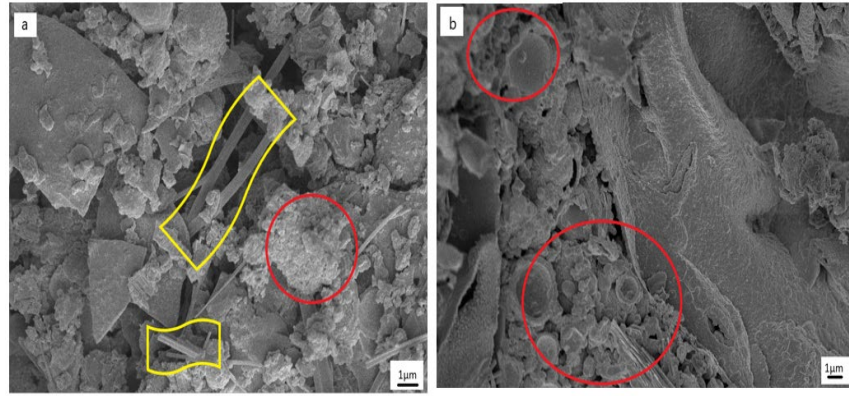
Referans numune üzerinde yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası 400°C ve 600°C’lerdeki numune içyapıları incelenmiştir. Numune içyapılarının genel görüntüleri incelendiğinde, yüksek sıcaklık öncesi A-S-H (Al-Si-H) jel matris olduğu ve 1µm büyüklüğünde sarı işaretleme ile gösterilen az sayıdaki iğnemsî kristaller göze çarpmaktadır. 400°C’de iğnemsî yapıda kristaller 5-10 µm boyutlarına ulaşmıştır. Kırmızı işaretlemeli yerlerde ise küresel uçucu kül partiküllerin amorf matris yapıya dâhil olmaya başladığı görülmektedir.

600°C’de iğnemsî kristallerin kaybolduğu, 0,5 mikron boyutunda küresel partikül topraklaşmaklarının oluştuğu gözlenmektedir. Her üç görüntüde de A-S-H gel oluşumu gözlenmektedir ama A-S-H jellerinin sıcaklığın artışı ile yoğunlaşmaya büyük bir katkı sağlayamadığı ve porozitenin arttığı görülebilmektedir. Bu durum referans numunedeki sıcaklık artışına bağlı dayanım düşüşlerini açıklamaktadır (Şekil 4.7.). Geopolimer karışımında kullanılan cüruf ve UK gibi bağlayıcıların yapısındaki Si/Al oranlarının, sıcaklık kürünün bağ yapısı üzerinde dolayısıyla dayanım üzerine etkileri bulunmaktadır [35,36]. Referans numunede sıcaklık değişiminin mikroyapılardaki etkisi incelendiğinde yüksek sıcaklık öncesi ile 400°C’de az sayıda iğnemsî kristalin var olduğu ve 400°C’den sonra iğnemsî kristallerin eriyerek amorf faza dahil olduğu ve matris içine gömülü yuvarlak partiküller içeren jel yapının genel mikroyapıya hakim olduğu görülebilmektedir.

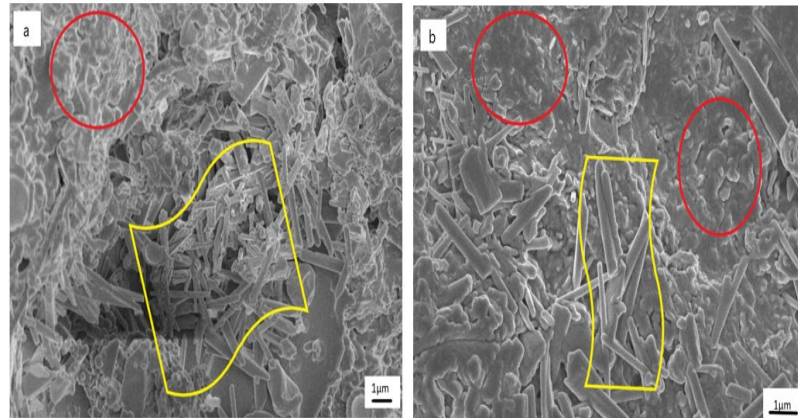


**Şekil 4.7.** Referans Numunenin Mikroyapı Görüntüleri  
a)Yüksek Sıcaklık Öncesi, b)400°C, c)600°C

%40 KNT atığı içeren numune mikroyapısına bakıldığında, katkı miktarının artışı ile 1 mikrondan büyük çok sayıda iğnemi kristalin birbiri ile kenetlenmesi sarı işaretleme ile, uçucu kül ve taş atıkları ile alkali reaksiyon ile yoğunlaşmanın gerçekleştiği bölgeler kırmızı işaretleme ile verilmiştir. %40 SNT atığı içeren numunede ise 1 mikrondan büyük az sayıda iğnemi kristaller ve yoğun bir jel yapı göze çarpmaktadır (Şekil 4.9). Literatürde Si/Al atomik oranının dayanım üzerinde etkili olduğu, özellikle  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranının Si/Al atomik oranını artırdığı belirtilmektedir. [37,38]. Ayrıca literatürde Ca/Si oranının artması ile hidrasyon ürünü olan kalsiyum silikat hidrat jelin morfolojisi ince sacdan uzun lifli yapıya dönüşür ve basınç dayanım değerleri artmaktadır [39]. Bu durum, kırmızı taş kırığı içeren numunelerde, sarı taş atığı içeren numunelere kıyasla neden daha fazla iğnemi kristallerin göze çarptığını ve birbirine kenetlenen kristal yapısına bağlı oluşan dayanım artışını açıklamaktadır. Taş kesim atıklarının en yüksek ve en düşük oranda uçucu kül yerine dâhil edildiği numunelerin mikroyapıları kıyaslandığında; özellikle kırmızı taş kesim atığının artışı ile atığında bileşimindeki uçucu küle kıyasla yüksek olan CaO,  $\text{SiO}_2$  içeriğine bağlı olarak gelişen büyük ve çok sayıdaki iğnemi kristallerin birbirine kenetlenerek yapıda dayanımı güçlendirdiği düşünülmektedir.

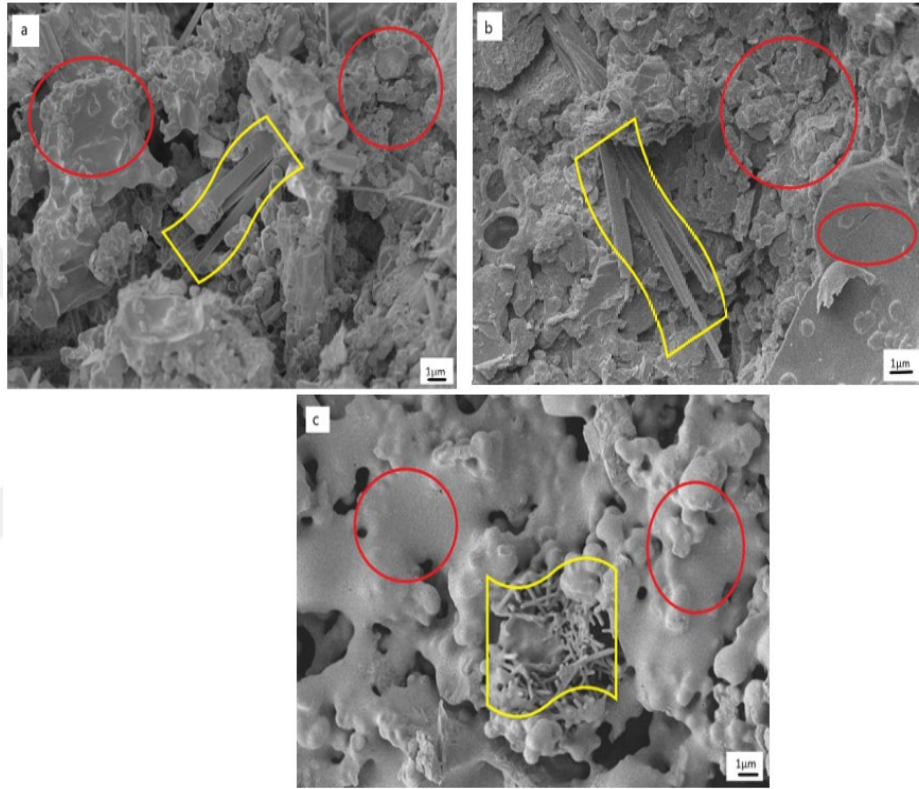


Şekil 4.8. Mikroyapı Görüntüleri a) 10 KNT b) 10 SNT



Şekil 4.9. Mikroyapı Görüntüleri a) 40 KNT b) 40 SNT

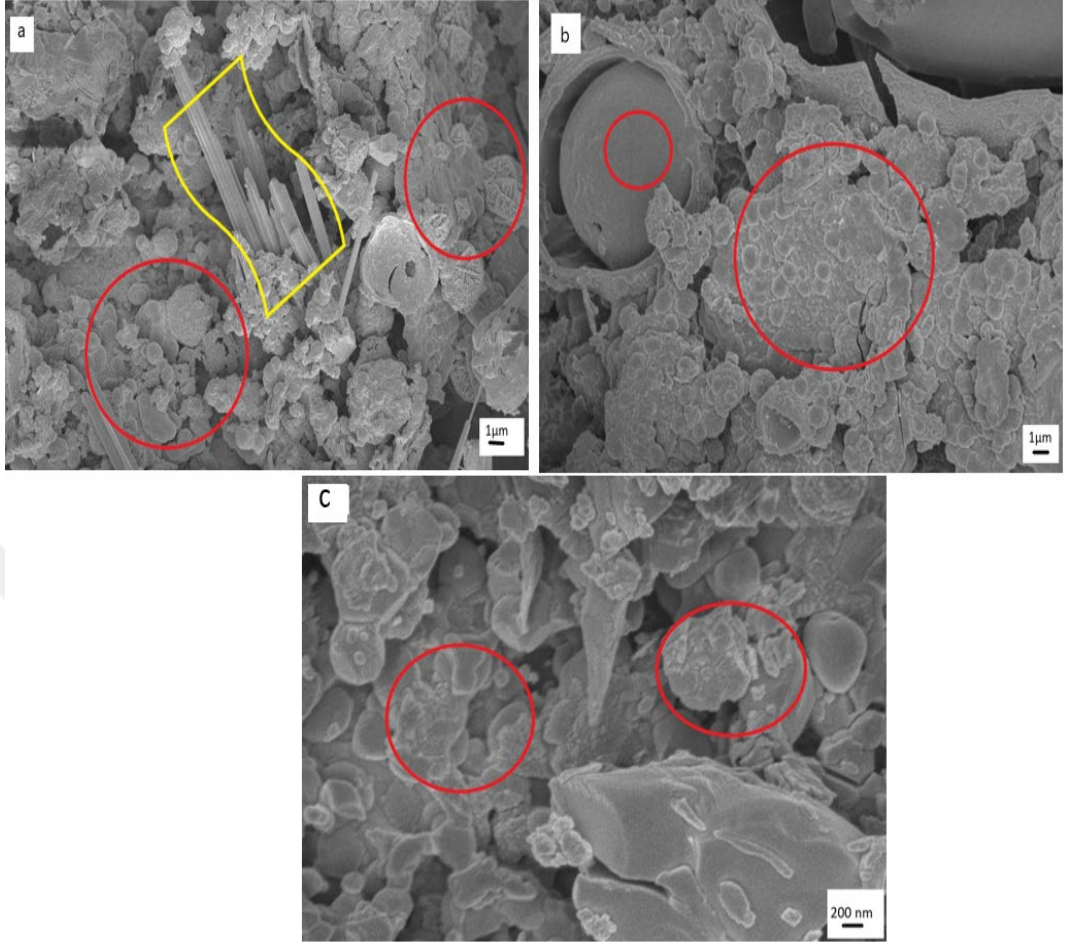
Sıcaklık değişiminin etkisini değerlendirmek için %30 Sarı ve kırmızı taş kesim atıkları içeren numunelerinde mikroyapıları incelenmiştir. Özellikle 30 KNT içeren numunelerde sıcaklık artışı ile beraber sarı işaretlemelerle belirtilen 5 µm'dan büyük iğnemsî kristallerin 400 ve 600°C'de mikroyapılarda görüldüğü, 600°C'den sonra ergimeye başladığı, küçülerek amorf yapıya dâhil olduğu Şekil 4.10.c'de net olarak görülebilmektedir.



**Şekil 4.10.** Mikroyapı Görüntüleri

a) 30 KNT-400°C b) 30 KNT-600°C c) 30 KNT-800°C

%30 Sarı taş kesim atığı içeren 30SNT numunesinin yüksek sıcaklık sonrası mikroyapısı incelendiğinde uzun iğnemsî kristallerin 400°C'de gözlemlenirken 600 ve 800°C'de kaybolduğu, kırmızı ile işaretlemelerde yuvarlak kristaller içeren amorf yapının varlığı dikkati çekmektedir (Şekil 4.11).



**Şekil 4.11.**Mikroyapı Görüntüleri

a)30 SNT-400°C b)30 SNT-600°C c) 30 SNT-800°C

## 5. BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

- Üretilen geopolimer harçlarda, taş kesim atığı oranı arttıkça yayılma çapının düştüğü gözlemlenmiştir. Dolayısıyla hazırlanan harcın işlenebilirliğinin düşmesiyle taş kesim atığı oranı arttıkça kalıba dökmekte zorluklar yaşanmıştır. Bu duruma; taş kesim atıklarının bünyesinde, uçucu küle nazaran daha fazla CaO bulunmasına bağlı olarak su emme eğilimlerinin artması neden olmaktadır.
- Hazırlanan numuneler ve referans numune kıyaslandığında birim ağırlık ve yoğunluk değerlerinin nispeten birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Referans numunenin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları sırası ile 1,39MPa ve 2,73 MPa'dır. 40 SNT numunesinde; 5,39 MPa ve 5,5 MPa'dır. 40 KNT numunesinde ise; 5,41 MPa ve 6,35 MPa'dır. Bu sonuçlar kıyaslandığında, uçucu kül yerine ilave edilen taş kesim atıklarının eğilme dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kırmızı taş kesim atığı içeren numunelerin, sarı taş kesim atığı içeren numunelere kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı değerlerine ulaştığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Taş kesim atığı ilave edilen numunelerin eğilme dayanımında olduğu gibi, basınç dayanımlarının da yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Referans numunenin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri sırasıyla, 12,70 MPa ve 16,40 MPa iken; 40 SNT'nin 19,20 MPa ve 25,90 MPa'dır. Kırmızı taş kesim atığı içeren numunelerin sarı taş kesim atığı içeren numunelere oranla daha yüksek dayanım değerlerine ulaştığı görülmüştür. Numunelerden 30 KNT ve 40 KNT'nin basınç dayanımı değerleri birbirine çok yakın olup 30 KNT'nin bir miktar yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. 30 KNT'nin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları sırasıyla; 19,70 MPa ve 30,10 MPa'dır.
- Yüksek sıcaklığa (400°C, 600°C ve 800°C) dayanıklılık deneyi sonuçları incelendiğinde numunelerin sıcaklığın artışı ile birlikte eğilme dayanımlarının düştüğü fakat referans numuneye kıyasla taş kesim atığı ilaveli numunelerin daha yüksek eğilme ve basınç dayanımına sahip oldukları gözlemlenmiştir. Basınç dayanımında ise eğilme dayanımında farklı olarak tüm numunelerin 400°C'de dayanım değerleri artarken 600°C ve 800°C'de düşüş olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



- Referans numuneye kıyasla taş kesim atığı ilave edilen numunelerin boşluk oranı ve su emme miktarının genel olarak artış gösterdiği görülmüştür. Numunedeki taş kesim atığı miktarının artışıyla su emme ve boşluk oranının da arttığı gözlemlenmiştir.
- Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde; referans numunenin sıcaklığın artışı ile A-S-H (Al-Si-H) jellerinin yoğunlaşmaya büyük bir katkı sağlayamadığı ve porozitenin arttığı görülmüştür. Bu durum sıcaklık artışına bağlı dayanım düşüşünü açıklamaktadır.
- Nevşehir taşı kesim atığının (özellikle kırmızı taş) numunelerdeki miktarının artışıyla bileşimindeki yüksek olan CaO ve SiO<sub>2</sub>'ye bağlı olarak büyük ve çok sayıda iğnemsî kristallerin birbirine kenetlenerek yapıda dayanımı arttırdığı sonucuna varılmıştır.
- Yüksek sıcaklık dayanımı deneyi sonunda numunelerin mikroyapılarının değişimi incelendiğinde ise; taş kesim atığı ilave edilen numunelerin yapısında bulunan büyük iğnemsî kristallerin, sıcaklık artışı ile amorfleştiği gözlemlenmiştir.
- Kapadokya bölgesinin yaygın mimari malzemesi olan Nevşehir taşının ürüne dönüştürülmesi aşamasında ortaya çıkan kesim atıklarının geopolimer ürün üretiminde uçucu kül yerine alternatif hammadde olarak kullanılması ile numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin geliştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, atık bir ürünün, inşaat ve ülke ekonomisine önemli katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Ceylan A.B., Nevşehir yöresi ignimbiritlerinin doğal yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Jeoloji Mühendisliği Anabilim dalı, Yüksek lisans tezi, Nevşehir, 2016.
2. KılınçMirdaliN.,Krom Zenginleştirme Tesisi Atıklarının Seramik Malzemelerde Kullanım Olanakları, *Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi, Adana, 2007.
3. web sitesi: <https://tanitma.ktb.gov.tr/TR-22783/kapadokya.html>
4. web sitesi: <http://www.ozkapadokya.com.tr/index.php?page=sayfa&id=36>
5. Alvarez-Ayuso E., Querol X., Plana F., Alastuey A., Moreno N., Izquierdo M., Font O., Moreno T., Diez S. ve Vazquez E. ve Barra M. (2008), “Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrix synthesised from coal (co-) combustion flyashes”, *Journal of Hazardous Materials*, 154, 175-183.
6. Atabey İ.İ., F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora tezi, Kayseri, 2017
7. Tho-In, T., Sata, V., Boonserm, K. ve Chindaprasirt, P. (2018). Atık cam tozu ve uçucu kül kullanılarak jeopolimer macunun basınç dayanımı ve mikro yapı analizi. *Temiz üretim dergisi*, 172, 2892-2898.
8. Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656.
9. Şinik, O., “Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon, 2019
10. Papadakis, V. G. (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbon ation and chloride ingress. *Cement and Concrete Research*, 30, 291-299
11. Moropoulou, A., Cakmak, A., Labropoulos, K. C., Van Grieken, R., Torfs, K. (2004). Accelerated microstructural evolution of a calcium-silicate-hydrate(C-S-H) phase in pozzolanic pastes using fine siliceous sources: Comparison with historic pozzolanic mortars. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 1-6.

12. Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B. V. (2004). On the development of flyash-based geopolymer concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, 101(1).
13. Olivier, J. G. J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., Peters, J. A. H. W. (2015). *Trends in Global CO<sub>2</sub> Emissions; 2015 Report*, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, Netherlands.
14. Shaikh, F. (2013). Review of mechanical properties of short fibre in forced geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, 43, 37-49
15. Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.
16. Hasanbeigi, A., Price, L., Lu, H., Lan, W. (2010). Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: a case study of 16 cement plants. *Energy*, Volume: 35, Issue: 8, 3461-3473.
17. Hienola, A., Pietikäine, J. P., Donnell, D.O., Partanen, A.I., Korhonen, H. (2017). The role of anthropogenic aerosol emission reduction in achieving the Paris Agreement's objective. *The 19th Geophysical Research Abstract-EGU General Assembly 2017*, April 23-28, Vienna, Austria.
18. Coelho, A., Brito, J. (2012). Analysis of the viability of construction and demolition waste recycling plants in Portugal-Part III: Analysis of the viability of a recycling plant, Lisbon, Portugal.
19. Maraş, M.M., 2019. Geogrid Geopolimer Panellerle Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Yapısal Davranışının İncelenmesi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora Tezi, Kahramanmaraş, 164 s.
20. Davidovits, J. 2015. *Geopolymer Chemistry and Applications*. Saint Quentin, France, 4th edition pp 4-5.
21. Brough A.R, Atkinson A. (2002). Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and Concrete Research*, 865-879.
22. Kong, D. L., Sanjayan, J. G. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 334-339.

23. Zuda L.,Drchalová J.,Rovnaník P., Bayer P.,Keršner Z.,Cerny R. (2010). Alkali-activated aluminosilicate composite with heat-resistant light weight agregate exposed to high temperatures: Mechanical and water transport properties. *Cement and Concrete Composites*, 157-163.
24. Turgut, P. (2010). Masonry composite material made of lime Stone powder and flyash. *Powder Technology*, 204 (1), 42–47.
25. Çoşkun, A.,Tanyıldızı, H., Şahin, M., “Jeopolimer Betonun Basınç Dayanımı ve Ultra Ses Geçirgenliğine Kür Sıcaklığının Etkisi”, *9. Ulusal Beton Kongresi Bildiri Kitabı*, 265-272, 2015
26. D.P.T. (2001).Yapı Malzemeleri II (Mermer- Granit-Yapı Taşları-Arduvaz. Ankara: VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel ihtisas Komisyonu Raporu. Ankara
27. web sitesi: [web sitesi:https://www.fibhaber.com/ekonomi/kapadokya-da-tas-can-demektir-nefes-demektir-h137061.html](https://www.fibhaber.com/ekonomi/kapadokya-da-tas-can-demektir-nefes-demektir-h137061.html)
28. Demir İ., B. M. (2001). Mermer tozu artıklarının (havuz çökeltisi) hafif yapı blokları üretiminde kullanılması. Türkiye IV. Mermer Sempozyumu (MERSEM 2003) Bildiriler Kitabı 213-220.
29. Tekin, İ., 2016. Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials*, 127, 607-617
30. Elvia Soraya Santos, Nascimento Patrícia, Campos de Souza, Herbet Alves de Oliveira, Carlos Mariano Melo Júnior, Vanessa Gentilde Oliveira Almeida, Fernanda Martins, Cavalcante de Melo, “Soil-cement brick with granite cutting residue reuse”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 321, 25 October 2021, 129002
31. Santiago Yagüe , CristinaGonzálezGaya , Victor Rosales Prieto and Alberto SánchezLite, “Sustainable Ecocements: Chemical and Morphological Analysis of Granite Sawdust Waste as Pozzolan Material”, *Materials*, 2020, 13, 4941
32. Gabriel PereiraMonteiro ,Afonso Rangel Garcez de Azevedo , Markssuel Teixeira Marvila, “Effect of the addition of the natural and treatedaçadestone in structuralmortars”*AIMS MaterialsScience*, 2021, Volume 8, Issue 4: 608-621.
33. Aykut C., 2017. Bayburt Taşı Atıklarının Geopolimer Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Bayburt Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt.

34. Ay C., “Atık cam tozu tabanlı geopolimer harçlarda kalsiyum alüminat çimentosu etkisinin araştırılması”, *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek lisans tezi, Nevşehir, 2021.
35. Komljenovic, M, Bascarivic, Z, Bradic, V. Mechanical and microstructural properties of alkali activated flyash geopolymers.. *J. Hazard. Mater.*, 2010; 181: 35- 42.
36. Greiser S, Gluth G, P Sturm, Jäger C,  $^{29}\text{Si}$   $^{27}\text{Al}$   $\{^{29}\text{Si}$  and  $^{27}\text{Al}$   $^1\text{H}$  double-resonance NMR spectroscopy study of cementitious sodium aluminosilicate gels (geopolymers) and gel-zeolite composites. *RSC Advances*. 2018; 70: 40164–40171
37. Wang Y, Liu X, Zhang W, Li Z, Zhang Li Y, Ren Y. (2020) Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of flyash based geopolymer, *Journal of Cleaner Production*, 244: 118852
38. M.Kaya, (2020) “Yüksek ve Düşük Kalsiyum İçeren Uçucu Küller ile Üretilen Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Türk Doğa ve Fen dergisi*, Cilt 9, Sayı 2, 96-104.
39. Timakul, P., Rattanaprasit, W., Aungkavattana, P., (2016) Improving compressive strength of flyash-based geopolymer composites by basalt fibers addition. *42*: 6288-6295.