

**T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEOPOLİMER ÜRÜN ÜRETİMİNDE ÇÖMLEK KIRIĞI  
ATIKLARI KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan  
Recep CIRIK**

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

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Aralık 2021  
NEVŞEHİR**

**T.C.  
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEOPOLİMER ÜRÜN ÜRETİMİNDE ÇÖMLEK KIRIĞI  
ATIKLARI KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan  
Recep CIRIK**

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

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi**

**Aralık 2021  
NEVŞEHİR**

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım için büyük destek veren, beni yönlendiren ve hep yardımcı olan danışman hocam Doç. Dr. Zahide BAYER ÖZTÜRK'e, tez çalışmalarım için deney ekipmanları, laboratuvar imkanı ve sonuç değerlendirmede yardımını eksik etmeyen Dr.Öğr.Üyesi İsmail İsa ATABEY hocama, çömlek kırıkları temini için Anadolu Çömlekçilik A.Ş.'ne (Avanos/Nevşehir), çömlek kırıklarının öğütülmesi için yardımcı olan BC Teknoloji şirketinden (Nevşehir) Prof. Dr. Bülent KURT, Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA hocalarıma ve Yük. Müh. Yusuf KARACA'ya, uçucu kül temininde yardımcı oldukları için Araz Metal Madencilik Tic.Ltd.Şti.,'ne (İskenderun), malzeme ve analiz desteği sağlayarak ABAP20F39 nolu proje ile çalışmalarımı yürütmeme destek veren Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine çok teşekkür ederim.

Ayrıca daima yanımda olan en büyük destekçilerim olan aileme ve eşim Lale'ye teşekkürlerimi sunarım.

Recep CIRIK  
Aralık, 2021

**GEOPOLİMER ÜRÜN ÜRETİMİNDE ÇÖMLEK KIRIĞI ATIKLARI  
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Recep CIRIK**

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Kasım,2021**

**ÖZET**

Temel bir yapı malzemesi olan betonun içerisinde bulunan ve ana bileşeni olan çimentonun üretim esnasında oluşturduğu sera gazı salınımı gibi dezavantajı bulunmaktadır. Bu sebeple bu temel malzeme yerine alternatif olarak geopolimer bağlayıcılı yapı malzemeleri geliştirilmiştir. Geopolimer; kalsine kil, uçucu kül gibi malzemelerin uygun alkaliler ile aktivasyonu ile tetrahedral alümina-silikat birimlerin oluşturmuş olduğu ağ yapısına sahip bir malzemedir. Bu çalışmada inşaat sektöründe kullanımı artan geopolimerlerde Nevşehir ilinde üretim gerçekleştiren çömlek firmasından (Anadolu Çömlekçilik) alınan çömlek kırıkları atıklarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Dere kumu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi malzemeler ile üretilen standart geopolimerin sektörel değerinin artması ile birlikte ürünü oluşturan hammaddelerin de maliyeti artmıştır. Çok fazla miktarda açığa çıkan çömlek kırığı atıklarının da uçucu kül yerine %10-20-30-40 oranlarında kullanımı ile %100 uçucu külünde kullanıldığı referans karışım ile birlikte beş farklı karışım hazırlanmıştır. Geopolimer harçlarda aktivatör olarak sodyum hidroksit kullanılmıştır. Üretilen bu harçlar 24 saat 90°C etüvde ısı küre tabi tutulmuştur. Isıl kür sonrası geopolimer numuneler üzerinde birim ağırlık ve özgül ağırlık, yayılma tablası, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme ve boşluk oranı ve yüksek sıcaklığa dayanıklılık deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda uçucu kül yerine %40'a kadar çömlek kırığı atıklarının yer değişiminin fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirdiği, yüksek sıcaklık direncinde 800°C'ye kadar referansdan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar ile hem çömlek atıkların alternatif bir kaynak olarak kullanılabilceği hem de geopolimer ürün üretimine ve Nevşehir iline, ülke ekonomisine önemli fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler: Çömlek kırığı atığı, Geopolimer, Uçucu kül, Dayanım**

**Tez Danışman: Doç.Dr.Zahide BAYER ÖZTÜRK Sayfa Sayısı:58**

# INVESTIGATION OF USAGE OF POTTERY WASTES IN PRODUCTION OF GEOPOLYMERS

(M. Sc. Thesis)

Recep CIRIK

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

December, 2021

## ABSTRACT

Cement, the main component of which is an important building material in concrete, has a disadvantage such as greenhouse gas emission during production. For this reason, as a result of the search for alternative binder materials, building materials with geopolymer binders were developed. Geopolymer is a material which a tetrahedral alumina-silicate units formed of materials such as calcined clay, fly ash by activation with suitable alkalis. In this study, it is aimed to evaluate the pottery waste wastes taken from the pottery company (Anatolian Pottery-Nevsehir) in the geopolymers. With the increase in the sectoral value of the standard geopolymer produced with materials such as river sand, fly ash, blast furnace slag, the cost of raw materials forming the product has also increased. Five different mixtures were prepared with the use of 10-20-30-40% of the pottery waste, which was released in large amounts, instead of fly ash, and the reference mixture in which 100% fly ash was used. Sodium hydroxide was used as activator in the mortars. The produced geopolymer mortars were incubated at 90°C for 24 hours. Workability, unit weight and specific gravity, flexural strength, compressive strength, water absorption and porosity, and fire resistance tests were applied on the produced geopolymer mortars. As a result of the study, up to 40% replacement of pottery wastes instead of fly ash improved the physical and mechanical properties, and better results were obtained in high-temperature resistance up to 800°C than the reference. With these results, it is thought that pottery wastes can be used as an alternative source and will provide significant benefits to the production of geopolymer products, Nevşehir province, and the country's economy.

**Keywords:** *Pottery wastes, Geopolymer, Fly ash, strength*

**Thesis Supervisor:**

**Page Number: 58**

## İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI .....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
TABLolar LİSTESİ .....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
RESİMLER LİSTESİ .....	xi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....	3
1.1. Geopolimer Nedir?.....	3
1.2. Geopolimer Üretimi .....	3
1.3. Geopolimer türleri.....	4
1.4. Geopolimerlerin Uygulama Alanları.....	5
1.5. Uçucu kül .....	5
1.6. Çömlekçilik.....	6
1.6.1. Çömlekçilik Tarihi .....	6
1.6.2. Çömlek Üretimi.....	7
1.6.3 Çömlek Üretimi Yapan Atölyeler ve Atıkları.....	8
1.7. Literatür Taraması.....	9
BÖLÜM 2 .....	12
MATERYAL ve METOT .....	12
2.1 Malzemeler.....	12
2.1.1. Çömlek kırığı atıkları .....	12
2.1.2. Uçucu kül .....	13
2.1.3 Aktivatörler .....	14
2.1.4. Dere Kumu .....	15
2.1.5 Su .....	15
2.2. Ön deneme çalışmaları .....	15
2.3. Deneysel çalışmalar .....	16
2.4. Deney Yöntemleri .....	18

2.4.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	18
2.4.2- Birim Ağırlık ve özgül ağırlık deneyi.....	19
2.4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi.....	19
2.4.4. Basınç Dayanımı Deneyi .....	20
2.4.5. Su emme, Boşluk Oranı deneyi.....	21
2.4.6.- Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Etkisi .....	22
2.2.7. Mikroyapı incelemeleri .....	23
BÖLÜM 3 .....	24
BULGULAR VE TARTIŞMA .....	24
3.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları .....	24
3.2. Birim Ağırlık Deney Sonuçları .....	25
3.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları.....	26
3.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları .....	27
3.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi Sonuçları.....	29
3.6. Su emme ve Boşluk oranı deney sonuçları .....	311
3.7. Mikroyapı incelemeleri .....	32
BÖLÜM 4 .....	36
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	366
KAYNAKLAR .....	39

## TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Çömlek atığı tozunun kimyasal analizi.....	12
Tablo 2.2. Uçucu külün kimyasal analizi [4].....	14
Tablo 2.3. Aktivatör seçimi ön çalışması.....	16
Tablo 2.4. Pişme öncesi ve sonrası çömlek atıkları ile hazırlanan ön karışımlar .....	16
Tablo 2.5. Karışım oranları .....	17
Tablo 3.1. Yayılma çapı değerleri.....	24
Tablo 3.2. Numunelerin birim ağırlık ve yoğunluk değerleri .....	25
Tablo 3.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları .....	26
Tablo 3.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	28
Tablo 3.5. 400 °C, 600°C ve 800 °C yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları (MPa) .....	30
Tablo 3.6. 400 °C, 600°C ve 800 °C yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları (MPa) .....	31
Tablo 3.7. Hazırlanan numunelerin boşluk oranı ve su emme değerleri (%) .....	32



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Anadolu Çömlekçilikten temin edilen a)pişme öncesi, b)pişme sonrası çömlek atığı tozları .....	13
Şekil 2.2. Çömlek atığı tozunun XRD faz analizi .....	13
Şekil 2.3. Kullanılan Uçucu Kül .....	14
Şekil 2.4. Sodyum hidroksit ve sodyum silikat.....	15
Şekil 2.5. Karışımlarda kullanılan dere kumu.....	15
Şekil 2.6. Harçların hazırlama aşamaları .....	18
Şekil 2.7. Taze harç karışımları için yayılma tablası (işlenebilirlik) deneyi.....	19
Şekil 2.8. Eğilme Dayanımı Testi .....	20
Şekil 2.9. Basınç Dayanımı Deneyi .....	21
Şekil 2.10. Su emme-boşluk ölçümü .....	22
Şekil 2.11. Yüksek sıcaklığa tabi tutulan ürün grupları.....	23
Şekil 3.1. Hazırlanan harçların yayılma çapı değerleri grafiği .....	25
Şekil 3.2. Eğilme dayanımı karşılaştırma grafiği.....	27
Şekil 3.3. Basınç dayanımı karşılaştırma grafiği .....	28
Şekil 3.4. Yüksek sıcaklık Öncesi ve Sonrası Numune Görselleri .....	29
Şekil 3.5. 25°C ve 400 °C, 600°C, 800 °C yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları (MPa) karşılaştırma grafiği .....	30
Şekil 3.6. 25°C ve 400 °C, 600°C, 800 °C yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları (MPa) karşılaştırma grafiği .....	31
Şekil 3.7. Referans numunenin mikroyapı görüntüleri a) yüksek sıcaklık öncesi, b)400°C, c)600°C .....	333

Şekil 3.8. %10 çömlek atığı içeren numunenin mikroyapı görüntüleri a) yüksek sıcaklık öncesi, b)400°C.....344

Şekil 3.9. %40 çömlek atığı içeren numunenin mikroyapı görüntüleri a) yüksek sıcaklık öncesi, b)400°C.....344



## RESİMLER LİSTESİ

<b>Resim 1.</b> Çömlekçilik.....	7
<b>Resim 2.</b> İlkel Çömlekçilik [22].....	7
<b>Resim 3.</b> Gelişmiş Çömlekçilik [22].....	8
<b>Resim 4.</b> Anadolu Çömlekçilik [6].....	9



## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbon dioksit
<b>CaO</b>	Kalsiyum Oksit
<b>Si</b>	Silis, Silisyum
<b>Al</b>	Alüminyum
<b>UK</b>	Uçucu kül
<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>MÖ</b>	Milattan Önce
<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 Alümina Silikat Hidrat

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Son yıllarda, endüstriyel üretimin artmasıyla birlikte katı atık maddelerin miktarı ve çeşitliliğinde de artış olmuştur. Bu atıkların insan sağlığı üzerine olan etkileri önemli hale gelmiş ve artan atık miktarının çevresel sonuçları kaygı yaratmaya başlamıştır. Bu durum araştırmacıları, atıkların alternatif kullanım alanlarının araştırılmasına yönlendirmiştir. Atıkları değerlendirirken sadece çevre kirliliğini önlemek değil aynı zamanda alternatif hammadde olarak farklı alanlarda kullanılabilmesi için birçok araştırmalar yapılmaktadır [1]. Bu atıkların değerlendirmesi esnasında kullanılacak teknolojinin ekonomik olması da önem arz etmektedir. Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte üretimde olduğu kadar tüketimde de oldukça büyük oranda yükselme meydana gelmiştir. Endüstriyel üretimin artmasıyla birlikte üretim sonucu oluşan tehlikeli/tehlikesiz katı atık madde miktarında da artış olmuştur. Bu katı atıkların hem insan sağlığına hem çevreye verdikleri zararlar, bulunduğu yerde depolama problemleri, depolandığı bölgede hem görüntü kirliliği yaratması hem de ekolojik dengeyi etkilemesi nedeniyle farklı sektörlerde değerlendirilmesi üzerine yapılacak çalışmalar ve araştırmalar önemli kazançlar sağlayacaktır [2].

İnşaat sektörü göz önüne alındığında çimento üretimi esnasında oldukça fazla sera gazı salınımı meydana gelmektedir. Bu gaz salınımının çevreye verdiği zarar düşünüldüğünde endüstriyel atıkların yapıya ikame edilerek ısıya ve aşındırıcı çevre koşullarına dayanıklı malzemelerin üretiminin sağlanabildiği geopolimer malzemeler bu tür problemlere avantajlar sunabilmektedir [3-4]. Çevresel etkisi açısından, çimentoya karşı geopolimerlerin avantajlarından en önemlisi geopolimer üretiminde çok daha az CO<sub>2</sub> açığa çıkmasıdır. Bunun nedeni ise geopolimer sentezi sırasında yüksek sıcaklıkta kalsinasyon basamağının olmamasıdır. İnşaat sektörünün öneminin artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte daha hafif ve sağlam olan geopolimer betonun önemi de artmıştır [4].

Geopolimer betonun üretiminde kullanılan ana malzemelerden biri olan uçucu külün geopolimerin değerinin artması ve termik santrallere olan mesafelerin uzaklığı ile

maliyeti artmıştır. Atık olarak sınıflandırılan uçucu kül geopolimer için ana malzeme sınıfına girmiştir. Ayrıca uçucu külün beton, çimento, agrega, gazbeton, tuğla üretimi, yol ve zemin iyileştirme uygulamalarında da kullanılabilir olması ile maliyetinin artmasıyla ürün üretimi maliyeti de artmış ve üretici farklı hammaddelere veya katı atık maddelerine yönelmiştir. Kömürün ve linyitin yanması sonucu ortaya çıkan uçucu külün en büyük sorunu depolanmasıdır. Santrallerde üretim sonucu oluşan kül ve cüruf santralin yakınındaki açık alanlara taşınmaktadır [5]. Türkiye’de çevre mevzuatlarını yerine getirmede için termik santrallerin durdurulması ve hatta kapatılması konusu da gündemdedir. Uçucu külün kullanıldığı geopolimerlerde, uçucu küle alternatif ucuz ve benzer etkiler verebilecek hammadde kaynağının bulunmasına yönelik çalışmalar bu noktada büyük önem arz etmektedir.

Nevşehir ili ve ilçeleri ülkemizin en fazla turist çeken 4. Turizm yerleşim merkezi durumundadır. Kapadokya’nın doğal ve kültürel varlıkları yörede el sanatlarının gelişmesine katkı sağlamıştır. Bu el sanatlarından biri de çömlekçiliktir. Nevşehir ilimizin Avanos ilçesi bölgenin el sanatları merkezi olarak tanınmakta ve irili ufaklı birçok seramik atölyesini bünyesinde bulundurmaktadır. Bu atölyelerin yanı sıra faaliyet gösteren Anadolu Çömlekçilik fabrikası 1998 yılından beri el yapımı küpler, saksılar, pres baskı ürünler, dökümle şekillendirilen iç dış mekan seramikleri ve bahçe seramikleri üretmektedir [6]. Firmada üretim sonrası ıskartaya ayrılan ürünler stok sahasında yığın oluşturmakta, üretime geri dönüşümü çok kısıtlı şekilde yapıldığından görüntü kirliliği yanında atık olarak bekletilmesi nedeniyle depolama sorunu oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında, uçucu kül ile üretilen geopolimerlerde, Nevşehir ilimizde üretim sonrası açığa çıkan endüstriyel atık olan çömlek ıskarta atıkları kullanımının geopolimer ürün özelliklerine etkisi incelenmiştir. Standartta kullanılan uçucu kül yerine bu atıkların (ıskarta ürün, çamur, vb.) kullanılması sağlanarak geopolimer üretimi için alternatif bir hammadde kaynağı önerilmiş olmakta, bu sayede üretimdeki maliyet de düşmekte ve Nevşehir ilimizde her yıl yüksek miktarda açığa çıkan, atık depolama sahalarında bekletilen atıkların hammadde olarak kullanımı sağlanmış olmaktadır. Bu tez çalışması ile hem seramik, maden, inşaat sektörüne hem de ülke ekonomisine önemli katkı sağlanmış olacaktır.

## GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

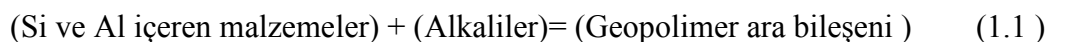
### 1.1. Geopolimer Nedir?

İnşaat sektöründe en sık kullanılan malzeme çimentodur. Klasik betona bağlayıcılığını veren çimentonun üretimi kalker taşının ön kalsinasyonu ile başlar. Bu işlem sırasında CaO oluşurken CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkar. Devamında CaO, döner fırınlarda yüksek sıcaklıkta (1400-1500 °C) silis, alümin ve demir oksitle reaksiyona girerek silikatları, alüminatları ve kalsiyum ferritleri içeren klinkeri oluşturur. Son aşamada ise, klinker, alçı taşı ve diğer katkı maddeleri ile birlikte öğütülerek çimento elde edilir [7]. Klinker üretimi için yaklaşık 1500 °C sıcaklıklara çıkılması, oluşan klinkerin öğütülmesi gerektiği için yüksek miktarda enerji tüketimi gerçekleşmesi ve döner fırında gerçekleşen tepkimeler, kullanılan fosil yakıtlar nedeniyle yüksek miktarda karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ile düşük miktarda diğer zararlı gaz salınımına sebebiyet veriyor olması ile çimentoya alternatif malzemeler arayışı son yıllardaki araştırmaların konusunu oluşturmaktadır [8].

Geopolimerler aktivatörlerin su ile tepkimesi ile kısmen veya tamamen çözünen yüksek fırın cürufu, uçucu kül veya kalsine kil gibi toz bağlayıcılardan elde edilen alümino silikatlardır[8]. Geopolimer terimi genellikle, metakaolen, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi bir alümina silikatın oda sıcaklığında veya ısıl kürede kimyasal aktivatör çözeltileri ile karışım hazırlanması ile oluşan “çimentosuz malzeme”, “alkali aktive karışım” olarak da tanımlanır [9-13]. Ayrıca geopolimer harçların üretiminde puzolanik özellik gösteren ve depolama alanı sorunu teşkil eden uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve taban külü gibi endüstriyel atıkların kullanılması geopolimerlerin çevreci beton olarak tanınmasına da olanak sağlamaktadır [14]. Süreksiz nano boşluklu bir yapısı geopolimere hafiflik, yangın dayanımı ve ısı yalıtımı gibi olumlu etkiler kazandırmaktadır [14]. İnşaat sektörünün öneminin artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte daha hafif ve sağlam olan geopolimer betonun önemi de artmıştır [4]. Geleneksel betona alternatif olarak günümüzde geopolimerler daha çok kullanılmaktadır[8].

### 1.2. Geopolimer Üretimi

Geopolimer oluşumu şematik olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir:



$$(\text{Geopolimer ara bileşeni}) + (\text{Alkaliler}) = (\text{Geopolimer}) \quad (1.2)$$

Geopolimer oluşumunda su bulunmamaktadır. Karışım hazırlamada kullanılan su ise işlenebilirliği arttırmak için kullanılır. Kür ve kurutma safhalarında geopolimerin yapısından su uzaklaşarak süreksiz nano boşluklu bir yapı bırakır. Bu boşluklu yapı geopolimere hafiflik, yüksek sıcaklık dayanımı ve ısı yalıtımı gibi avantajlar kazandırır [14].

Uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) veya metakaolin gibi alümino silikatlar geopolimer üretiminde kullanılan toz bağlayıcılardır. Kimyasal aktivatörler ise genellikle sodyum hidroksit, sodyum silikat, potasyum hidroksit, sodyum karbonat gibi alkali çözeltileridir [15]. Alümino silikatlar ise ana oksitleri alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve silisyum oksit ( $\text{SiO}_2$ ) olan, doğal ya da sonradan ısı işlem görmüş olan malzemelerdir. Doğada bulunan ve atık olarak ortaya çıkan pek çok alümino silikat malzeme bulunmaktadır. Bu açıdan, bu malzemelerin bağlayıcı olarak geopolimerlerde kullanılabilir olması çevre etkisi ve inşaat sektörü açısından önemlidir [8].

### 1.3. Geopolimer türleri

9 tip geopolimer türü bulunmaktadır. Bunlar:

1-Camsuyu bazlı geopolimer, polisiloksonat (Si: Al=1:0): Geopolimer harcın işlenebilirliğini ve kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlayan önemli alkali bileşenlerden cam suyunun kullanıldığı geopolimerlerdir [2].

2-Kaolinit- hidrosodalit esaslı geopolimer, polisialat(Si: Al=1:1): Alüminosilikat olan kaolinin NaOH ile 100-150°C'de reaksiyona girmesi ve hidrate sodalite (tekto alüminosilikat) veya hidrosodalite dönüşmesi ile oluşan geopolimer türüdür [16].

3-Metakaolinit esaslı geopolimer, poly (sialate-siloxo) (Si: Al=2:1): tanecik büyüklüğü kaolene göre fazla olan metakaolinit esaslı geopolimer sentezine dayalı bir geopolimer türüdür [2].

4-Kalsiyum esaslı geopolimer, (Ca, K, Na)-sialate, (Si: Al=1, 2, 3): Kireç ve kil esaslı malzemelerin karıştırılması sonucu Al-O ve Si-O moleküllerinin çökeltme ve karıştırma ile yeniden reaksiyona girme davranışına dayalı olarak Ca-(Al-O-Si-O-Al-O)-Ca bağ yapısının oluştuğu geopolimer türüdür [2].



5-Kayaç esaslı geopolimer, poly (sialate-multisiloxo) ( $1 < \text{Si} : \text{Al}5$ ): Kil kayaçların esaslı olan feldispatoitler ve kumu oluşturan kuvarsın asit içinde çözünmesi sonucu oluşan geopolimer türüdür [2].

6-Silika ve silis dumanı-esaslı geopolimer, sialateve siloxo bağlı poly (siloxonate) ( $\text{Si} : \text{Al} > 5$ ): Kuvars ve silis dumanının NaOH ve KOH gibi alkali çözeltilerle reaksiyonu ile oluşan bir geopolimer türü olup, Mısır piramitlerinde de örneklerine rastlanan bu kimyasal sistemin eski Mısırlılar tarafından da keşfedildiği düşünülmektedir [2].

7-Uçucu kül esaslı geopolimer: Termik santral bacalarından elde edilen, içi boş, küresel tanecik yapılı atık malzemenin kullanıldığı geopolimer türüdür [17].

8-Fosfat esaslı geopolimer: Bu geopolimer türü düşük pH'lı ortamda iki veya üç değerlikli bir metal oksitin  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (ortofosforik asit) içinde asit baz reaksiyonları vermesi ile sentezlenmektedir [2].

9-Organik maden esaslı geopolimer: Hidrokarbon bağ yapılı organik polimerler ile polisialat geopolimer yapısı kullanılarak asidik ve bazik ortamda karıştırma ve emdirme işlemleri ile de organo-geopolimer bileşikler elde edilir [2].

#### **1.4. - Geopolimerlerin Uygulama Alanları**

Geopolimerler az miktarda  $\text{CO}_2$  salınımına, düşük enerji tüketimine, düşük üretim maliyetine ve hızlı dayanım kazanma özelliğine sahip malzemelerdir. Bu avantajları ile geopolimerler mühendislik alanlarında inşaat, otomotiv, havacılık, metalürji ve plastik endüstrisinde kullanılmaktadır. Mısır'daki piramitlerin ve Roma'daki amfi tiyatronun mikro yapısına bakıldığında sertleşmiş geopolimerik malzemelerle benzeştiği anlaşılmaktadır. Bu sebeple geçmişte doğal malzemelerden daha çok geopolimerizasyon temeline dayanan üretimin olduğu düşünülmektedir. Durumu açıklamak için pek çok araştırmacı, eski yapıların geopolimer teoriler üzerine kurulup kurulmadığını belirlemek için araştırmalar yapmaya devam etmektedirler [8].

#### **1.5. Uçucu kül**

Uçucu kül, öğütülmüş kömürün yanması sonucu oluşan, toz ve gaz halinde bulunabilen, termik santrallerde bulunan elektrostatik çöktürücü filtreler veya filtre torbaları tarafından tutularak istiflenen bir atıktır. Uçucu kül partikülleri küre geometrisine sahip olup, tanecik boyutu 0,5–100  $\mu\text{m}$  aralığındadır. Kimyasal içeriğini ise, kömür madeni ile birlikte çıkarılan kaolinit, pirit, kalsit, hematit, manyetit, kuvars gibi toprak içerisinde bulunan

kil, kum ve kayaç mineralleri oluşturur [2]. UK esaslı geopolimer betonlar üstün basınç dayanımına, sülfat direncine ve minimum küçülmeye sahiptir ve yapı uygulamaları için uygundur [16].

Geopolimer üretimi için genellikle F tipi UK tercih edilmektedir. Bu küller, bitümlü kömürden elde edilirler ve toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla iken CaO yüzdesi ise %10'dan daha azdır. Bu özelliği ile bu küllere düşük kireçli küller de denilmektedir [18].

### **1.6. Çömlekçilik**

El sanatları ürünleri toplumun gelenek ve göreneklerini, duygularını, yaşam biçimlerini ve kültürel özelliklerini yansıtan ürünlerdir. El sanatlarından biri de hammaddesi toprak olan çömlekçiliktir [19]. Çömlekçilik, Anadolu'da çok eskiden beri var olan, kolaylıkla elde edilen toprak ve çamura dayalı bir sanattır. Çamur, yumuşak halde iken şekillendirilebilir. Çamurdan elle veya çömlekçi çarkından geçirilerek çeşitli ölçülerde ürünler elde etmek mümkündür. Bu ürünler, sırlama veya sırlanma olmadan yapılan toprak çanak, çömlek, testi, vazo, küp vb. sayılabilir. Anadolu'da üretilen çömlekler genellikle sulandırılmış çamurla sırlanmakta ve açık ateşte pişirilmektedir. Günümüzde fonksiyonel olarak yapısı kaybolmaya başlayan, ancak belirli kullanım alanlarında değerlendirilen çömlekçilik sanatı birkaç yörede az sayıda çömlek ustasıyla devam etmektedir [19].

#### **1.6.1. Çömlekçilik Tarihi**

Seramiğin ya da çanak çömleğin tarihi insanın dünyada var olduğu süreye eşit denilebilir. Arkeolojik çalışmalardaki bilgilere göre insanların yaşadığı bölgelerde yaşam koşulları nasıl olursa olsun her zaman kille yapılmış bir obje bulunmuştur [19]. Çömlekçiliğin gelişmesi, yerleşik düzene geçilmesi ile olmuştur. Anadolu'da ilk yapılan çömlekler 'Neolitik' döneme yani yaklaşık MÖ 7000'li yıllara dayanmaktadır. İlk yapılan çömlekler sargı-dolama usulü ile elde şekillendirilmekte ve açık ateşte pişirilmekteydi. Açık pişirimde pişirilecek ürünler güneşte kurutulduktan sonra, aralarına saman ve kuru dallar konarak dizilir, üzerleri yine dal ve saman ile örtülüp baca açıklığı bırakılır [20-21].



**Resim 1. Çömlekçilik**

### 1.6.2. Çömlek Üretimi

Anadolu'da ilkel ve gelişmiş çömlekçilik olarak iki ayrı çömlekçilik türünün bulunduğu bilinmektedir [22].



**Resim 2. İlkel Çömlekçilik [22]**

İlkel çömlekçilikte çarksız döndürülebilen altlıklar üzerinde ya da çark olsa bile mili henüz yataksız olduğundan, altlıklar üzerinde çamurun elle biçimlendirilmesine dayalı, pişirimin ise fırın olarak açık havada ya da tandırda tek pişirimle gerçekleştirilmesi söz konusudur [22].



**Resim 3. Gelişmiş Çömlekçilik [22]**

Gelişmiş çömlekçilikte ise çamurun milli ve yataklı çarklarda merkez kaç kuvveti etkisiyle elle düzgün şekillendirilmesi sonrası çömlekçi fırınlarında sırlı ya da sırsız pişirilmesi söz konusudur [22].

### 1.6.3 Çömlek Üretimi Yapan Atölyeler ve Atıkları

Anadolu'da başlayan çanak çömlek yapımı, Kızılırmak'ın kıyısında bulunan Avanos'ta geçmişin izlerini taşıyarak devam etmektedir [19]. Günümüzde çömlek üretimi yapan özellikle Kapadokya bölgesinde sürekli karşılaşılabileceğimiz birçok işletme bulunmaktadır. Bu atölyeler günlük kullanımda kullanabileceğimiz kahve fincanları, güveçler ve testiler gibi birçok ürün üretimi yapmaktadır [6].

Kapadokya bölgesinin özellikle Avanos ilçesi bölgenin el sanatları merkezi olarak tanınmakta irili ufaklı birçok seramik atölyesini bünyesinde bulundurmaktadır. Bu atölyelerin yanı sıra faaliyet gösteren Anadolu Çömlekçilik fabrikası 1998 yılından beri el yapımı küpler, saksılar, pres baskı ürünler, dökümle şekillendirilen iç dış mekan seramikleri ve bahçe seramikleri üretmektedir[6]. Firmada üretim sırasında şekillendirme sonrası kurutmaya alınan ürünlerde şekil bozukluğu olan ürünler (pişirme öncesi) ve pişirme işlemi sonrası sırlı yâda sırsız ürünlerde hataların görüldüğü ürünler (pişirme sonrası) ıskartaya ayrılmaktadır. Bu ürünler stok sahasında yığın oluşturmakta, üretime geri dönüşümü çok kısıtlı şekilde yapıldığından görüntü kirliliği yanında atık olarak bekletilmesi nedeniyle depolama sorunu oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında, uçucu kül ile üretilen geopolimerlerde, Nevşehir ilimizde üretim sonrası açığa çıkan endüstriyel atık olan çömlek ıskarta atıkları kullanımının geopolimer ürün özelliklerine etkisi incelenmiştir [6].



**Resim 4.** Anadolu Çömlekçilik [6]

## 1.7. Literatür Taraması

Geopolimer ürün üretimine etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, bileşimi oluşturan hammaddeler, aktivatör tipi, uygulanan kür ortamı, sıcaklığı vb. verilebilir. Literatürde bu faktörlerinin etkilerinin değerlendirildiği çalışmaları görmek mümkündür.

Çoskun ve ark. uçucu kül bazlı alkali aktive edilen betonların basınç dayanımı ve ultrasonik ses geçirgenliğine kür sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. 60°C' deki kür sıcaklığında basınç dayanımında yüksek artış sağlandığını tespit etmişlerdir. Kür sıcaklığının artması ile basınç dayanımı değerleri ve ultrasonik ses geçirgenliği değerleri orantılı olarak artmıştır [23].

Yaprak ve ark. taban külü ve yüksek fırın cürufu katkılı geopolimer harçlar üzerine çalışmışlardır. Çalışma sonucunda taban külü ve yüksek fırın cürufunun hidratasyon gelişiminin uzun süreçte geliştiği, kısa süreli kürün hidratasyon için yeterli olmadığı tespit edilmiştir. %25 taban külü katkısının uzun süreli kür koşullarında iyi bir performans sergilediği, %50 taban külü, %50 yüksek fırın cürufunun sodyum silikatla aktive edilmesi ile üretilen harçlar ile atıkların değerlendirilebilmesine katkı sağlayacağı tespit edilmiştir [24].

Kaya ve ark. çalışmalarında uçucu külün, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilmesi sonucu elde edilen geopolimerlerin farklı yaşlandırma gruplarındaki dayanımları ile kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi ile incelemişlerdir. Çalışma sonucunda 20°C'de kürlenmiş geopolimerlerin 3 günlük basınç dayanımları ile 90°C 'de kürlenmiş numunelerin 3 günlük dayanımları arasında 48,96 MPa bir fark gözlenirken, 180.günde 30,77 MPa olarak tespit edilmiştir. Kür sıcaklığının artışı ile basınç dayanımında artış gözlenmiştir [25]

Bhardwaj ve ark. çalışmalarında döküm endüstrilerinden bir yan ürün olan atık döküm kumunun, düşük kalsiyumlu uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu bazlı alkali ile aktifleştirilen harçların mukavemeti, geçirgenliği ve mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda düşük kalsiyumlu uçucu kül geopolimer beton ve yüksek fırın cürufu bazlı alkali ile aktifleştirilmiş cüruf betonuna atık döküm kumu ilavesi betonların işlenebilirliğinin azalmasına yol açtığı gözlenmiştir. Düşük kalsiyumlu uçucu kül geopolimer karışımlarında atık döküm kumu ile nehir kumunun %60'ına kadar değişiminin 28 günlük basınç dayanımında sürekli bir artışa neden olmuştur[26].

Toniolo ve ark. tek Al kaynağı olarak kırmızı çamur ve sodyum silikat kullandıkları çalışmalarında, 6M sodyum silikat çözeltisi ile üretilen numunelerde 45 MPa'a yakın basınç dayanımı değerleri elde etmişlerdir[27].

Liu ve ark. kırmızı çamurla değiştirilmiş magnezyum fosfat çimentoları (MPC) üzerinde deneysel çalışmalar yapmış ve kırmızı çamur ilavesinin, priz süresi, hidrasyon ısı, mekanik özellikler ve su direnci açısından karakterize edilen MPC özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, kırmızı çamur ile harmanlanmış taze MPC harcı, üstün çalışma özellikleri, 272,5 mm değerinde arttırılmış bir işlenebilirlik, yaklaşık 25 dakika uzun bir priz süresi ve ekzotermik reaksiyon yoğunluğunda sürekli bir azalma gösterdiği ve bu sayede onarım ve derz dolgu olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Magnezyumun kırmızı çamurla yer değiştirmesi, tüm kürün süresi boyunca harcın mekanik özelliklerini geliştirmiştir. Max. dayanım % 20 kırmızı çamur içeren harçtan, 28 günde 90,2 MPa basınç dayanımı olarak elde edilmiştir[28].

Venkatesh ve ark. Alümina üretimi sonrası açığa çıkan yüksek alkali katı atık olan kırmızı çamuru betonda çimentolu bir malzeme olarak kullanımını incelemiştir. Kırmızı çamur, betonun hidrasyon sıcaklığını iyileştirmiş, mukavemetini arttırmıştır. Tane boyutu betonun dayanım özelliğinin gelişmesine yardımcı olmuştur[29].

Singh ve ark. Kırmızı çamur ve uçucu kül bazlı geopolimer pastası (harcı) ile kaplanmış beton blokların dayanım özelliklerini incelemiştir. Isıl dayanım testinde, bloklar 600°C'de bir saat, asit dayanım testinde (%5 sülfürik asit çözeltisinde) dört hafta bekletilmiştir. Yüzey bozunması, mukavemet ve ağırlık kaybının değerlendirildiği numunelerde %30 ve 50 kırmızı çamur içeren harçların daha iyi dayanım gösterdiği tespit edilmiştir[30].

Kulkarni [31], Mucsi ve ark. [32] yaptıkları çalışmalarında kırmızı çamur ve uçucu kül bazlı geopolimerlerde fiziksel ve mekanik özelliklere olan etkileri değerlendirmiştir. Kırmızı çamurun %15'e kadar kullanılabilmesini ve geopolimerlerin mukavemetini arttırdığını tespit etmişlerdir.

Usha ve ark. kiremit atıklarında geopolymer bağlayıcının davranışını sodyum hidroksit, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve kür sıcaklığına bağlı olarak incelemiştir.

Uygun bağlayıcılık özelliğinin 11 molar NaOH, 2,5 sodyum silikat/sodyum hidroksit oranında ve 65°C’de 24 saat kür koşullarında elde edildiğini tespit etmişlerdir.[33]

Rovnonik ve ark. Metakaolen (MK) ve atık kırmızı tuğla tozların, alkali aktivatör olarak sodyum silikattan oluşan ikili geopolimer sistemini incelemişlerdir. %0-25-50-75-100 MK, atık tuğla tozu ile yer değiştirmiştir. Atık kırmızı tuğla tozu MK bazlı geopolimerin plastik viskozitesini azaltmıştır. En iyi değerler, 25 atık tuğla/75 MK ile elde edilmiştir [34].

Hamdi ve ark. geopolimer bağlayıcı üretmek için Tunus illitik –kaolinitik kilini ve endüstriyel atıklar (fosfor alçı ve tuğla atığı) kullanmışlardır. Alkali çözelti miktarı 14 molar NaOH ve kalsine kil yerine kırmızı tuğla atığının kullanımı ile aynı mekanik özellikler elde edilmiştir[35].

Youssef ve ark. yeni nesil geopolimer tuğlaların kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Granül fırın cürufu, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranının mekanik özelliklere etkilerinin değerlendirildiği çalışmada; 80 (cüruf)/20 (tuğla atığı), 8 molar NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH:2 olduğu numunelerde en iyi mukavemet değeri elde edilmiştir[36].

Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, kırmızı çamur ve kiremit/tuğla atıklarının geopolimer bileşiminde kullanılabileceği, alternatif bir hammadde olarak özellikleri bozmadan kullanılabildiği görülmektedir. Ayrıca incelenen çalışmaların genel olarak son birkaç yıl içinde geopolimer harç-ürün üzerinde kırmızı çamur ve endüstriyel atıkları konu aldığı ve yeni yapılacak çalışmaların bu yönde araştırma-geliştirmeye araştırmacıları sevk ettiği öngörülmektedir. Araştırmalarımıza göre, çömlek kırığı atıklarının geopolimer ürünlerde etkilerini konu alan bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Tez çalışmamızda bu ürünler için standart özellikleri bozmadan ürün maliyetini düşürmek ve ilimizde üretim gerçekleştiren çömlek atölyeleri ve fabrikasında oluşan atıkların geopolimer ürünlerde kullanılan malzemeler (kum-uçucu kül) yerine ilave edilmesi ile numunelerin ağırlık, dayanım, su emme, mikroyapı üzerine etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Testler sonucunda atıkların alternatif bir hammadde kaynağı olarak kullanılabileceği hem geopolimer üretimine, hem de Nevşehir ili ve ülke ekonomisine fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

## BÖLÜM 2

### MATERYAL ve METOT

#### 2.1 Malzemeler

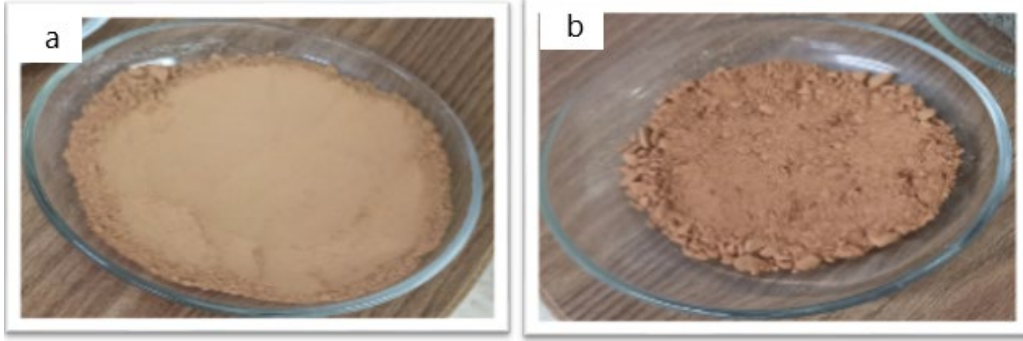
##### 2.1.1. Çömlek kırığı atıkları

Geopolimer karışımlarında alkali ile aktive etmek amacıyla çömlek kırığı atıkları Anadolu Çömlekçilik (Avanos/Nevşehir) firmasından temin edilmiştir. Firmadan pişme öncesi ve pişme sonrası kırıklar olarak temin edilen atıklar BC Teknoloji (Nevşehir) firmasında halkalı değirmende 63µm altına gelecek şekilde öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Çömlek kırığı tozlarının XRF metodu ile tespit edilen kimyasal analizi Tablo 1.' de, pişme öncesi ve sonrası şeklindeki toz görüntüleri ise Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Kimyasal içeriğinin yaklaşık %70'i SiO<sub>2</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'den oluşmaktadır. Çömlek atığı tozunun XRD ile kristal yapı analizi yapılmış olup, elde edilen kristal fazlar kuvars, mikroklin ve diopsittir (Şekil 2).

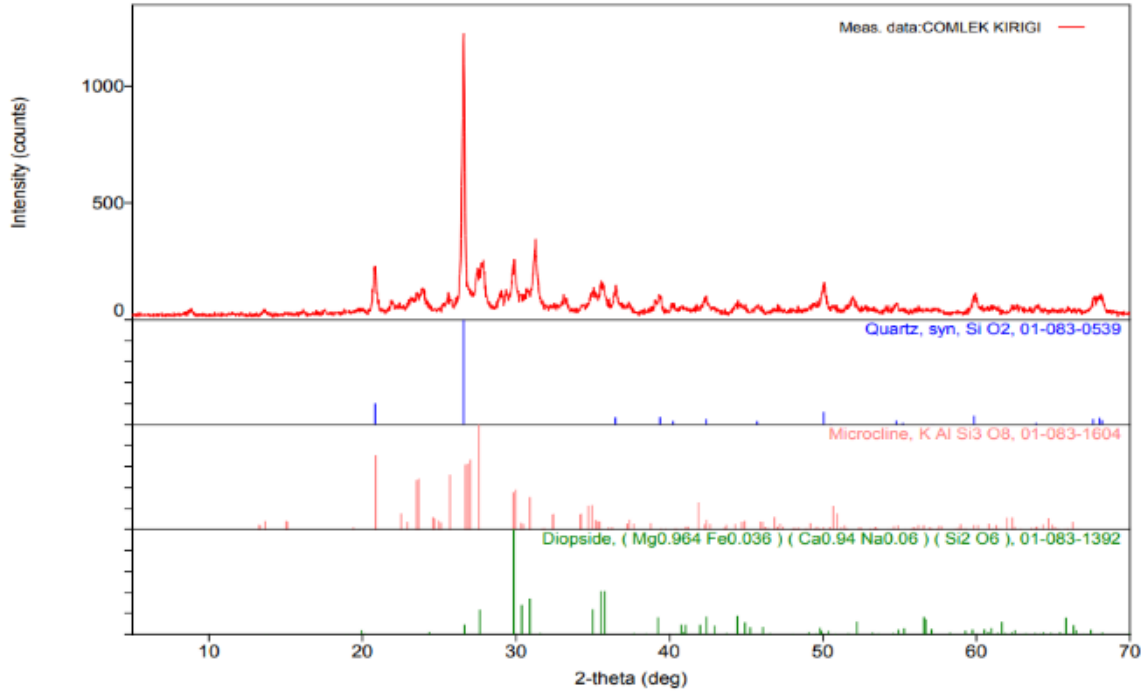
**Tablo 2.1.** Çömlek atığı tozunun kimyasal analizi

İçerik (%)	Çömlek atığı tozu
SiO <sub>2</sub>	54,46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,77
CaO	16,31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,51
K <sub>2</sub> O	3,26
MgO	3,04
Na <sub>2</sub> O	1,25
CO <sub>2</sub>	1,05
TiO <sub>2</sub>	0,66
SO <sub>3</sub>	0,37
MnO	0,10
BaO	0,11





**Şekil 2.1.** Anadolu Çömlekçilikten temin edilen a)pişme öncesi, b)pişme sonrası çömlek atığı tozları



**Şekil 2.2.** Çömlek atığı tozunun XRD faz analizi

### 2.1.2. Uçucu kül

Geopolimer karışımlarında Araz Metal Madenciliğin yardımıyla (İskenderun) Sığözü Termik Santrali uçucu külü kullanılmıştır. Bu külün kimyasal analizi Tablo 2.'de, toz görüntüsü ise Şekil 3'dedir[4].

**Tablo 2.2.** Uçucu külün kimyasal analizi [4]

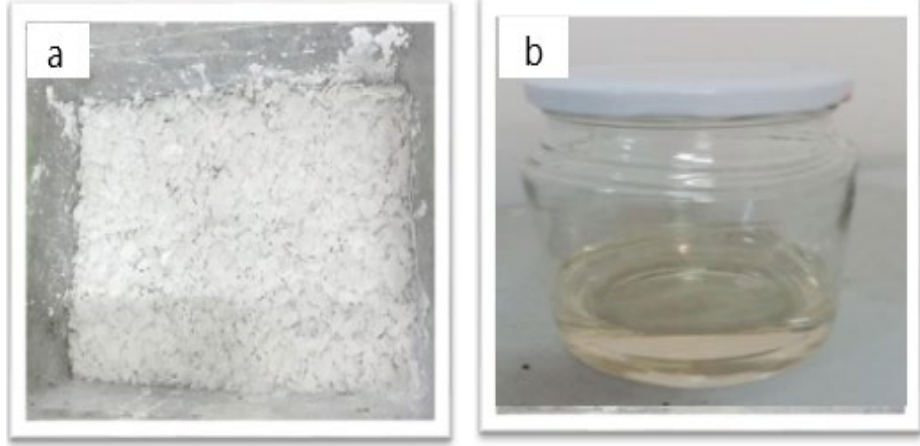
İçerik (%)	Sugözü uçucu kül
SiO <sub>2</sub>	60,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,69
CaO	1,52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,85
K <sub>2</sub> O	2,58
MgO	1,65
Na <sub>2</sub> O	0,92
SO <sub>3</sub>	0,53



**Şekil 2.3.** Kullanılan Uçucu Kül

### 2.1.3 Aktivatörler

Çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) aktivatör olarak kullanılmıştır. NaOH, nemden kolayca etkilenebilen, beyaz pul şeklinde, su ile ısı vererek çözünen bir aktivatördür. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ise piyasada cam suyu olarak da bilinen suda çözünen bir aktivatördür. En yaygın kullanıldığı sektör, seramik sektörüdür [4].



**Şekil 2.4.** Sodyum hidroksit ve sodyum silikat

#### **2.1.4.DereKumu**

Tez çalışmasında kum türü olarak Nevşehir il ve ilçelerindeki derelerden elde edilen standart kum olarak geçen Şekil 5’de görüntüsü verilen dere kumu kullanılmıştır.



**Şekil 2.5.** Karışımlarda kullanılan dere kumu

#### **2.1.5 Su**

Karışımların hazırlanmasında şehir şebekesinden alınan musluk suyu kullanılmıştır.

#### **2.2. Ön deneme çalışmaları**

Öncelikle aktivatör türünü belirleyebilmek için 7 günlük basınç dayanımı değerleri kıyaslanarak Tablo 3’de sunulan üç karışım hazırlanmıştır. 3 numaralı karışımın basınç dayanımının diğerlerine göre yüksek olmasına dayanarak NaOH (87g) aktivatör olarak seçilmiştir. Pişme sonrası ve pişme öncesi olarak öğütülen çömlek kırığı atıklarının uçucu kül yerine %25 ve %50 olarak ilave edildiği Tablo 4’de verilen karışımların basınç

dayanımları incelendiğinde pişme sonrası çömlek kırığı tozlarının dayanımı arttığı görülmüştür. Atık olarak pişme sonrası çömlek kırığının kullanılmasına karar verilmiştir.

**Tablo 2.3.** Aktivatör seçimi ön çalışması

Karışım No	Uçucu kül,g	Çömlek Kırığı,g	Kum,g	Aktivatör Tipi	Aktivatör Oranı,g	Su,g	Basınç dayanımı (MPa)
1	315	135	1350	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	228	41	7,7
2	315	135	1350	NaOH	81	203	6,5
3	315	135	1350	NaOH	87	180	18,9

**Tablo 2.4.** Pişme öncesi ve sonrası çömlek atıkları ile hazırlanan ön karışımlar

Karışım No	Uçucu kül,g	Çömlek Kırığı,g	Kum,g	Aktivatör Tipi	Aktivatör Oranı,g	Su,g	Basınç dayanımı (MPa)	
							Pişme Öncesi Atık	Pişme Sonrası Atık
1	450	0	1350	NaOH	87	180	21,1	
2	337,5	112,5	1350	NaOH	87	180	19,8	28,1
3	225	225	1350	NaOH	87	180	16,7	32,5

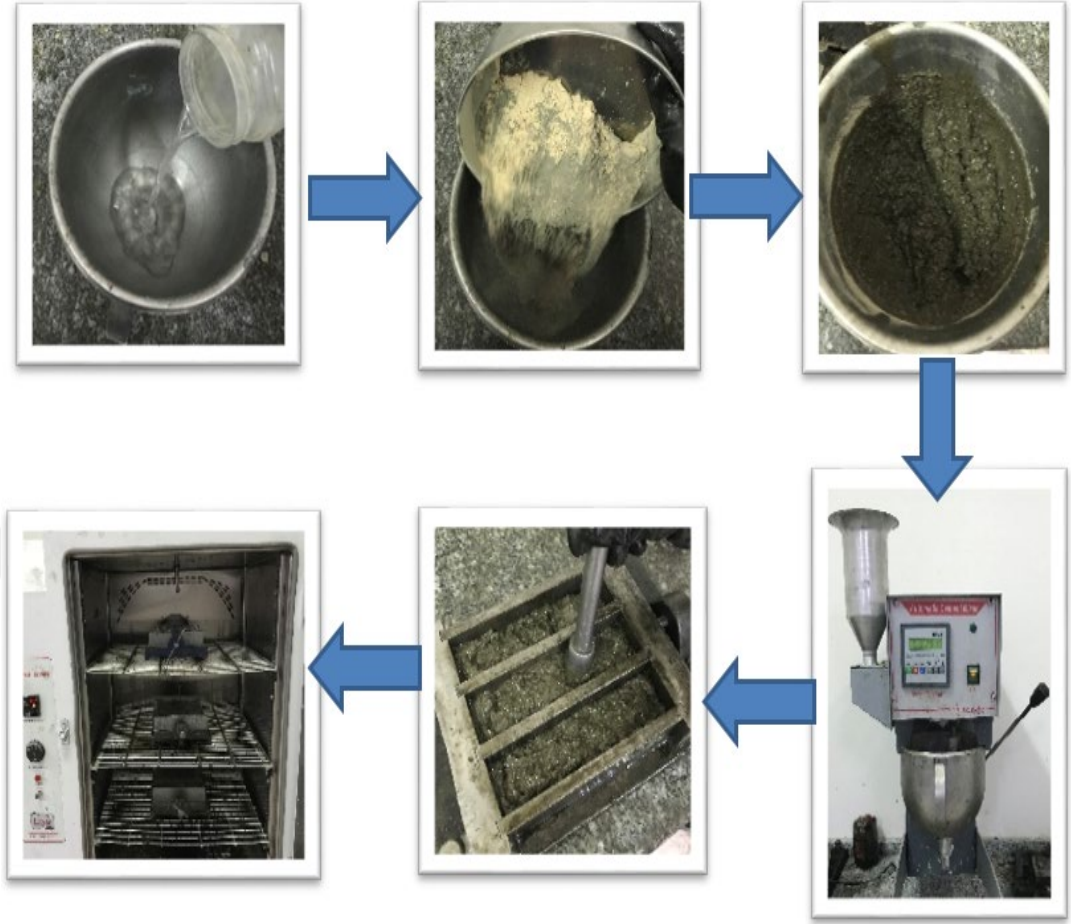
### 2.3. Deneysel çalışmalar

Ön çalışmalar sonucunda basınç dayanım sonuçları göz önüne alındığında geopolimer harç numuneleri elde edilmesi için uygun su/bağlayıcı oranı, aktivatör tip, uçucu kül yerine pişme sonrası çömlek kırığı atıklarının kullanılabilir olduğu belirlenmiştir. Pişme sonrası atıkların % 50'ye kadar uçucu kül yerine kullanımı ile dayanımın arttığı belirlendiği için yeni oluşturulacak karışımlarda çömlek atığı tozunun %10-20-30-40-50 oranlarında değişimini incelemek için Tablo 5'de verilen karışımlar hazırlanmıştır. Uçucu külün %100 olarak kullanıldığı 1 numaralı karışım referans olarak alınmıştır.

**Tablo 2.5.** Karışım oranları

<b>Yeni Karışım Kodu</b>	<b>Uçucu kül,g</b>	<b>Çömlek kırığı, %</b>	<b>Kum,g</b>	<b>Aktivatör Tipi</b>	<b>Aktivatör Oranı,g</b>	<b>Su,g</b>
<b>R0</b>	450	-	1350	NaOH	87	180
<b>R10</b>	405	%10	1350	NaOH	87	180
<b>R20</b>	360	%20	1350	NaOH	87	180
<b>R30</b>	315	%30	1350	NaOH	87	180
<b>R40</b>	270	%40	1350	NaOH	87	180
<b>R50</b>	225	%50	1350	NaOH	87	180

İlk aşamada karışım hazırlamak için su ve sodyum hidroksit ilavesi cam kavanoza konulmuştur. NaOH tamamen eriyinceye kadar kavanoz çalkalanmıştır. Bu tepkime, ısı veren bir tepkime olduğu için kavanozun oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen çözelti karıştırma kabına alınmıştır. Daha sonra karıştırma kabına çömlek atığı ve uçucu kül tozu konup 30 saniye karıştırdıktan sonra ikinci 30 saniye içerisinde kum eklenmiş yüksek hızda 30 saniye karıştırılmıştır. Karıştırıcı durdurulup ilk 30 saniyede kabın çeperlerindeki harç ortaya toplanarak toplam 90 saniye beklenmiştir. Ardından 60 saniye daha yüksek hızda devam edilerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Deneysel çalışmalarda üretilen harç karışımları TS EN 196-1'e göre Hobart Mikserinde karıştırılmıştır (Şekil 6.). Hazırlanan harç karışımları, dayanım deneyleri için Şekil 7'de görülen 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara sıkıştırma işlemi yapılarak yerleştirilmiştir. Laboratuvarda hazırlanan taze harç numuneleri kalıplara yerleştirildikten sonra kalıp ile birlikte ısıl kür süresini tamamlamaları için etüve yerleştirilmiştir. Kür süresi sonunda sertleşmiş harç numuneleri etüvden çıkarılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar laboratuvar ortamında soğuması beklenmiştir.



Şekil 2.6. Harçların hazırlama aşamaları

## 2.4. Deney Yöntemleri

### 2.4.1. Yayılma Tablası Deneyi

Hazırlanan geopolimer harçların işlenebilirliğini test etmek amacıyla TS EN 1015-3 Standardı'na uygun olarak yayılma tablası kullanılır. 300 mm çaplı tablanın üzerine ağzı açık yerleştirilen koni içerisinde taze harç doldurulur. Kalıp düzgünce kaldırıldıktan sonra taze harç, saniyede 1 kez olacak şekilde 15 kez düşürülerek yayılma çapı kumpas ile ölçülür [4]. Deney düzeneği Şekil 7'deki gibidir.



**Şekil 2.7.** Taze harç karışımları için yayılma tablası (işlenebilirlik) deneyi

#### 2.4.2- 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 [37].

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

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

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

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

Mk: Etüvden sonraki kuru ağırlık (g)

Md: Kuru yüzey doymun ağırlık (g)

Msu: Su içindeki ağırlık (g)

#### 2.4.3. Eğilme Dayanımı Deneyi

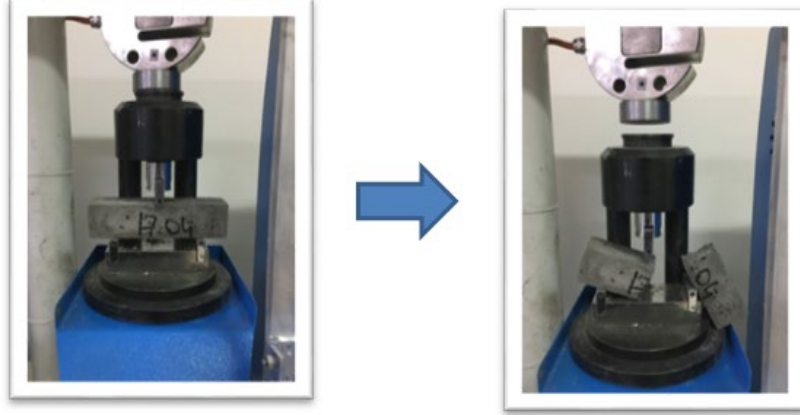
Geopolimer numunelere TS EN 1015-11 standardına göre eğilme dayanımı deneyi uygulanır. Mesnet açıklığı 100 mm, yükleme hızı 50 N/s olacak şekilde tek noktadan yükleme yapılarak 3 numunenin ortalama sonucu eğilme dayanımı değeri Bağıntı 5'e göre hesaplanır [37]. Eğilme dayanımı ölçümü Şekil 8'de gösterilmiştir.

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

F: Prizmanın ortasına uygulanan kuvvet (N)

l: Destek silindirleri eksenleri arasındaki mesafe (100mm)

b: Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (40 mm)



Şekil 2.8. Eğilme Dayanımı Testi

#### 2.4.4. 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. Test cihazı başlığı arasına yerleştirilen 500 N/s hızda yük uygulanmış numuneler için basınç dayanım hesabı Bağıntı 6 ile hesaplanır [37](Şekil 9).

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

b: basınç plakasının kenar uzunluğu (40 mm)

F:Kırılmadaki en büyük kuvvet (N)





Şekil 2.9. Basınç Dayanımı Deneyi

#### 2.4.5. 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 (Şekil 10) yardımıyla su içinde ağırlık ölçümü yapılarak Bağntı 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 doygun ağırlık (g)

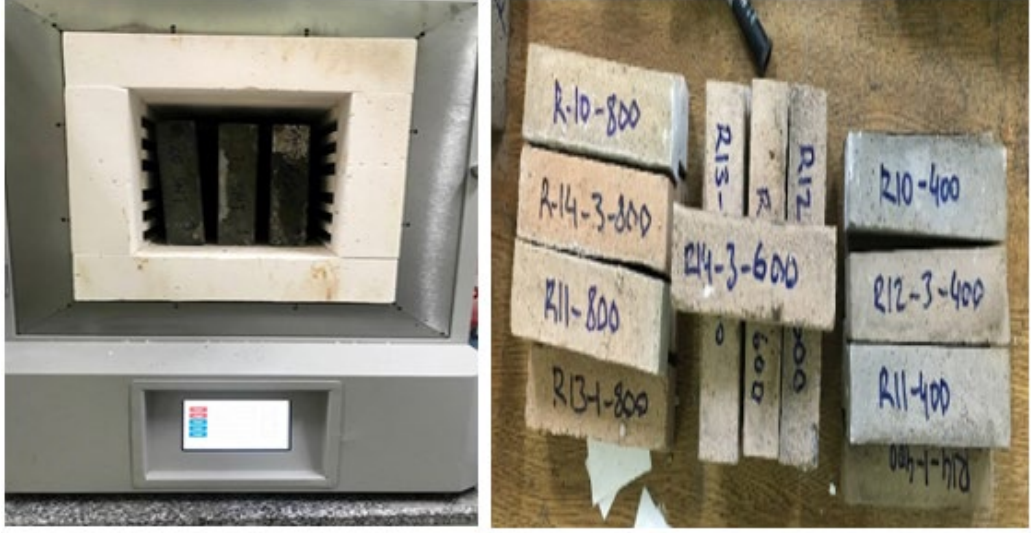
Msu: Su içindeki ağırlık (g)



**Şekil 2.10.** Su emme-boşluk ölçümü

#### **2.4.6.- 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 [14]. Bu özellikleri tespit edebilmek için yüksek sıcaklık fırınında 5°C/dakika 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 (Şekil 11) [37].



**Şekil 2.11.** Yüksek sıcaklığa tabi tutulan ürün grupları

### **2.2.7. Mikroyapı incelemeleri**

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

## BÖLÜM 3

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde uçucu kül yerine %10, %20, %30, %40 oranında pişme sonrası çömlek atığı içeren geopolimer harç numunelerinde işlenebilirlik deneyi, 90°C etüv sıcaklığında 1 gün bekletilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımı deneyleri, 400°C-600°C-800°C’de yüksek sıcaklığa dayanım tayini deneyi ve mikroyapı analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

#### 3.1. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

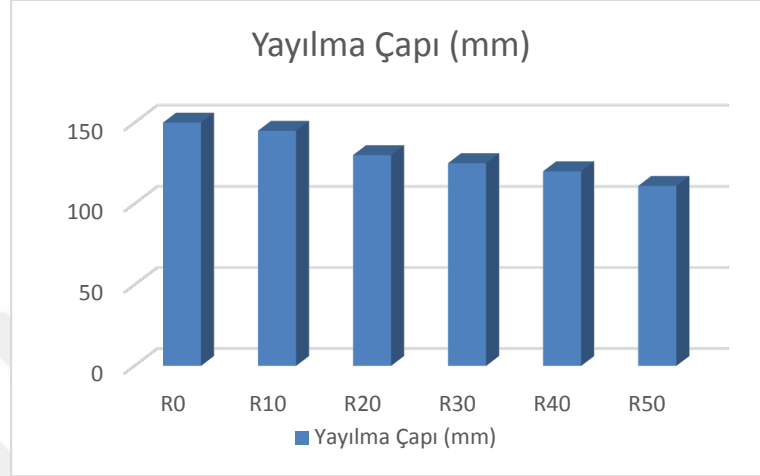
Çalışmada %10, %20, %30, %40, %50 oranında çömlek kırığı atığı ile üretilen geopolimer harç numuneler üzerinde elde edilen yayılma çapı deney sonuçları Tablo 6 ve Şekil 12’de sunulmuştur.

**Tablo 3.1.** Yayılma çapı değerleri

Numuneler	Yayılma Çapı
R0	150 mm
R10	145 mm
R20	130 mm
R30	125 mm
R40	120 mm
R50	111 mm

Uçucu kül kontrol harcının yayılma değeri 150 mm olarak ölçülmüştür. Pişme sonrası çömlek kırığı atığı ile hazırlanan harçların yayılma çapı değerleri 145-111 mm arasında ölçülmüştür. Atık miktarı arttıkça kıvam değerinde düşüşler olduğu tespit edilmiştir. İşlenebilirlik için kıvam, akışkanlık ve sıkıştırılabilirlik özelliklerinin de optimum düzeyde olabilmesi gerekir [14]. %50 çömlek atığı ilaveli harcın kalıbı doldurma ve kıvam sorunu

oluşturması nedeniyle incelemeler %40'a kadar olan harçlar için değerlendirilmiştir. Bu durum, çömlek atığının içeriğindeki CaO miktarına da bağlı olarak daha çok su emme eğiliminin olması ile açıklanabilir.



Şekil 3.1. Hazırlanan harçların yayılma çapı değerleri grafiği

### 3.2. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Çömlek atığı ile referans geopolimer harç numunelerinin etüvde 24 saat ısıtma kürlerini 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 Tablo 7.'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Numunelerin birim ağırlık ve yoğunluk değerleri

Birim Ağırlık ve Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> )				
Karışım	Görünür Birim Ağırlık	Görünür Yoğunluk	Kuru Yoğunluk	Doymuş Kuru Yoğunluk
R0	1,96	2,29	1,92	2,07
R10	1,96	2,29	1,93	2,07
R20	1,97	2,28	1,92	2,08
R30	1,97	2,29	1,92	2,09
R40	1,98	2,31	1,94	2,10

Referans karışımın görünür birim ağırlığı 1,96 g/cm<sup>3</sup> ve görünür yoğunluğu 2,29 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. %10, 20, 30 ve 40 çömlek atığı içeren geopolimer numunelerin görünür birim ağırlıkları sırasıyla 1,96; 1,97; 1,97 ve 1,98 g/cm<sup>3</sup>'tür. Görünür yoğunlukları ise sırasıyla 2,29; 2,28; 2,29 ve 2,31 g/cm<sup>3</sup> ölçülmüştür. Kuru yoğunluk ve

doygun kuru yoğunluk değerleri de yine referans numuneye benzer eğilim sergilemiştir. %40 çömlek kırığı içeren numunenin görünür yoğunluk, kuru yoğunluk ve doygun kuru yoğunluk değerleri referans numuneden biraz fazla çıkmıştır. %40 çömlek atığı değişiminin harçların birim ağırlıklarını biraz arttırdığı görülmüştür.

### 3.3. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

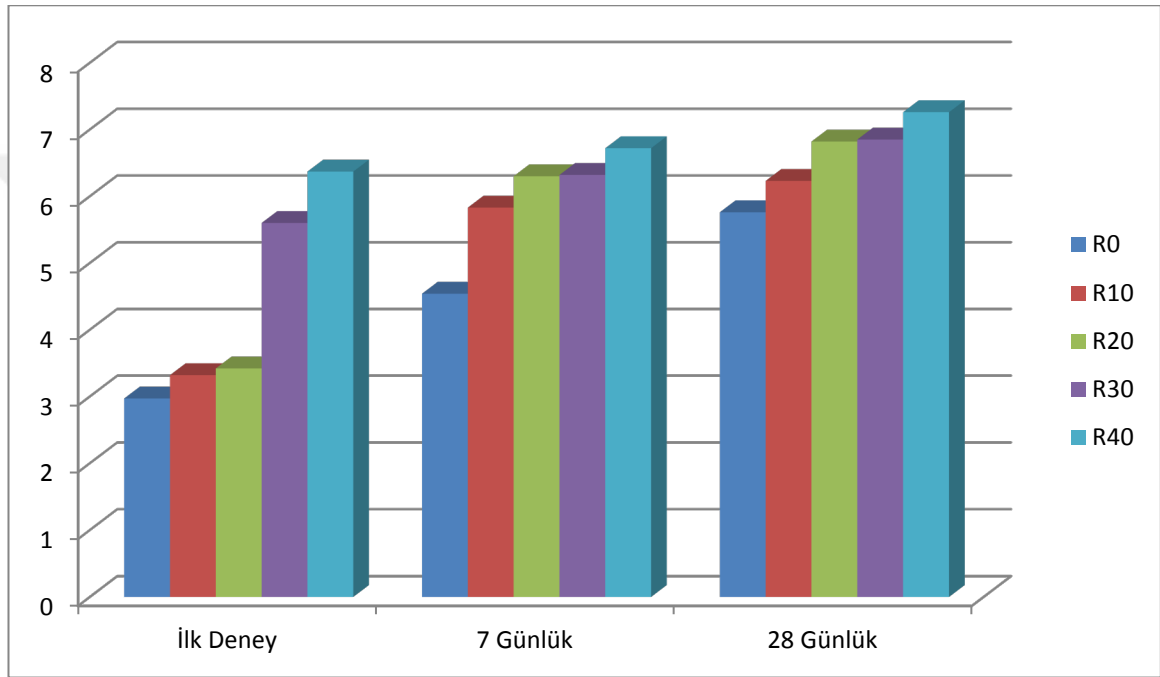
Çalışma kapsamında %10, %20, %30, %40 oranında pişme sonrası çömlek (PSC) atığı içeren ve Uçucu kül kontrol içeren 40x40x160 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Üretilen geopolimer numunelere 90°C sıcaklıkta 24 saat etüvde ısıl kür uygulanmıştır. Isıl kür prosesini tamamlayan numuneler oda sıcaklığına getirildikten sonra 3'er adet numune tek noktadan eğilme deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen okumaların ortalamaları alınarak eğilme dayanımı değerleri belirlenmiştir (Tablo 8.)

**Tablo 3.3.** Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Karışım	Uçucu kül,g	Çömlek kırığı, %	Kum, g	Aktivatör Oranı,g	Su,g	1 gün	7 gün	28 gün
						Eğilme Dayanımı MPa	Eğilme Dayanımı MPa	Eğilme Dayanımı MPa
R0	450	-	1350	87	180	2,97	4,54	5,76
R10	405	%10	1350	87	180	3,32	5,83	6,23
R20	360	%20	1350	87	180	3,42	6,30	6,82
R30	315	%30	1350	87	180	5,60	6,32	6,85
R40	270	%40	1350	87	180	6,37	6,72	7,26

Isıl kür prosesini tamamlayan numuneler oda sıcaklığına getirildikten sonra bir gün sonra ve 2 gruba ayrılarak 7 günlük ve 28 günlük (Tablo 8) olmak üzere oda sıcaklığında beklemeye bırakılmış ve belirlenen tarihlerde eğilme dayanımı testine maruz bırakarak eğilme dayanımı değerleri kıyaslanmıştır (Şekil 13). Değerler incelendiğinde uçucu külün %100 oranında kullanıldığı referans numunede 7 günlük ve 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla 4.54 ve 5.756 MPa olarak belirlenirken uçucu kül yerine çömlek atığının ilave miktarının artışı ile 7 günlük ve 28 günlük eğilme dayanımları değerleri sırasıyla 5,83-

6,72MPa ve 6,23-7,26MPa değerlerine ulaşmıştır. Çömlek atığı miktarı artışının eğilme dayanımını arttırdığı tabloda ve Şekil 13’de net görülebilmektedir. Bunun nedeni olarak, çömlek atığı içerisinde bulunan %CaO miktarının uçucu küle kıyasla çok olması düşünülmektedir ( $CaO_{atık}16,31 > CaO_{UK} 1.52$ ). Literatürde CaO miktarının bağ yapısı ve dayanım üzerinde CaO’in bağlayıcı özelliği nedeniyle numunelerin eğilme dayanımını daha yüksek değerlere çıkardığı görülmektedir [38].



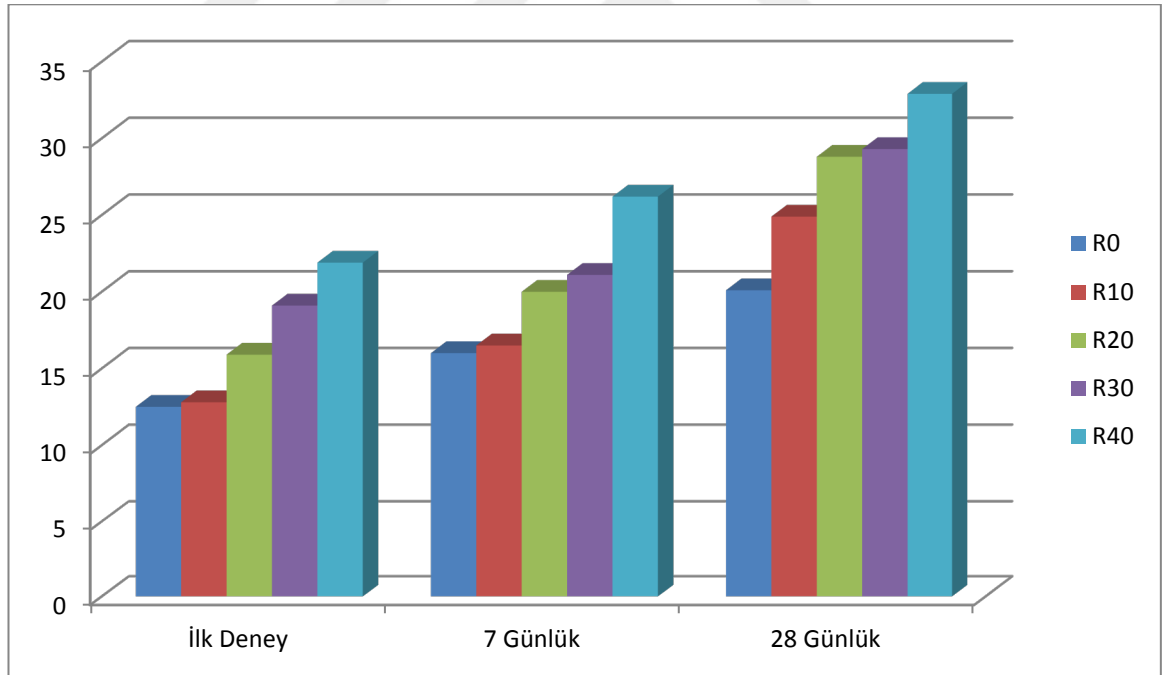
Şekil 3.2. Eğilme dayanımı karşılaştırma grafiği

#### 3.4. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Numunelere ilk olarak eğilme deneyi uygulanmış ve ikiye ayrılan parçalara 40x40 mm 2 plakalarda basınç dayanım deneyi yapılarak çıkan sonuçların ortalama değeri basınç dayanım değeri olarak belirlenmiştir (Tablo 9). Isıl kür sonrası 1-7-28 günlük olmak üzere basınç dayanımları arasındaki farklılıklar Şekil 14.’de gösterilmiştir.

**Tablo 3.4.** Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Karışım	Uçucu kül,g	Çömlek kırığı, %	Kum, g	Aktivatör Oranı,g	Su,g	1 gün	7 gün	28 gün
						Basınç Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa
R0	450	-	1350	87	180	12,5	16,00	20,10
R10	405	%10	1350	87	180	12,8	16,50	24,90
R20	360	%20	1350	87	180	15,9	20,00	28,80
R30	315	%30	1350	87	180	19,10	21,10	29,30
R40	270	%40	1350	87	180	21,9	26,20	32,90



**Şekil 3.3.** Basınç dayanımı karşılaştırma grafiği

Basınç dayanımı grafiği incelendiğinde, çömlek atığı artışı ile numunelerin basınç dayanımının arttığı görülebilmektedir. Literatürde CaO içeriğinin ortam sıcaklığında kür edilen geopolimerlerde dayanımı artırdığı, yüksek sıcaklıklarda kür edilenlerde ise dayanımı olumsuz etkilediği ve CaO içeriğinin N(C)-A-S-H jeli oluşumunda da önemli



etkisinin bulunduğu belirtilmektedir [38]. Bu sebeple çömlek atığı artışı ile numune içeriğinde artan CaO içeriğinin dayanım üzerinde olumlu etki yarattığı düşünülmektedir.

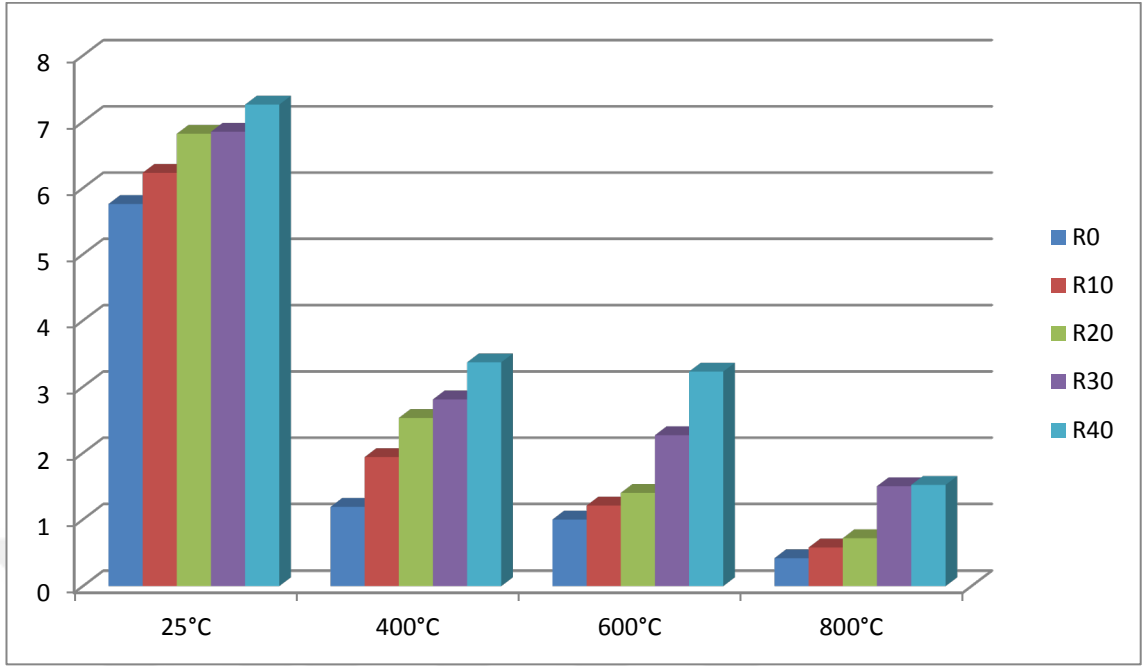
### 3.5. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklılık Deneyi Sonuçları

Yüksek sıcaklık etkisini araştırmak için üretilen numuneler 24 saat 90 °C’de ısıtılıp küre tabii tutulduktan sonra oda sıcaklığında 28 gün bekletilmiştir. 28 gün sonunda fırın sıcaklığı 5 °C/dak sıcaklık artışı ile 400 °C, 600 °C, 800 °C sıcaklıklarda 60 dakika pişirim sıcaklığına tabii tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklık deneyi sonrası numunelerin görünümü Şekil 15’de verilmektedir.



Şekil 3.4. Yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası Numune Görselleri

Yüksek sıcaklık deneyine tabii tutulan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında ölçülen eğilme dayanımı değerleri Tablo 10’da sunulmuştur. Dayanım değerleri incelendiğinde, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin tamamında eğilme dayanım değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 16). Değerler numuneler için kıyaslandığında çömlek atığı içeren numunelerde referans numuneye göre daha yüksek eğilme dayanımlarının elde edildiği görülebilmektedir.

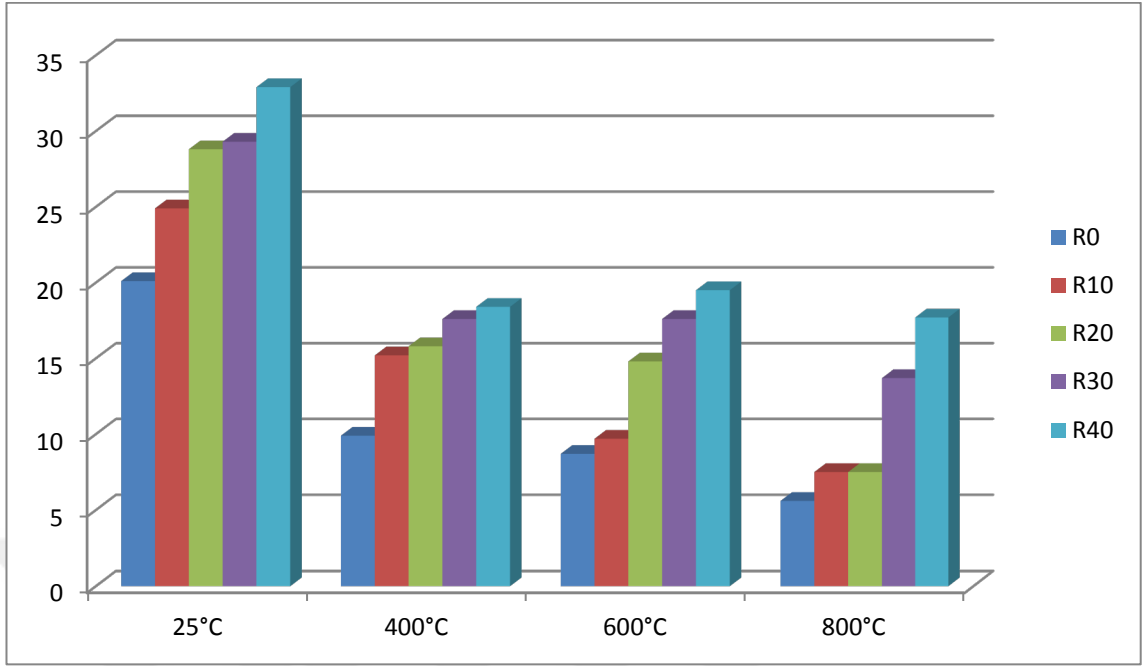


**Şekil 3.5.** 25°C ve 400 °C, 600°C, 800 °C yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları (MPa) karşılaştırma grafiği

**Tablo 3.5.** 400 °C, 600°C ve 800 °C yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımları (MPa)

Karışım No	Uçucu kül,g	Çömlek kırığı, %	Yüksek sıcaklık (28 günlük)	400°C	600°C	800°C
R0	450	-	5,76	1,19	1,00	0,42
R10	405	%10	6,23	1,94	1,21	0,58
R20	360	%20	6,82	2,53	1,40	0,72
R30	315	%30	6,85	2,81	2,27	1,50
R40	270	%40	7,26	3,37	3,23	1,52

Yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan numunelerin deney öncesi ve sonrasında ölçülen basınç dayanımı değerleri ise Tablo 11’de ve Şekil 17’de sunulmuştur. Yanma öncesi ve sonrası dayanımlar incelendiğinde 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin tamamında basınç dayanım değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Çömlek atığı içeren numunelerde referans numuneye göre daha yüksek basınç dayanımlarının elde edildiği görülebilmektedir.%40 ilavede dayanım sonuçları referans numunenin 2 katına ulaşmıştır.



**Şekil 3.6.** 25°C ve 400 °C, 600°C ve 800 °C yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları (MPa) karşılaştırma grafiği

**Tablo 3.6.** 400 °C, 600°C ve 800 °C yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımları (MPa)

Karışım No	Uçucu kül,g	Çömlek kırığı, %	Yüksek sıcaklık öncesi (28 günlük)	400°C	600°C	800°C
R0	450	-	20,10	9,9	8,7	5,6
R10	405	%10	24,90	15,2	9,7	7,5
R20	360	%20	28,80	15,8	14,8	7,5
R30	315	%30	29,30	17,6	17,6	13,7
R40	270	%40	32,90	18,4	19,5	17,7

### 3.6. Su emme ve boşluk oranı deney sonuçları

Hazırlanan numuneler, 90°C sıcaklıkta 24 saat ısıtma uygulandıktan sonra 28 gün oda sıcaklığında bekletilmiş ve su emme boşluk oranı deneyi uygulanmıştır. Numuneler su banyosuna konularak 24 saat boyunca su içerisinde bekletilmiş, 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. Geopolimer numunelerinin kuru yüzey doygun ağırlıkları, kuru ağırlıkları ve Arşimet sepetinde tartılan su içindeki ağırlıkları ile numunelerin boşluk

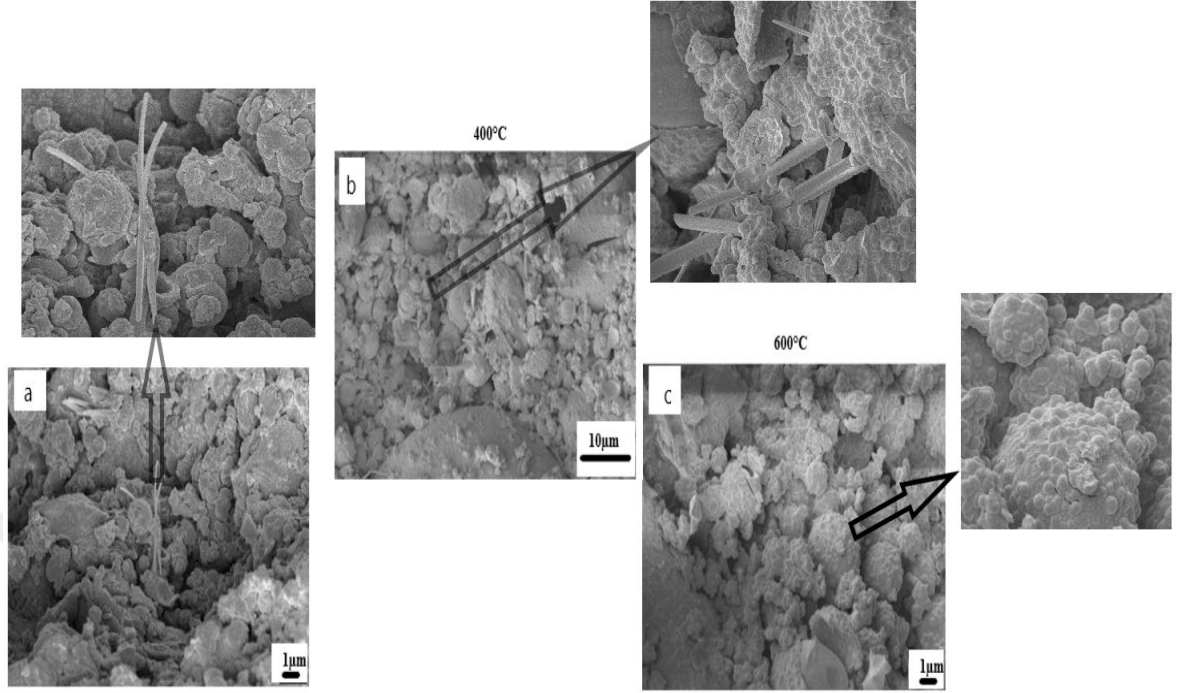
oranları ve su emme değerleri hesaplanmıştır. Su emme ve boşluk oranı miktarları Tablo 12’de sunulmuştur. Çömlek atığı miktarı artışı ile genel olarak numunelerde referansa kıyasla boşluk oranı ve su emme miktarının düşme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sonuç, çömlek atığı ile alkali aktive harçlarda atığın içerisindeki CaO ile oluşabilecek C,N-A-S-H jel reaksiyonu ile yoğun bir yapının elde edildiğine işaret etmektedir.

**Tablo 3.7.** Hazırlanan numunelerin boşluk oranı ve su emme değerleri (%)

<b>Karışım Kodu</b>	<b>% Boşluk Oranı</b>	<b>%Su Emme Oranı</b>
<b>R0</b>	16,4	8,4
<b>R10</b>	16,3	8,1
<b>R20</b>	15,9	8,1
<b>R30</b>	15,7	8,0
<b>R40</b>	15,2	7,8

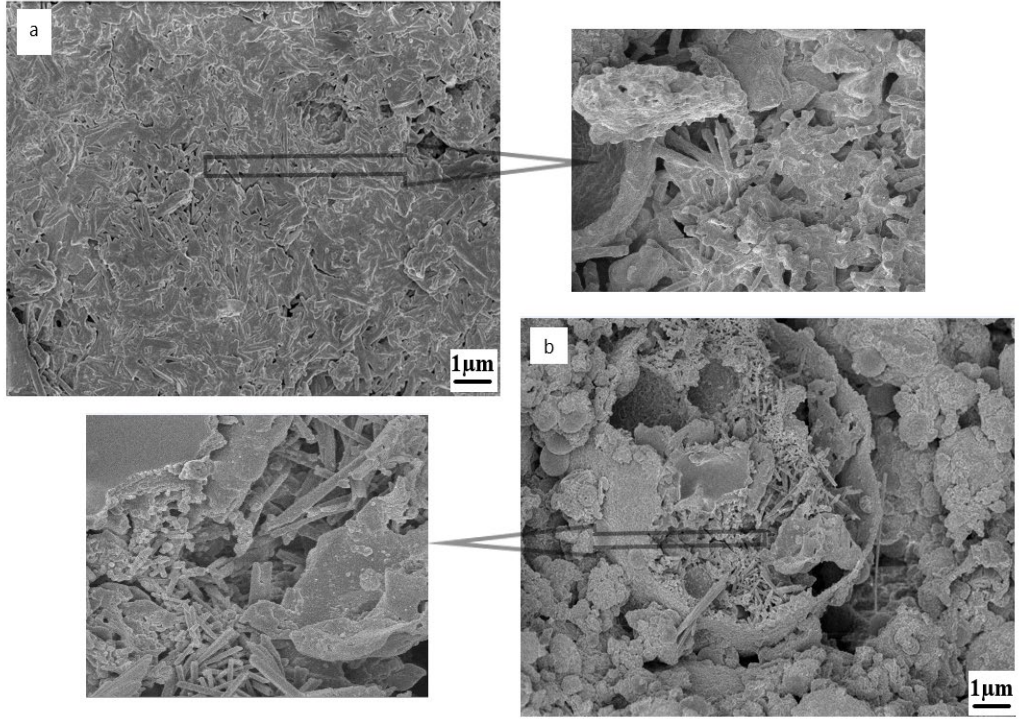
### **3.7. Mikroyapı incelemeleri**

Referans numune üzerinde yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası 400°C ve 600°C’lerdeki numune içyapıları incelenmiştir. Numune içyapılarının genel ve daha büyük büyütme görüntüleri incelendiğinde sıcaklığın artışı ile az sayıdaki lif yapılı kristal yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası 400°C’de göze çarparken, 600°C’de kaybolduğu görülmektedir. 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 18).

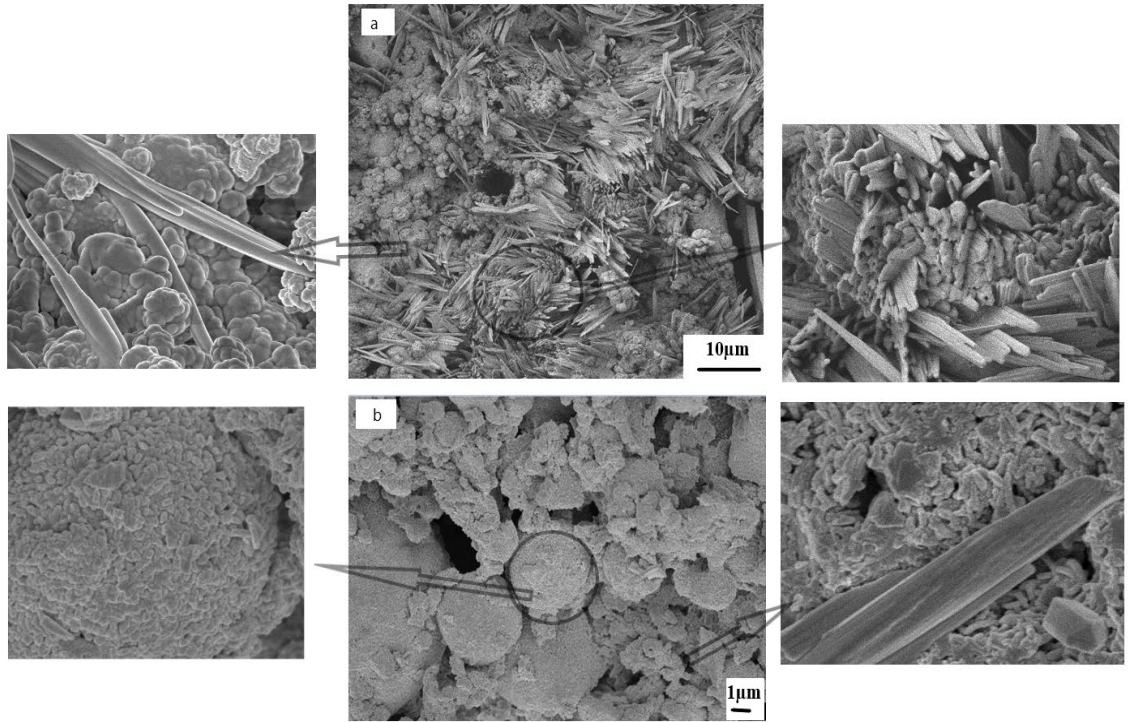


**Şekil 3.7.** Referans numunenin mikroyapı görüntüleri a yüksek sıcaklık öncesi, b)400°C, c)600°C

Çömlek atığı içeren numunelerden %10 ve %40 atık içeren numuneler seçilmiş ve yüksek sıcaklık öncesi ve 400°C pişirim sonrasında numune içyapılarında oluşan değişim incelenmiştir (Şekil 19-20). R10 numunesinde yüksek sıcaklık öncesi görüntü incelendiğinde küçük büyütme ile verilen görüntüde yapının yoğun N-A-S-H jel yapısında olduğu ve büyütülmüş görüntülerde iğnemsî kristallerinin oluşmaya başladığı görülmektedir. R10 numunesinin 400°C'deki mikroyapısı incelendiğinde sıcaklığın etkisi ile iğnemsî kristallerin belirginleştiği ve 1μm'dan büyük kristallerin oluştuğu gözlenmektedir. Ca/Si oranının artması ile hidrasyon ürünü olan kalsiyum silikat hidrat jelin morfolojisi ince sacdan uzun lifli yapıya dönüşür [39]. Bu durum, referans numune ile kıyaslandığında çömlek atığından gelen yüksek CaO ve uçucu küle kıyasla azalan SiO<sub>2</sub> içeriği ile R10 numunesinde uzun lifli kristallerin nasıl oluştuğunu kanıtlamaktadır. Bu uzun lifli kristallerin kompakt bir yapı sergileme eğilimi ve C,N-A-S-H jelinin de boşlukları doldurup yoğun bir yapı eldesine katkı sağlayabildiği görülmektedir. Bu durum yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası çömlek atığı içeren numunelerdeki dayanım artışını su emme düşüşünü de açıklayabilmektedir.



**Şekil 3.8.** %10 çömlük atığı içeren numunenin mikroyapı görüntüleri a) yüksek sıcaklık öncesi, b)400°C.



**Şekil 3.9.** %40 çömlük atığı içeren numunenin mikroyapı görüntüleri a) yüksek sıcaklık öncesi, b)400°C.

%40 Çömlek atığı içeren R40 numunesinin yüksek sıcaklık öncesi mikroyapısı incelendiğinde uzun iğnemsî kristallerin daha da belirginleştiği ve 10µm boyutlarına ulaştığı birbirine kenetlenerek kompakt bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Bu iğnemsî kristallerin belirginleşmesinin nedeni, çömlek atığı içeriğindeki CaO miktarının yüksek olmasıdır. %40 ilave ile yapıda CaO miktarı referans numuneye kıyasla daha da artmaktadır. İçyapıların büyütülmüş hallerinde de bu fark net olarak görülebilmektedir. 400°C pişirim sonrasında ise C,N-A-S-H jel yapısı ve aralarda çözünmeye başlayan iğnemsî kristaller göze çarpmaktadır.



## BÖLÜM 4

### SONUÇ VE ÖNERİLER

- Uçucu kül yerine çömlek atığı ilave edilen numuneler ve referans numunenin elde edilen yayılma çapı değerleri incelendiğinde çömlek atığı ilavesi ile yayılma çapı değerlerinde azalma görüldüğü tespit edilmiştir. Atık katkı miktarının artışı ile azalan işlenebilirlik değişiminin nedeni çömlek atığı içerisinde bulunan CaO miktarı ve buna bağlı olarak su emme eğiliminin artması olarak düşünülmektedir.
- Referans numune ve çömlek atığı ilaveli yeni numunelerin görünür birim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri birbirine yakın ölçülmüştür. Çömlek atığı ilavesinin %40 olduğu R40 numunesinin kuru yoğunluk ve doymuş kuru yoğunluk değeri referans ve diğer numunelerden yüksektir.
- Referans numunenin eğilme dayanımı ilk deneme ve 7, 28 günlük olarak sırasıyla 2,97 MPa, 4.54 MPa ve 5,76 MPa olarak elde edilmiştir. Çömlek atığı ilavesi eğilme dayanımını referansa kıyasla arttırmıştır katkı miktarının artışı ile eğilme dayanımı aralıkları ilk deneme, 7 günlük ve 28 günlük olarak sırasıyla 3,32-6,37; 5,83- 6,72; 6,23-7,26 olarak elde edilmiştir. Atıkla hazırlanan numunelerin eğilme dayanımları referans numuneden fazladır.
- Referans numunenin basınç dayanımı ilk deneme ve 7, 28 günlük olarak sırasıyla 12,5 MPa, 16,00 MPa ve 20,10 MPa olarak elde edilmiştir. Çömlek atığı ilavesi basınç dayanımını referansa kıyasla arttırmıştır katkı miktarının artışı ile basınç dayanımı aralıkları ilk deneme, 7 günlük ve 28 günlük olarak sırasıyla 12,80-21,90; 16,00-26,20; 16,80-32,90 olarak elde edilmiştir. Ön denemelerde %50 atıkla hazırlanan numunenin basınç dayanımı 32,50 MPa olarak elde edilmiştir. Bu durum %40'dan itibaren düşüş eğilimine başladığını göstermektedir. Atıkla hazırlanan numunelerin basınç dayanımları referans numuneden fazladır.
- Referans numunelerinin 400 °C, 600 °C ve 800 °C'lerdeki yüksek sıcaklıklar sonrası eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 1,19 MPa, 1,00 MPa ve 0,42 MPa ölçülmüştür. Çömlek atığı ilavesi yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımını referansa kıyasla arttırmıştır katkı miktarının artışı ile 400°C, 600°C ve 800°C'lerdeki basınç dayanımı aralıkları sırasıyla 1,94- 3,37; 1,21-3,23; 0,58-1,52 olarak elde edilmiştir. Pişirim sıcaklığının artışı ile eğilme dayanım değerlerinin



düşüş eğilimi sergilediği gözükse de çömlek atığı miktarı artan numunelerde referansa kıyasla daha yüksek değerler elde edilmiştir.

- Referans numunelerinin 400 °C, 600 °C ve 800 °C’lerdeki yüksek sıcaklıklar sonrası basınç dayanımı değerleri sırasıyla 9,9 MPa, 8,70 MPa ve 5,60 MPa ölçülmüştür. Çömlek atığı ilavesi yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımını referansa kıyasla arttırmıştır katkı miktarının artışı ile 400°C, 600°C ve 800°C’lerdeki basınç dayanımı aralıkları sırasıyla 15,2-18,4; 9,7-19,5; 7,5-17,7 olarak elde edilmiştir. Pişirim sıcaklığının artışı ile basınç dayanım değerlerinin düşüş eğilimi sergilediği gözükse de çömlek atığı miktarı artan numunelerde referansa kıyasla daha yüksek değerler elde edildiği, %40 ilavede ise referans numunede ulaşılan değerlerin 2 katına yükseliş sağlandığı tespit edilmiştir.
- Referans numunelerinin su emme ve boşluk oranı değerleri sırasıyla %8,4 ve %16,4 bulunmuştur. Çömlek atığı ilavesi boşluk oranını azaltmış buna bağlı olarak su emme oranında da bir düşüş gerçekleşmiştir. %10-20-30-40 ilave için elde edilen %boşluk değerleri sırasıyla 16,3; 15,9;15,7;15,2’dir. %10-20-30-40 ilave için elde edilen %su emme değerleri sırasıyla 8,1; 8,1; 8,0; 7,8’dir.
- Hazırlanan numunelerin mikroyapı görüntülerinde, referans numune için N-A-S-H jellerinin sıcaklığın artışı ile yoğunlaşmaya büyük bir katkı sağlayamadığı ve porozitenin arttığı bu nedenle referans numunede sıcaklık artışına bağlı dayanım düşüşleri tespit edilmiştir. R10 numunesinin yüksek sıcaklık öncesi ve 400°C’deki mikroyapısı incelendiğinde uzun lifli kristallerin belirginleştiği ve 1µm’den büyük kristallerin oluştuğu gözlenmektedir. R10 numunesinde uzun lifli kristallerin kompakt bir yapı sergileme eğilimi ve C,N-A-S-H jelinin de boşlukları doldurup yoğun bir yapı eldesine katkı sağlayarak su emme-boşluk oranını düşürdüğü ve dayanım değerlerini de arttırdığı tespit edilmiştir.
- R40 numunesinin yüksek sıcaklık öncesi ve 400°C’deki mikroyapılarında iğnemsî kristallerin belirginleştiği ve 10µm boyutlarına ulaştığı, birbirine kenetlenerek kompakt bir yapı oluşturduğu görülmektedir. İğnemsî kristallerin belirginleşmesinin nedeni çömlek atığı içeriğindeki CaO miktarının yüksek olmasıdır.
- Kapodokya bölgesinde sayısı fazla olan seramik atölyeleri ve çömlek üretimi gerçekleştiren bir fabrikadan temin edilen önemli endüstriyel atıklarından biri olan çömlek kırığı atıklarının geopolimer ürün üretiminde uçucu kül yerine

kullanılabilirliği ile ve elde edilen gelişmiş fiziksel-mekanik geopolimer özellikleri ile Nevşehir ili ve ülke ekonomisine, uçucu külün yoğun kullanıldığı inşaat sektörüne önemli katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

- Geopolimer retiminde, uçucu kül yerine %40' a varan oranlarda çömlek atığı kullanımı ile mekanik özelliklerde referans numune dayanım değerlerinin iki katına ulaşılmıştır. Hem gelişmiş özellikler kazandırması, hem de atığın değerlendirilmesi ve literatürde çömlek kırıklarının geopolimerlerde değerlendirilebilirliği üzerine bir çalışmaya rastlanmamış olması nedeniyle bu tez çalışması literatüre de önemli katkı sağlayacak bir çalışmadır.



## KAYNAKLAR

1. Khale, D. ve Chaudhary, R. “Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A Review”, *J Mat. Sci.*, 42, 729-746, 2007.
2. Zeybek, O., “Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi”, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek lisans Tezi, Eskişehir, 2009.
3. Alvarez-Ayuso, E., Querol, X., Plana, F., Alastuey, A., Moreno, N., Izquierdo, M., Font, O., Moreno, T., Diez, S., Vazquez, E. ve Barra M., “Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes”, *J. Hazard. Mater.*, 154, 175-183, 2008.
4. Atabey İ.İ., “F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması”, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora tezi, Kayseri, 2017.
5. Kaplan, G., Gültekin A.B., “Yapı sektöründe uçucu kül kullanımının çevresel ve toplumsal etkiler açısından incelenmesi”, *International Sustainable Building Symposium*, 1-8, Ankara, 2010.
6. <http://www.avanospottery.com/tr/> (Atığın temin edildiği fabrika).
7. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/c-mento-uret-m--20200110113349.pdf>
8. Gümüş, A., “Geopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi Afyon, s. 1-2, 2016.
9. Ibrahim, A.K., Al-Kerttani, O., Abbas, S.R., “Properties of geopolymer mortar subjected to high temperature”, *Key Engineering Mat.*, 858: 193-198, 2020.
10. Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S.K., “Geopolymer concrete: a review of some recent developments”, *Const. Build. Mater.*, 85, 78-90, 2015
11. Boum, R.B.E., Kaze, C.R., Nemaleu, J.G.D., Djaoyang, V.B., Rachel, N.Y., Ninla P.L., Owono, F.M., Kamseu, E., “Thermal behaviour of metakaolin-bauxiteblends geopolymer: microstructure and mechanical properties”, *SN Appl.Sci.*, 2020, 2: 1358.
12. Bingöl, Ş., Bilim, C., Atış, C.D., Durak, U., İlkentapar, S., Karahan, O., “An investigation of resistance of sodium meta silicate activated slag mortar to acidic and basic mediums”, *Revista de la Const.*, 19(1), 128-133, 2020.

13. Rakhimova, N.R., “A review of calcined clays and ceramic wastes as sources for alkali-activated materials”, *Geosys. Engineer*, 23(5): 287-298, 2020.
14. Şinik, O., “Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon, 2019.
15. Maraş M.M., “Elazığ ferrokrom çürüfundan üretilen geopolimer çimentolu betonların sülfat direncinin araştırılması”, *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans tezi, Malatya, 2013.
16. Kantarcı F., “Elazığ ferrokrom çürüfundan alkali aktivasyon metoduyla üretilen geopolimer çimentolu betonların yangın dayanımının araştırılması”, *İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans tezi, Malatya, 2013.
17. Sullivan A., Hill R.G. “Inexpensive glass polialkenoate Cement based on waste gasifier slag”, *Proceedings of the european union thematic progress workshop*, Morella, 2001.
18. Örklemiz E., “Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarda diatomit ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması”, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 2020.
19. Toğrul Ç., “Geleneksel Avanos çömlekçiliğinde yaşanan değişim ve nedenleri”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü*, Yüksek Lisans tezi, Isparta, 2016.
20. <https://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87%C3%B6mlek%C3%A7ilik> (Giriş tarihi 17.11.2021)
21. Ünal S., “Çağların akışında Anadolu pişmiş toprak kültürü”, *USBAD Uluslararası Sosyal Bilimler Akademi Dergisi*, 4(2), 928-930, 2020.
22. Güner G., “Anadolu’da yaşamakta olan ilkel çömlekçilik”, Ak Yayınları Kültür Serisi: 16-5, Grafik Sanatlar Matbaacılık A.Ş., İstanbul, 1988. (<http://www.katpatuka.org/ilkel/index.shtml>).
23. 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.
24. Yaprak, H., Kaplan, G., “Farklı kür koşullarının Taban Külü Katkılı Jeopolimerlerin Termal ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *Tünav Bilim Dergisi*, 9/3, 41-51, 2016.

25. Kaya, M., Uysal, M., Yılmaz, K., “Jeopolimer harçlarda dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi ile incelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 248-256, 2018.
26. Bhardwaj, B., Kumar, P., “Comparative study of geopolymer and alkali activated slag concrete comprising waste foundry sand”, *Const. Build. Mater.* 209, 555-565, 2019.
27. Toniolo, N., Rincon, A., Avadhut, Y.S., Hartmann, M., “Novel geopolymers incorporating red mud and waste glass cullet”, *Mater. Letters*, 219, 152-154, 2018.
28. Liu, Y., Qin, Z., Bing, Chen, “Experimental research on magnesium phosphate cements modified by red mud”, *Const. Build. Mater.*, 231, 117131, 2020.
29. Venkatesh C., Rama Chand MS., Nerella R., “A state of the art on red mud as a substitutional cementitious material”, *Annales de Chimie: Science des Materiaux*, 43, 99-106, 2019.
30. Singh, S., Biswas, R.D., “Experimental study on red mud based geopolymer concrete with fly ash GGBS in ambient temperature curing”, *Int. J Adv. Mechanic. Civil Engineer.*, 5-8, 2016.
31. Kulkarni, S., “Experimental study on red mud, fly ash, GGBFS based geopolymer concrete”, *Int. J Engineer. Res. Tech.* 7(12), 107-111, 2018.
32. Mucsi, G., Szabo, R., Racz, A., Kristaly, F., Kumar, S., “ Combined utilization of red mud and mechanically activated fly ash in geopolymers”, *Mining Geology-Petrol.Engineer. Bull.*, 27-36, 2019.
33. Usha, S., Nair, D.G., Vishnudas, S., “Feasibility study of geopolymer binder from terracotta roof tile waste”, *Procedia Technology*, 25, 186-193, 2016.
34. Rovnanik, P., Rovnanikova, P., Vysvaril, M., Grzeszczyk, S., “Rheological properties and microstructure of binary waste red brick powder/metakaolin geopolymer”, *Const. Build. Mater.*, 188, 924-933, 2018.
35. Hamdi, N., Messaoud, I.B., Srasra, E., “Production of geopolymer binders using clay minerals and industrial wastes”, *Comptes Rendus Chimie*, 22, 220-226, 2019.
36. Youssef, N., Rabenantoandro, A.Z., Dakhli, Z., Chapiseau, C., Waendendries, F., Chehade, F.H., Lafhaj, Z., “Reuse of waste bricks: a new generation of geopolymer bricks”, *Sn Appl. Sci.*, 1,1252, 2019.

37. 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.
38. Kaya, M., “Yüksek ve düşük kalsiyum içeren uçucu küller ile üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(2), 96-104, 2020.

