

**GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE AFYONKARAHİSAR  
BÖLGESİNDEKİ TUĞLA FABRİKALARINDAN ELDE EDİLEN  
ATIK TUĞLA TOZLARININ KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sayeed Quadratullah HABİBİ

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA

İkinci Danışman

Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mart 2022

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE AFYONKARAHİSAR  
BÖLGESİNDEKİ TUĞLA FABRİKALARINDAN ELDE EDİLEN  
ATIK TUĞLA TOZLARININ KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

**Sayed Qudratullah HABIBI**

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA**

**İkinci Danışman**

**Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Mart 2022**

## TEZ ONAY SAYFASI

Sayeed Quadratullah HABIBI tarafından hazırlanan “Geopolimer Harç Üretiminde Afyonkarahisar Bölgesindeki Tuğla Fabrikalarından Elde Edilen Atık Tuğla Tozlarının Kullanımının Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 11/03/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Anabilim Dalı Adı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA

**İkinci Danışman** : Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

**Başkan** : Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK  
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah DEMİR  
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi



Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... /..... /..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

11/03/2022



Sayeed Qudratullah HABIBI

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### GEOPOLİMER HARÇ ÜRETİMİNDE AFYONKARAHİSAR BÖLGESİNDEKİ TUĞLA FABRİKALARINDAN ELDE EDİLEN ATIK TUĞLA TOZLARININ KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Sayeed Qudratullah HABIBI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOĞA

**İkinci Danışman:** Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ

Afyonkarahisar bölgesinde yaklaşık yirmi adet tuğla fabrikası vardır ve bu fabrikalarda hatalı üretimlerin sonucunda ya da taşıma sırasında parçalanma sebebiyle oldukça fazla oranda atık tuğla parçaları ve tozları ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında Afyonkarahisar bölgesinde üretilen pişirilmiş kil tuğlalarına ait atık tuğlaların öğütülmesi ile elde edilen tuğla tozları kullanılmıştır. Beş farklı tuğla fabrikası üretim teknolojilerine göre belirlenmiştir. Atık tuğla tozları ile ikame edilerek kullanılacak diğer hammadde olarak uçucu kül seçilmiştir. Harç üretiminde agrega olarak silis kumu kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak ise NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Farklı atık tuğla tozları (T1, T2, T3, HT1 ve HT2) ve farklı molaritelerde (5 ve 10M) üretilen geopolimer harçlarının fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Üretilen tüm numuneler 80°C sıcaklıktaki etüvde 5 saat boyunca kürlenmiştir. Etüv kürü sonrasında numuneler 28 gün boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Silindir şeklinde hazırlanan numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, görünen porozite, su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık deneyleri yapılmıştır. Üretilen silindir numunelerden elde edilen sonuçlara göre bazı geopolimer harç serileri seçilerek levha ve disk şeklinde numuneler üretilmiş ve bu numuneler üzerinde de eğilme dayanımı, elektriksel özdirenç ve yüzey sıcaklığı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen verilere göre atık tuğla tozları ile geopolimer harçların üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

**2022, x + 63 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer harç, Atık tuğla tozu, Uçucu kül

## **ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

### **INVESTIGATION ON USAGE OF WASTE BRICK POWDERS OBTAINED FROM BRICK FACTORIES IN AFYONKARAHİSAR REGION IN GEOPOLYMER MORTAR PRODUCTION**

Sayeed Qudratullah HABIBI

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Ahmet Raif BOĞA

**Co-Supervisor:** Assoc. Prof. Gökhan KÜRKLÜ

There are about twenty brick factories in the Afyonkarahisar region, so that a lot of waste brick pieces and dust are produced in these factories as a result of faulty production or due to fragmentation during transportation. In this thesis, brick powders obtained by recycling waste bricks belonging to fired clay bricks produced in the Afyonkarahisar region are used. Five different brick factories were determined according to their production technologies. Fly ash was chosen as the other raw material to be used as a substitute for waste brick dust. Silica sand was used as aggregate in mortar production. NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> were used as alkali activators. Physical and mechanical properties of geopolymer mortars produced in different waste brick powders (T1, T2, T3, HT1 and HT2) and different molarities (5 and 10M) were determined. All produced samples were heated in an oven at 80°C for 5 hours. After the oven cure, the samples were kept in the laboratory environment for 28 days. Unit weight, apparent density, apparent porosity, water absorption, ultrasonic pulse velocity, compressive strength and high temperature tests were performed on the cylindrical specimens. According to the results obtained from the produced cylindrical samples, some geopolymer mortar series were selected, plate and disk-shaped samples were produced, flexural strength, electrical resistivity and surface temperature tests were carried out on these samples. According to the obtained data, it was concluded that geopolymer mortars can be produced with waste brick dust.

**2022, x + 63 pages**

**Keywords:** Geopolymer mortar, Waste brick powder, Fly ash.

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Raif BOğA'ya, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen ikinci tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ'ye, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolay aileme, eşime ve oğlum Sayed Atiqul Rahman'na teşekkür ederim.

Sayed Qudratullah HABIBI

Afyonkarahisar 2022

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ .....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	3
2.1 Geopolimer .....	3
2.1.1 Geopolimerlerin Sentezi ve Kimyasal Yapısı .....	6
2.1.2 Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri .....	10
2.2 Atık Madde Olarak Tuğla Atığının Üretimi .....	11
2.2.1 Tuğla Atığının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri .....	15
2.3 Uçucu Külün Tanımı ve Üretimi .....	16
2.3.1 Uçucu Külün Sınıflandırılması .....	18
2.3.2 Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri .....	18
2.4 Alkali ile Aktive Edilen Geopolimerlerle İlgili Çalışmalar .....	19
3. MATERYAL ve METOT .....	28
3.1 Materyal .....	28
3.1.1 Tuğla Atığı .....	28
3.1.2 Uçucu Kül .....	30
3.1.3 Agrega .....	30
3.1.4 Alkali Aktivatör .....	30
3.2 Metot .....	31
3.2.1 Presleme İşlemi .....	33
3.2.2 Kalıplama İşlemi .....	34



3.3 Fiziksel ve Mekanik Deneyler .....	35
3.3.1 Birim Hacim Ağırlık, Görünür Yoğunluk, Görünen Porozite ve Su Emme.....	35
3.3.2 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.....	37
3.3.3 Basınç Dayanımı Deneyi .....	37
3.3.4 Yüksek sıcaklık deneyi .....	38
3.3.5 Eğilme Dayanımı Deneyi.....	38
3.3.6 Elektriksel Özdirenç Deneyi.....	39
3.3.7 Yüzey Sıcaklığı Deneyi .....	40
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	42
4.1 Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları .....	42
4.2 Görünür Yoğunluk Deneyi Sonuçları .....	43
4.3 Görünen Porozite Deneyi Sonuçları .....	44
4.4 Su Emme Deneyi Sonuçları .....	45
4.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları .....	46
4.6 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları .....	48
4.7 Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları .....	50
4.8 Eğilme Deneyi Sonuçları .....	52
4.8 Elektriksel Özdirenç Deneyi Sonuçları.....	53
4.9 Yüzey Sıcaklığı Sonuçları .....	54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	55
6. KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	63

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

Ca(OH) <sub>2</sub>	Kalsiyum Hidroksit
KOH	Potasyum Hidroksit
M	Molarite
MPa	Megapaskal
Ms	Silika Modülü
Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Sodyum Oksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Sodyum Karbonat
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Sodyum Silikat
SiO <sub>4</sub>	Silikat

---

### Kısaltmalar

---

AKT	Atık Kil Tuğla
ATT	Atık Tuğla Tozu
A-S-H	Alümino-Silikat-Hidrat
C-A-S-H	Kalsiyum Alumina Silika Hidrat
FDKS	Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
İYA	İnşaat Yıkım Atıkları
MK	Metakaolin
SH	NaOH
SK	Silis Kumu
SS	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>
N-A-S-H	Sodyum Alumina Silika Hidrat
UK	Uçucu Kül
ÖGYFC	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
ÖYFC	Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu
TA	Tuğla Atığı

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Şekil 2.1</b> Geopolimerin analog yapısı (Davidovits 2008, Jia vd. 2020).....	4
<b>Şekil 2.2</b> Farklı Si/Al oranlarına sahip geopolimerin yapısal birim modeli (Davidovits 1989, Jia vd. 2020). .....	5
<b>Şekil 2.3</b> Geopolimerizasyon sürecinin şematik gösterimi: (a) alüminosilikatın yeniden düzenlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşmasından jel oluşumu ve (c) polimerizasyon (Singh ve Middendorf 2019). .....	7
<b>Şekil 2.4</b> Atık pişirilmiş kil tuğlaların görünümü (Zawrah vd. 2016).....	13
<b>Şekil 3.1</b> Atık tuğla tozlarının elek analizi. ....	29
<b>Şekil 4.1</b> Birim hacim ağırlık sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M .....	43
<b>Şekil 4.2</b> Görünür yoğunluk sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M. ....	44
<b>Şekil 4.3</b> Görünen porozite sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M. ....	45
<b>Şekil 4.4</b> Su emme oranı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M. ....	46
<b>Şekil 4.5</b> Ultrases geçiş hızı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M. ....	47
<b>Şekil 4.6</b> Ultrases geçiş hızı ile görünen porozite sonuçları arasındaki ilişki. ....	48
<b>Şekil 4.7</b> Basınç dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M. ....	49
<b>Şekil 4.8</b> Basınç dayanımı ile su emme sonuçları arasındaki ilişki.....	49
<b>Şekil 4.9</b> Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.....	50
<b>Şekil 4.10</b> Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kayıplarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.....	51
<b>Şekil 4.11</b> Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kayıplarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.....	52
<b>Şekil 4.12</b> Eğilme dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu serilerine göre değişimi. ....	53
<b>Şekil 4.13</b> Elektriksel özdirenç sonuçlarının atık tuğla tozu serilerine göre değişimi. ..	53

**Şekil 4.14** Yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi. .... 54

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Çizelge 3.1</b> Atık tuğla tozlarına ait kimyasal kompozisyonlar (%). .....	30
<b>Çizelge 3.2</b> UK'nin XRF analizi sonuçları (Şinik 2019). .....	30
<b>Çizelge 3.3</b> Alkali aktivatörlerin kimyasal içerikleri. ....	31
<b>Çizelge 3.4</b> Geopolimer harç numunelerindeki malzemelerin karışım miktarları. ....	32

## RESİMLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Resim 3.1</b> Tuğla tozu atıkların hazırlanması.....	29
<b>Resim 3.2</b> Geopolimer harç numunelerinin üretim aşamaları .....	34
<b>Resim 3.3</b> Üretilen geopolimer harç numunelerine ait görüntüler.....	35
<b>Resim 3.4</b> Arşimet deneyinin yapılışı. ....	36
<b>Resim 3.5</b> Ultrases geçiş hızı deneyi. ....	37
<b>Resim 3.6</b> Basınç dayanımı deneyi. ....	37
<b>Resim 3.7</b> Yüksek sıcaklık fırını ve numuneler. ....	38
<b>Resim 3.8</b> Eğilme dayanımı deneyi. ....	39
<b>Resim 3.9</b> Elektriksel özdirenç deney düzeneği. ....	39
<b>Resim 3.10</b> Yüzey sıcaklıklarının ölçümü. ....	41

## 1. GİRİŞ

Çevrenin ve doğal kaynakların bozulması, sürdürülebilirlik açısından önemli bir problemdir. 2050 yılına kadar dünya nüfusunda beklenen %30 civarındaki artışın inşaat sektöründe yıllık 4 milyar ton çimento tüketimi artışı ile sonuçlanması öngörülmektedir. Çimento üretimi küresel karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonunun yaklaşık %7'sine katkıda bulunduğundan hava kirliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Wong vd. 2020).

Sürdürülebilir gelişme, esas olarak gelecek nesillerin ihtiyaçlarını da karşılayabilmeleri için ekosistemimize zarar vermeden günümüzün ihtiyaçlarını karşılamamızı sağlamakla ilgilidir. Sürdürülebilir kalkınma, ekosistemlerimizin kalitesini korumak için insan faaliyetlerini yenilenebilir enerji ve malzeme kaynaklarını kullanmaya yönlendirmeye çalışmaktadır. Bu amaçla, dünyamızın korunmasına katkıda bulunmaya yardımcı olmak için sürekli olarak yeni teknikler uyarlanmakta ve araştırılmaktadır. Son zamanlarda geliştirilen tekniklerden birisi de Portland çimentosunun (PÇ) yerini alabilecek bir bağlayıcı oluşturmak için atık malzemelerin geopolimerizasyon yoluyla geri dönüştürülmesidir. Geopolimer üretimlerinin geniş çapta benimsenmesi, Portland çimentosu üretimi ile ilişkili sera gazı emisyonlarını azaltma ve atık ürünlerin geri dönüşümü için değerli bir yöntem sağlama potansiyeline sahiptir (Mohajerani vd. 2019).

Geopolimer terimi ilk olarak 1979'da Davidovits tarafından amorf bir mikro yapıya ve zeolitler gibi kimyasal bileşime sahip bir mineral bağlayıcılar ailesini tanımlamak için kullanılmıştır. Geopolimerizasyon kuvvetli alkali koşullar altında alüminosilikat malzemeler ve alkali metal silikatlar arasında polimer (- Si- O- Al- O- bağları) oluşumu ile sonuçlanan ve geopolimerlerin oluşumuna yol açan bir polikondenzasyon reaksiyonudur. Geopolimerler yapısal gücünü PÇ'den farklı olarak kalsiyum silikat hidrat jelinin geliştirilmesinden değil bu polikondenzasyondan kaynaklanmaktadır. Davidovits'e göre geopolimerler söz konusu olduğunda "bir ton bağlayıcı başına yaklaşık 0.184 ton CO<sub>2</sub> üretilmektedir. PÇ ile karşılaştırıldığında geopolimerlerde CO<sub>2</sub> emisyonunda %80'lik bir azalma meydana gelmektedir (Chowdhury vd. 2020).

Öte yandan sürekli artan nüfus ve gelişmekte olan ülkelerin ekonomisi ve sanayisi göz önüne alındığında inşaat ve yıkım yönetimi en fazla atık üreterek en önemli faktörlerden

biri haline gelmiştir. Dünya çapında önemli ölçüde artan inşaat ve yıkım atıklarının (İYA) miktarlarının temelinde çoğunlukla yapısal ve altyapı projeleri yenileme, onarım/bakım ve yıkım çalışmaları yer almaktadır. Bu atık maddelerin kontrol altına alınmadığı durumlarda temiz depolama sahalarının doldurulması ve toksik maddelerin birikmesi nedeniyle doğal yaşam alanı üzerinde geri dönüşü olmayan etkilerin olması kaçınılmazdır. Sonuç olarak İYA'nin çevresel, ekonomik ve sosyal faydalar adına uygun bir şekilde yönetilmesi büyük önem taşımaktadır (Özçelikci 2020).

İmalat, inşaat ve yıkım faaliyetleri sırasında büyük miktarlarda atık tuğla tozu ortaya çıkmaktadır. Atık tuğlaların çoğu çöp sahasına bırakılmakta veya izinsiz olarak atılmakta ve ciddi bir çevre sorunu haline gelmektedir. Yapı imalatında fonksiyonelliğinin yanında yapı malzemelerinden, görsellik, ısı iletkenliği, dayanım ve dayanıklılık gibi özellikler de beklenmektedir. Bu doğrultuda yapılan tez çalışmasında geopolimer harç üretimlerinde farklı atık tuğla tozları kullanılmıştır. Afyonkarahisar bölgesinde yaklaşık yirmi adet tuğla fabrikası vardır ve bu fabrikalarda hatalı üretimlerin sonucunda ya da taşıma sırasında parçalanma sebebiyle oldukça fazla oranda atık tuğla parçaları ve tozları ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla duvar ve cephe kaplaması olarak kullanılan tuğlaya alternatif olarak atık tuğla tozlarının kullanıldığı geopolimer harçlar üretilmiştir. Böylece hem Afyonkarahisar bölgesindeki atıklarla ilgili bir problem ele alınmış olacak hem de çimento kullanılmadan üretilen harçlar ile sürdürülebilirliğe katkı sağlanacaktır.



## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

21. yüzyılın en önemli çevre sorunu olan küresel ısınma ve azalan doğal kaynaklar nedeniyle sürdürülebilir gelişme ihtiyacı atıkların geri dönüşümünü ve yeniden kullanımını zorunlu kılmıştır (Ahmari 2012). Tuğla fabrikalarının faaliyetlerinden kaynaklanan önemli miktarda tuğla atıkları; geniş arazilerin işgal edilmesi, toz oluşumu, yüzey ve yeraltı sularının kirlenmesi gibi ekolojik ve çevresel etkiler konusunda artan endişelere yol açmıştır. Öteyandan tuğla atıklarının çoğu hala atık alanlarında tutulmakta ve bu da farklı çevresel ve ekolojik sorunlara yol açmaktadır. Araştırmacılar PÇ kullanarak atıkları inşaat malzemesi olarak yeniden kullanmaya çalışmışlardır. Ancak bu yöntemin PÇ ile ilgili birtakım sınırlamaları vardır. Bu çalışmada tuğla atıklarını tamamen geri dönüştürülebilmeleri ve yeniden kullanılabilimleri için geopolimerizasyon adı verilen bir teknik kullanılmaktadır.

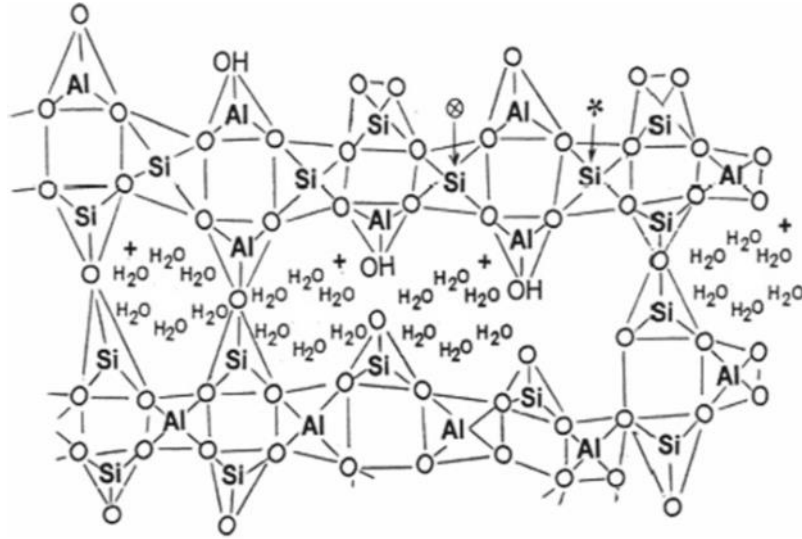
### 2.1 Geopolimer

Geopolimerler düşük sıcaklıklarda hızla dönüşebilen ve şekil alabilen, inorganik, yanmaz, ısıya dayanıklı, üç boyutlu, alümino-silikat malzemeler ağıdır. Geopolimerler doğal olarak oluşan zeolit minerallerine çok benzemektedir. Geopolimerler esasen silisyum (Si) ve alüminyum (Al) bakımından zengin malzemeleri çimento benzeri bir polimer bağlayıcıyla yoğunlaştıran alkali aktivasyon ile karakterize edilen alüminosilikat ailesinden bir malzemedir (Mohajerani vd. 2019).

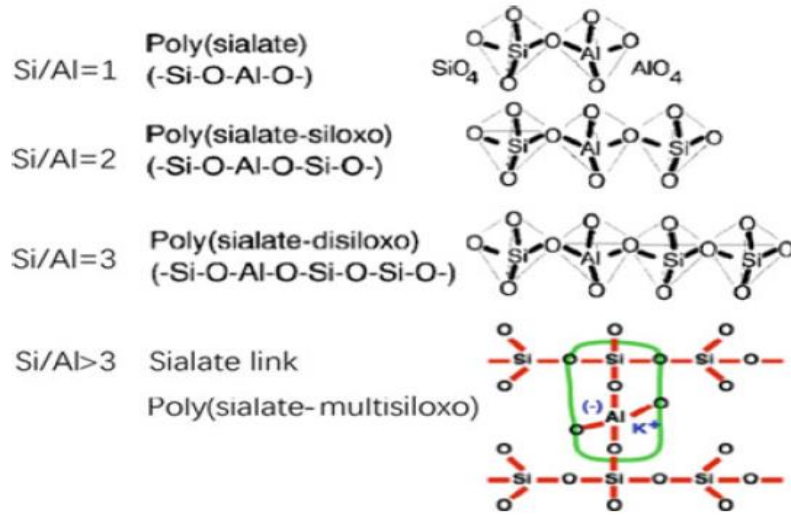
Geopolimerler çapraz bağlı  $AlO_4$  ve  $SiO_4$  tetrahedral birimlerden ve alkali metal kationlarından oluşan üç boyutlu ağ yapısına sahip inorganik polimerik malzemelerdir. 40 yılı aşkın gelişmeden sonra özellikle son 20 yılda geopolimerler üstün performans özelliklerine sahip yeni bir inorganik, metalik olmayan malzeme türü olarak dikkat çekmektedir. Alkali ile aktive olan geopolimer belirli koşullar altında kürlenir. Mukavemet, organik polimer malzemelere çok benzeyen Si-O ve -Al-O birimlerinin polimerizasyonundan elde edilir ve geopolimerler tipik olarak amorf veya kısmen kristalleşir (Şekil 2.1) (Jia vd. 2020).

Geopolimerizasyonun küçük moleküllerin (oligomerler) bir araya gelerek üç boyutlu ağ oluşturduğu bir süreç olduğu yaygın olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak doğru bir şekilde tanımlanması çok zor olan yoğun amorf yapı elde edilmektedir. Buna rağmen esas olarak NMR (nuclear magnetic resonance) veya FDKS (Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi) gibi spektroskopik yöntemlerle elde edilen sonuçların yorumlanmasına dayanan geopolimer malzemelerin yapısını tanımlamak için çok sayıda girişimde bulunmaktadır (Koleżyński vd. 2018). Ek olarak alkali ile aktive olan geopolimer sistemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- 1) Hammaddelere göre metakaolin, kuvars, uçucu kül ve cüruf gibi mineraller ve endüstriyel yan ürünler geopolimer hazırlamak için kullanılabilir ve ortaya çıkan geopolimer metakaolin bazlı geopolimer kuvars esalı geopolimer uçucu kül ve cüruf bazlı geopolimer olarak adlandırılabilir. Metakaolin tozları endüstriyel yan ürünlerde yaygın olarak bir arada bulunan safsızlığın kirlenmesini önleyen nispeten saf bileşimi nedeniyle geopolimerin geopolimerizasyon mekanizmaları çalışması için yaygın olarak seçilmektedir (Jia vd. 2020).



Şekil 2.1 Geopolimerin analog yapısı (Davidovits 2008, Jia vd. 2020).



**Şekil 2.2** Farklı Si/Al oranlarına sahip geopolimerin yapısal birim modeli (Davidovits 1989, Jia vd. 2020).

- 2) Geopolimer monomerindeki  $AlO_4$  ve  $SiO_4$  birimlerinin miktarına (Si/Al oranı) göre geopolimerler dört kategoriye ayrılmıştır: poli(sialat) Si/Al = 1 (PS), poli (sialat-siloxo) Si/Al = 2 (PSS), Si/Al = 3 (PSDS) poli (sialate-disiloxo) ve Şekil 2.2’de gösterildiği gibi Si/Al > 3 (PSMS) poli (sialat-multisilokso). Genellikle Si/Al’deki artışla birlikte geopolimerin mekanik özellikleri artarken hem kimyasal kararlılık hem de ısı direnci azalmaktadır (Jia vd. 2020).
  
- 3) Aktivasyon iyonlarına göre geopolimer  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$  veya karışık alkali iyonlarına ayrılabilir. Elde edilen geopolimer, Na bazlı geopolimer, K bazlı geopolimer, Cs bazlı geopolimer,  $Cs_xK_{(1-x)}$  bazlı geopolimer ve benzeri alkali iyonlarının yarıçapındaki artışla birlikte elde edilen geopolimerlerdir. Bu geopolimerler, gelişmiş mekanik ve termal özellikler göstermektedir. Örneğin, K bazlı geopolimer, Na bazlı geopolimerden çok daha yüksek geopolimerizasyon oranı göstermektedir ve lösit için (K bazlı geopolimerden türetilen) erime noktaları nefelinden (Na bazlı geopolimerden türetilen) çok daha yüksektir (Jia vd. 2020).

Son yıllarda alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcılar/geopolimerler geleneksel betona bir alternatif olarak görülmektedir. Alkali aktif bağlayıcılar öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC), uçucu kül (UK), metakaolin (MK) vb. gibi alüminosilikat kaynak

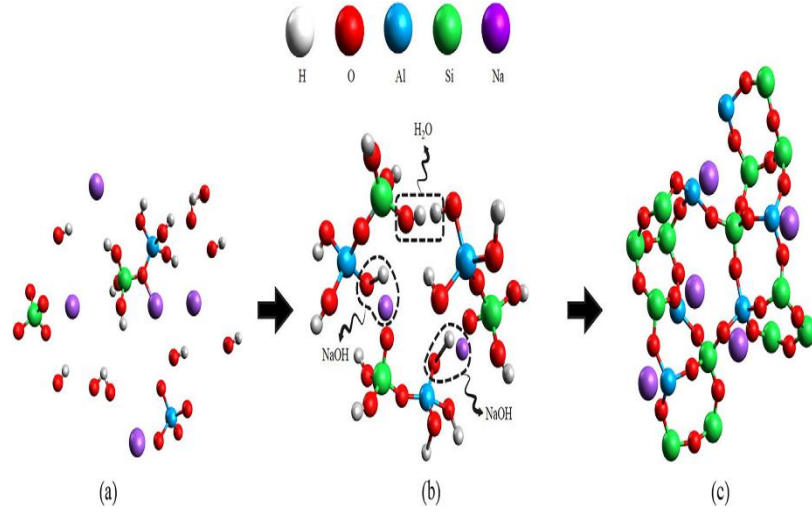
malzemelerinin alkali aktivasyonu ile yapılmaktadır. Bu bağlayıcılar inşaat sektörünün ve atık oluşumunun sorunlarını çözebilmektedir. Ca bakımından zengin kaynak malzemeler özellikle cüruflar sınırlı olduğundan geopolimer üreten düşük kalsiyumlu kaynak malzemelere daha fazla önem verilmektedir. Geopolimer teknolojisi endüstriyel yan ürünlerin atık kullanımı için iyi bir yaklaşım sunmaktadır. Geopolimerlerin oluşum özellikleri hammaddelerin alkali aktivatörlerin ve kütleme koşullarının kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Yoğun yapıya sahip geopolimerler, yüksek erken mekanik mukavemet ve agresif atmosfere karşı iyi direnç sağlamaktadır. Geopolimer yapımında kullanılan hammaddeler farklı kökenlere sahiptir ve çeşitli safsızlıkları içermektedir. Bu nedenle polimerizasyon mekanizmasını tahmin etmek zordur. Sürdürülebilir beton talebi göz önüne alındığında geopolimerizasyon sürecini anlamak için detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır. Geopolimerler şu anda inşaat malzemeleri geliştirmek için PÇ'ye alternatif olarak kullanılmaktadır. Ancak inşaat sektörü sera gazı sorununa potansiyel çözümler olarak yeni teknolojilerin ve ürünlerin etkinliğine karşı oldukça muhafazakar bir bakış açısına sahiptir (Singh ve Middendorf 2019).

### **2.1.1 Geopolimerlerin Sentezi ve Kimyasal Yapısı**

Geopolimerler katı alüminosilikat bileşikleri ile oldukça konsantr bir alkali hidroksit veya silikat çözeltisi arasındaki kimyasal reaksiyonun bir sonucu olarak sentezlenmektedir. Alüminosilikat kaynak malzemesinin alkali aktivatör nedeniyle hidroliz yoluyla çözünmesi; alüminat ve silikat türleri genellikle geopolimerizasyon sırasında alüminosilikat parçacıklarının dönüşümünden sorumlu mekanizma olarak açıklanmaktadır. Alüminosilikat bağlarının bu geliştirme ve yeniden düzenleme süreçleri geopolimerik malzemelerin birçok fiziksel ve kimyasal özelliğinin belirlenmesinde çok önemli olan malzemenin mikro yapı özelliklerini ve gözenek boyutunu ve dağılımını belirlemektedir. Kimyasal reaksiyon açısından alüminosilikat, sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) gibi bir alkali hidroksit bileşiğine maruz kaldığında alüminyum ve silikonun çözünmesi ve hidrolizi ile sonuçlanmaktadır (Nawaz vd. 2020).

Geopolimerizasyon süreci çözünme ve yeniden düzenleme yoğunlaşma ve polimerizasyondan oluşmaktadır. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi alüminosilikatın çözünmesi ile oluşan oligomerler bağlandığında uçlarındaki OH grupları ile buluşur ve

bir oksijen atomunu paylaşarak suyu serbest bırakır. Geopolimerler inorganik polimerlerdir. Geopolimer oluşumu alüminosilikat katıları (bağlayıcılar) konsantre sıvı alkali çözeltiler (aktivatörler) ile reaksiyona girdiğinde meydana gelmektedir (Singh ve Middendorf 2019).



**Şekil 2.3** Geopolimerizasyon sürecinin şematik gösterimi: (a) alüminosilikatın yeniden düzenlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşmasından jel oluşumu ve (c) polimerizasyon (Singh ve Middendorf 2019).

Geopolimerler alkali aktivatör çözeltilerinde çözünen alüminosilikat malzemelerin oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıkta geopolimerizasyonu ile amorf faz ve üç boyutlu silikoalüminat ağ yapısı oluşturarak sentezlenmektedir. Araştırmacılar geopolimerizasyon sırasında meydana gelen reaksiyon mekanizması hakkında farklı fikirlere sahip olsalar da çoğu geopolimerizasyonun üç ana aşamaya bölünebileceğini düşünmektedir.

Alüminosilikat malzemelerin konsantre alkali çözeltilerinde çözünmesi serbest silika ve alümina tetrahedron birimini oluşturmaktadır. İkinci aşamada malzemelerin transferi, katılaşması/jelasyonu, inorganik geopolimer jel fazını oluşturmak için alümina ve silika hidroksilin kondenzasyon reaksiyonudur (yoğuşum tepkimesi). Bu aşamada hidroliz işlemi nedeniyle yapıdan su tahliye edilir. Son olarak jel fazı sertleştikçe bir geopolimer oluşturan üç boyutlu bir silikoalüminat ağı oluşturmak üzere yoğunlaşır.

Aktivatörler geopolimerizasyonda hayati bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmada 10 M NaOH konsantrasyonu daha yüksek derecede geopolimerizasyona yol açan düşük NaOH konsantrasyonuna kıyasla alüminosilikat malzemelerde  $Si^{4+}$  ve  $Al^{3+}$  iyonlarının en yüksek çözünme hızına yol açmıştır (Cong ve Cheng 2021).

Geopolimer betonun kimyasal reaksiyonunda su yer almaz ve bunun yerine kütleme ve ardından kurutma sırasında su dışarı atılır. Bu durum, PÇ su ile karıştırıldığında meydana gelen ve birincil hidrasyon ürünleri olan kalsiyum silikat hidrat ve kalsiyum hidroksit üreten hidrasyon reaksiyonlarının tam tersidir. Bu fark ortaya çıkan geopolimer betonun mekanik ve kimyasal özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve ayrıca onu ısıya, su girişine, alkali agrega reaktivitesine ve diğer kimyasal saldırılara karşı daha dirençli hale getirmektedir (Aleem ve Arumairaj 2011).

Araştırmalara göre kimya alanından mühendislik uygulamalarına ve geopolimer betonun ticari üretimine doğru kaymaktadır. Geopolimer betonun sıradan PÇ'nun tamamen değiştirilmesinden kaynaklanan azaltılmış küresel ısınma potansiyeli ile iyi mühendislik özelliklerine sahip olduğu bulunmuştur. Geopolimer betonun işlenebilirliğini ve mukavemetini artırmak için karışım tasarımı geliştirme çalışmaları vardır. Kütleme sıcaklığı ve rejimi, agrega şekli, mukavemetler, nem içeriği, hazırlama ve derecelendirme gibi faktörlerin işlenebilirlik ve mukavemet üzerindeki etkisi sunulmaktadır (Dange ve Suryawanshi 2017).

Son zamanlarda dünya çapında bazı çimento ve beton şirketleri sıvı aktivatör bazlı geopolimer bağlayıcıların üretimine başlamıştır. Bununla birlikte bu tip geopolimer karıştırma ve işleme sürecindeki sınırlamaları nedeniyle önemli çevresel faydalarına rağmen beton endüstrisinde PÇ'nin uygulanabilir bir ikamesi olarak görünmemektedir. Toz aktif geopolimer kaynak malzeme ile harmanlanmış toz formunda alkali aktivatörler içermektedir. PÇ beton yerine geopolimer bağlayıcı kullanmanın iki önemli çevresel faydası vardır; potansiyel azaltılmış sera gazı emisyonları ve endüstriyel yan ürünlerin kullanımınıdır. Geopolimer teknolojisi iyi bir inşaat malzemesi üretmek için endüstriyel yan ürünleri kullanabilmektedir. Bu faydalar göz önüne alındığında, geopolimer sürdürülebilir bir bağlayıcı malzeme olarak kabul edilmektedir (Neupane 2016).

Geopolimer teknolojisi atık bertaraf işlemine ve çevre kirliliğine neden olacak maddelerin tam stabilizasyonuna uygun nispeten yeni bir teknik olarak kabul edilmektedir. Araştırmacıların silika ve alümina içeren kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü, kömür külü, cam kalıntısı atıkları, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, inşaat ve yıkım atıkları ve seramik atık malzemeler gibi birçok farklı endüstriyel yan ürün atığı üzerinde çalışıldığı belirtilmektedir. Sonuçlar bu endüstriyel yan ürün atıklarının çoğunun geopolimerlerin sentezi için umut verici malzemeler olduğunu göstermektedir (Zawrah vd. 2016).

Dünyanın dört bir yanındaki altı kıtadan yaklaşık 40 ülke toplam inşaat ve yıkım atığı üretiminin 3.0 milyar tondan fazlaya ulaşan kritik bir değerini göstermiştir. Bu alüminosilikat atık malzeme şebekesinde yüksek amorf  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$  ve  $Fe_2O_3$  içeriğinin bulunması nedeniyle geopolimer çimento üretiminde kullanılabilir. Çimento üretimi için alternatif alüminosilikat tozu olarak atık pişmiş tuğla kullanmanın başlıca avantajları kaolinin metakaoline dönüşümü ( $600-800^{\circ}C$ ) sırasında kullanılan enerjiyi azaltması ve çevre dostu bir yaklaşım olarak kabul edilmesidir. Bu alüminosilikat bakımından zengin atığın geopolimer çimento üretimi için yeni başlangıç malzemesine geri dönüştürülerek yeniden kullanılması kirlilikle ilgili birçok çevresel sorunu azaltmak için pratik bir çözüm olarak kabul edilmektedir (Riyap vd. 2020).

Atık pişmiş kil tuğlalar bir alümino-silikat yan ürünü olarak geopolimer üretiminde kullanılabilen atık bir malzemedir ve geri dönüşümünün çevre ve endüstriyel sektörler üzerinde önemli etkileri vardır. Genel olarak kullanılan hammadde mineralojisine bağlı olarak her bölge için atık tuğla tozunun kimyasal bileşiminde bir değişiklik vardır. Ancak bileşimin çoğunluğu bir alüminosilikat yan ürünüdür. Bu malzemenin geopolimer ürünlerin üretimi için geri dönüştürülmesi çevresel açıdan dikkate değerdir. Genel olarak yüksek sıvı/katı oranı ile hazırlanan taze geopolimer hamuru düşük viskozite sistemine sahipken, düşük sıvı/katı oranına sahip geopolimer hamuru yüksek viskozite sistemi ile sonuçlanmakta ve dolayısıyla işlenebilirliğini de etkilemektedir. Ayrıca herhangi bir geopolimer sisteminin sıvı/katı oranındaki varyasyonun başlangıç malzemesinin çözünme hızı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olacaktır. Bu da bağlayıcı oluşumunu ve geopolimerizasyon oranını önemli ölçüde hızlandırır veya geciktirir. Öteyandan farklı sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları esas olarak hazırlanan alkali çözeltinin pH

koşullarını etkiler ve bu nedenle ortaya çıkan geopolimer ürününün özellikleri üzerinde bazı etkilere sahip olabilmektedir. Ek olarak, silika modülü  $M_s = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  molar oranındaki varyasyonun geopolimerlerin yapısını ve özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynayan bir silikat çözeltisinde çözülmüş türlerin polimerizasyon derecesini önemli ölçüde değiştirdiği iyi bilinmektedir (Gado vd. 2020).

### 2.1.2 Geopolimerlerin Mekanik Özellikleri

Geleneksel portland çimentosuna yüksek performanslı ve/veya çevresel açıdan sürdürülebilir alternatiflerin araştırılması nedeniyle son birkaç yılda geopolimer çimento harçlarına giderek daha fazla ilgi gösterilmiştir. Buna ek olarak geopolimer çimento hamurları yüksek basınç dayanımı, düşük büzülme, hızlı veya yavaş sertleşme, kimyasal saldırılara karşı direnç, yangına dayanıklılık ve düşük termal iletkenlik gibi bir seri üstün özellik sergilemektedir (Yuan vd. 2021).

Dünya çapında önceki araştırmalar geopolimer bağlayıcıdan elde edilen betonun daha yüksek mekanik dayanımları sülfat ve asit saldırılarına karşı daha yüksek direnç ve daha yüksek termal direnç gibi PÇ betonundan daha üstün mühendislik, termal ve dayanıklılık özellikleri sergilediğini öne sürmüştür. Son zamanlarda dünya çapında bazı çimento ve beton şirketleri (E-Crete™, Dünya Dostu Beton ve Banah CEM) gibi farklı markalar altında geopolimer bağlayıcı üretimine başlamıştır. Bununla birlikte sıvı ile aktive olan geopolimer önemli çevresel faydalarına ve bu bağlayıcının karıştırılması ve işlenmesindeki zorluklardan dolayı üstün mühendislik özelliklerine rağmen beton endüstrisinde PÇ'nin uygun bir ikamesi olarak görünmemektedir (Neupane 2016). Geopolimerin ayrıca yüksek sıcaklıklarda bile uygun özelliklerini sergilediği ve bu nedenle inşaat endüstrisindeki her yönden çimento betonunun yerini aldığı bulunmuştur (Ganesh vd. 2020).

Geopolimerin uygulaması tuğla, fayans, harç, çimento gibi seramik malzemelerden hatta havacılık gibi oldukça karmaşık malzemelere kadar uzanmaktadır. Enerji ve çevre açısından izlenmesi gereken bir eğilim geopolimerizasyon yoluyla seramik malzeme üretim yöntemidir. Henüz yaygın olarak kullanılmayan bir uygulama olmasına rağmen



düşük sıcaklık kullanarak malzeme ürettiği ve böylece sera gazı salınımını engellediği için büyük önem taşımaktadır (Faria vd. 2019).

Geopolimer birçok uygulamada PÇ ile karşılaştırılabilir bir performans sağlamakla kalmaz aynı zamanda bol miktarda hammadde kaynağı hızlı sertleşme, yüksek mekanik mukavemet, mükemmel dayanıklılık, kimyasal saldırı direnci nedeniyle kirletici maddelerin hareketsiz hale getirilmesi (kirleticilerin hareketsizleştirilmesi) ve tüketilen enerji ve sera gazı emisyonlarında önemli ölçüde azalma gibi ekstra avantajlara sahiptir. Bu karakteristikler ve avantajlar geopolimeri sürdürülebilir gelişme için yeni bir ideal malzeme olarak büyük araştırma konusu haline getirmiştir (Zawrah vd. 2016).

Geopolimerler için kullanılan ham maddeler nihai ürünü etkileyecek bir dizi kimyasal özelliğe sahip olabilmektedir. Alkali çözeltisi için seçilen alkali aktivatörlerde üretilen son geopolimeri etkileyecek çeşitli kimyasal elementler, yapılar, içerik ve molaritelere sahip olabilmektedir. Nem, zaman ve sıcaklık gibi sertleştirme koşullarının tümü de geopolimerin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyecektir (Mohajerani vd. 2019).

Kür sıcaklığı, alkali konsantrasyonları, katkı maddeleri,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  oranı vb, optimizasyonu ile alüminosilikat ve alkali çözeltileri içeren farklı kaynak malzemelerin kombinasyonu yüksek mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip geopolimer çimentolar vermektedir. Yüksek mekanik özellikleri ve çevresel faydaları nedeniyle geopolimer çimento ve beton geleceğin inşaat malzemesi olarak karşımıza çıkmakta ve farklı alanlarda uygulamaları bulunmaktadır (Singh ve Middendorf 2019).

Araştırmacılar, duvarlar, çatılar ve bölmeler için hafif polistiren levhalar için kaplama olarak kullanılacak yüksek mukavemet, yapay yaşlanma direnci, yüksek sıcaklık direnci ve iyi işleme performansı gibi mükemmel özelliklere sahip geopolimer kaplamayı başarıyla hazırlamış ve uygulamıştır (Cong ve Cheng 2021).

## **2.2 Atık Madde Olarak Tuğla Atığının Üretimi**

Atık kil tuğla (AKT) silikat içerikli katı bir atıktır. Geri dönüşümü büyük çevresel ve

sosyal öneme sahiptir. AKT'nin betonda, harçta, duvar malzemelerinde geri dönüştürülerek, kaba ve ince agrega olarak kullanılabilir. Çimento üretiminde de hammadde veya katkı maddesi olabilir.

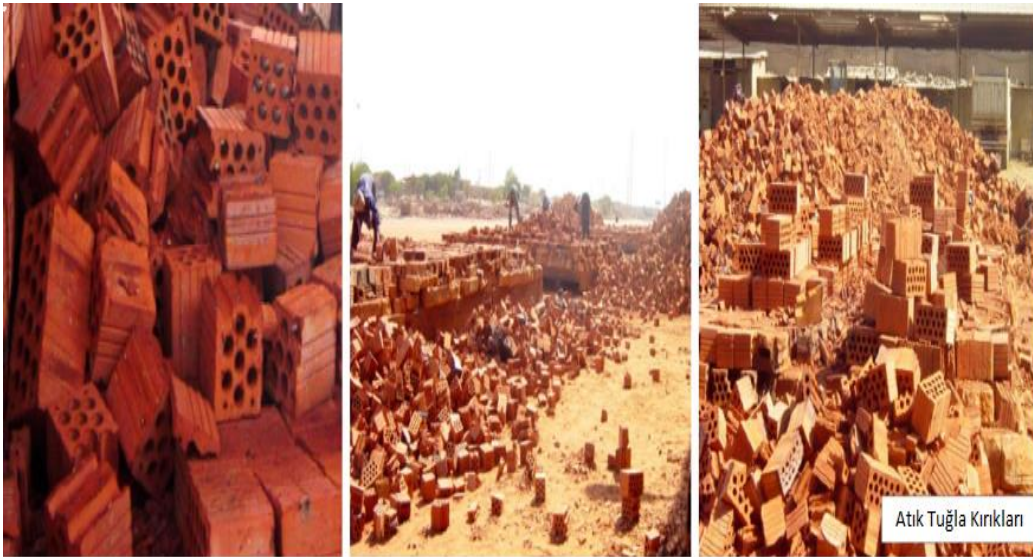
Tuğla üretiminin temelleri zaman içinde değişmemiştir. Bununla birlikte teknolojik gelişmeler çağdaş tuğla fabrikalarını önemli ölçüde daha verimli hale getirmekte ve ürünlerin genel kalitesini artırmaktadır. Kil yeryüzünde en bol bulunan doğal mineral maddelerden biridir. Tuğla üretimi için kil belirli özelliklere ve karakteristiklere sahip olmalıdır. Kalıplanmaya izin veren plastisiteye sahip olmalıdır (Drive 2006). Şekillendirildikten sonra şekillerini korumak için yeterli ıslak ve hava kurumasi mukavemetine sahip olmalıdırlar. Ayrıca uygun sıcaklıklara maruz kaldıklarında kil parçacıklarının birbirine yapışması gerekmektedir. Atık kil tuğlası (AKT) Portland çimentosunun (PÇ) yerine geopolimer bağlayıcıların üretilmesi için uygun bir alternatif bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanmaktadır (Migunthanna vd. 2021).

Tuğlalar küresel olarak tüketilen en baskın yığma birimleridir. Tuğla üretimi enerji tüketen bir süreçtir ve büyük miktarda hava kirliliğine sebep olmaktadır. Tuğlalar milattan önce 14.000'den kalma geleneksel bir yapı malzemesidir ve şimdiye kadar inşaatta kullanılan yaygın duvar malzemesidir. Kil tuğlalar, fırın içinde yüksek sıcaklıklarda (800-1400°C) pişirilerek üretilir. Ciddi hava kirliliği sorunlarına neden olan tuğla fırınları atmosfere zehirli maddeler saldığından ciddi sağlık sorunları oluşturmaktadır. Sürdürülebilir bir gelişme için tuğla üretiminin, enerji verimli bir yolla yapılması gerekir (Ganesh vd. 2020).

Kentsel yapılaşmanın hızlanması ve ilerlemesi ile eski binaların yıkımından büyük miktarda atık kil tuğla (AKT) çıkmaktadır. İstatistiklere göre AKT kentsel dönüşümden dolayı ortaya çıkan inşaat atıklarının %50-70'ini ve yapı işleri açısından %30-50'sini oluşturmaktadır. Kil tuğla üretimi sırasında da standart dışı oldukça fazla tuğla üretilmektedir. Son yıllarda atık kil tuğlanın geri dönüştürülmesinin kullanımı giderek daha fazla ilgi görmektedir. Tuğla atıklarının geri dönüştürülebilmesinin yollarının genişletilmesi gerekir (Cheng 2016).

Kil tuğlaları imal etmek için kullanılan hammaddelerin (doğal kil, silt, kum, vb.) doğal kaynaklarında azalma olmaktadır. Bunun için çevre dostu olan etkili bir alternatif bulmak dünya çapında bir ihtiyaçtır. Atık ürünlerin yapı malzemelerine dahil edilerek geri dönüştürülmesi bu kirlilik krizine uygun bir çözüm olarak görülmektedir. Kauçuk, kireçtaşı tozu, talaş, işlenmiş atık çay, uçucu kül, polistiren ve çamur gibi atıkları tuğla üretimine dahil etmek için birçok girişimde bulunulmuştur (Khater vd. 2016).

Atık pişmiş kil tuğlaları farklı yapı malzemelerinin üretim sürecine dahil etmek için birçok girişimde bulunulmuştur. Bu tür endüstriyel atıkların birçok yapı malzemesine dahil edilerek geri kazanılması kirlilik sorununa pratik bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu atıkların değerlendirilmesi ile bertaraf edilmesinden kaynaklanan birçok çevre sorununun azalmasına yol açacaktır. Bununla birlikte atık malzemeler ancak yeni oluşan ürünlerin özellikleri ve çevresel davranışları belirli gerekliliklere uygunsa ve ilgili çevre standartlarına göre sorgulanırsa bile geri dönüştürülebilmektedir. Şekil 2.4’de tuğla fabrikalarında ve çevrelerinde büyük çevre sorunlarına neden olan atık malzemelerine ait bazı fotoğraflar görülmektedir. Atık hacminin büyük olması ve mevcut depolama sahasının kısıtlı olması nedeniyle bu tür atıkların bertarafı ve kullanım süreci önemli bir konudur (Zawrah vd. 2016).



**Şekil 2.4** Atık pişirilmiş kil tuğlaların görünümü (Zawrah vd. 2016).

Geleneksel tuğla üretimi için kil elde etme işlemleri enerji yoğundur. Araziyi olumsuz etkilemekte ve yüksek düzeyde atık üretilmektedir. Yüksek sıcaklıkta fırınlama sadece önemli miktarda enerji tüketmekle kalmaz, aynı zamanda büyük miktarda sera gazı salmaktadır. Kil tuğlalar ortalama olarak yaklaşık 2.0 kWh enerjiye sahiptir ve tuğla başına yaklaşık 0.41 kg CO<sub>2</sub> salmaktadır. Ayrıca dünyanın birçok yerinde kil kıtlığı olduğu da belirtilmektedir. Kil kaynağını ve çevreyi korumak için Çin gibi bazı ülkeler kilden yapılmış tuğlaların kullanımını sınırlamaya başlamıştır (Zhang 2013).

Kentleşmenin hızlanmasıyla birlikte küresel ölçekte büyük miktarda inşaat ve yıkım atığı ortaya çıkmaktadır. Raporlara göre Avrupa Birliği ve Amerika Birleşik Devletleri her yıl sırasıyla yaklaşık 800 ve 700 milyon ton inşaat yıkım atığı üretmektedir. Dünyanın en büyük gelişmekte olan ülkesi olan Çin her yıl inşaat ve yıkım faaliyetlerinden yaklaşık 1.8 milyar ton atık üretiyor ve Çin'deki kentleşme süreci hız kazandıkça üretimi bir süre yüksek kalacaktır. Dünyadaki diğer ülkeler de aynı sorunla değişen derecelerde karşı karşıyadır. Bu atıkların bertarafı geleneksel yöntem ile çevre sağlık koruma departmanları tarafından toplanması ve açık havada veya çöplüklerde biriktirilmesini içermektedir. Bu önemli miktarda arazi kaynağını tüketmekte ve çevreyi kirletmektedir. Dolayısıyla ciddi çevresel ve sosyal sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle inşaat yıkım atığının azaltılması, geri dönüştürülmesi ve etkisiz hale getirilmesi acilen çözülmesi gereken dünya çapında önemli bir sorun haline gelmiştir (He vd. 2021).

Üretim yöntemlerinin yanı sıra sürdürülebilirlikle ilgili ortaya çıkan endişeler insanları sürdürülebilir, hafif ve daha ucuz yapı malzemeleri formüle etmek için araştırmalara yöneltmiştir. Araştırmacılar atık malzemeleri tuğlalara dahil ederek sürdürülebilir yapı malzemeleri geliştirmek için çok sayıda araştırma yapmıştır. Birçok araştırmacı, uçucu kül, cüruf ve silika dumanları gibi yan ürünlerin kullanımını araştırmıştır. Atıkların tuğlalara dahil edilmesinin basınç dayanımını azalttığını fark etmişlerdir. Bu nedenle bu alan kritik öneme sahiptir (Iftikhar vd. 2020).

Yeşil bina üretiminde inşaat sürecinin çevre dostu olması için atık malzemelerin kullanılması esastır. Atık malzemeler kullanılarak bu tip tuğlaların uygulanması ile birlikte aşırı büyük miktarda üretim için teknik yönler, ekonomik yönler ve çevresel

yönler açısından daha fazla araştırma ve iyileştirme şarttır (Onkar ve Hake 2018).

### 2.2.1 Tuğla Atığının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Atık tuğla tozu PÇ esaslı betonda tamamlayıcı bir çimentolama malzemesi olarak veya geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak kullanılacak yeterli puzolanik özelliklere sahip bir malzemedir. Puzolanlılık ana özellikleri amorf faz miktarı, parçacık boyutu dağılımı ve spesifik yüzey alanı olan birkaç özelliğe bağlıdır. Atık tuğla tozu alkali aktif materyallerde veya geopolimerlerde başarıyla kullanılabilir (Rovnaník vd. 2018).

Atık tuğla tozunun puzolanik özelliklerinden dolayı beton üretiminde çimentonun yerini almak için uygun bir adaydır. Kil tuğla üretimi silikatlarının yapısında oda sıcaklığında kireçle reaksiyona giren amorf bir bileşiğe dönüşmesine neden olan 600 ile 1000°C arasında değişen yüksek sıcaklıklara maruz kalmayı ifade etmektedir. Buna ek olarak çimento veya harç tuğlalarından elde edilen tozun yeniden kullanımının çalışıldığı birçok çalışmanın olduğunu belirtmek önemlidir. Bu bağlamda atık tuğla tozu ile karşılaştırıldığında temel fark, çimento tuğla tozunun yeniden kullanılması için, çimento parçacıklarının hidrolik ve puzolanik özelliklerini kısmen geri kazanmak için yeniden hidrate edilmesi amacıyla kırıldıktan sonra bir ısı işlem yapılmasının gerekli olmasıdır. Atık tuğla tozunun morfolojik olarak düzensiz parçacıklardan oluştuğu söylenebilir (Letelier vd. 2018).

Atık tuğla tozu, yüzeyinin çimento harcı ile yapılıp yapılmadığına göre çoğunluğu SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ten oluşan tipik silikat katı atıklardır. İkisinin miktarı toplam en az %80'ni oluşturmaktadır. Diğer bileşikler Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CaO, MgO vb.'dir. Mineral bileşenler esas olarak kuvars, feldispat ve hematittir. Ancak tamamen sinterlenmemişse kil madenleri ve karbonat da vardır. Atık tuğla tozu yüzeyinin pürüzlü gözenekli olması köşe açılarının çok olması ve üzerinde parçalanma ve ezilmeden kaynaklanan mikro çatlakların olması nedeniyle doğal agregaya göre düşük mukavemet ve yüksek higroskopiklik özelliklerine sahiptir (Cheng, 2016).

Değişken miktarlarda yapısal su içeren silisyum ve alüminyum oksitler ve hidroksitler

açısından zengin çeşitli fillosilikat minerallerinden oluşmaktadır. Atık tuğlalar yapay bir puzolandır ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  varlığında hidratlanabilmektedir. Serbest kirecin ( $\text{CaO}$ ) puzolan katkısıyla ( $\text{AlO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) su varlığında reaksiyona girmesiyle çimentolu malzeme oluşumu hidrasyon olarak bilinmektedir. Hidratlı kalsiyum silikat jeli veya kalsiyum alüminat jeli (çimentolu malzeme) atıl malzemeyi birbirine bağlayabilmektedir. Kalsine kilin kireç içeriği nispeten düşük olduğundan atık tuğlanın puzolanı ile hidrasyon reaksiyonu için kireç ilavesi gerekmektedir. Yukarıdaki reaksiyon hızının sıcaklıkla artması  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin daha fazla  $\text{Ca}^{++}$  ve  $\text{OH}^-$  iyonu veren çözeltide çözünmesinin artmasından kaynaklanabilmektedir. Kalsine kilde trikalsiyum alüminatın hidrasyonu birçok killerde birincil çimentolu ürünlerden birini sağlamaktadır. Kalsine kilin hidrasyon kimyası çok karmaşıktır. Matriste atık tuğla bulunması harcın erken basınç dayanımını arttırmakta ve artan atık tuğla içeriği ile harcın direnci azalmaktadır. Harcın erken ve uzun vadeli mukavemeti matrise cüruf ve uçucu kül eklenmesiyle iyileştirilebilmektedir (Naceri ve Hamina 2009).

Pişmiş kilin rengi kimyasal bileşimine, pişirme sıcaklıklarına ve pişirme kontrol yöntemine bağlıdır. Killerde yaygın olarak bulunan tüm oksitlerden demir muhtemelen renk üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Doğal renginden bağımsız olarak pratik olarak herhangi bir biçimde demir içeren kil demir oksit oluşumu nedeniyle oksitleyici bir ateşe maruz kaldığında kırmızı bir ton sergileyecektir. İndirgeyici bir atmosferde pişirildiğinde aynı kil koyu veya siyah bir renk alacaktır. Fırında indirgeyici bir atmosfer yaratmak yanıp sönme veya indirgenmiş ateşleme olarak bilinir. Aynı hammadde ve üretim yöntemi göz önüne alındığında daha koyu renkler daha yüksek pişirme sıcaklıkları daha düşük absorpsiyon değerleri ve daha yüksek basınç dayanımı değerleri ile ilişkilendirilir. Ancak farklı hammaddelerden yapılan ürünlerde mukavemet ile renk veya absorpsiyon ile renk arasında doğrudan bir ilişki yoktur (Drive 2006).

### **2.3 Uçucu Külün Tanımı ve Üretimi**

Uçucu Kül elektrik enerjisi üretim tesislerinde toz haline getirilmiş kömürün yanmasının bir yan ürünüdür. Öğütülmüş kömür yanma odasında ateşlendiğinde karbon ve uçucu maddeler yakılır. Bununla birlikte kil, şist, feldispatlar vb. mineral safsızlıklarının bir

kısmı süspansiyon halinde kaynaştırılır ve egzoz gazlarında yanma odasının dışına taşınır. Egzoz gazları soğudukça kaynaşmış malzemeler uçucu kül adı verilen küresel camsı parçacıklar halinde katılaştır. Süspansiyonda füzyon nedeniyle bu uçucu kül parçacıkları çoğunlukla küçük katı küreler ve içi boş ekosferlerdir ve bazı parçacıklar daha küçük küreler içeren küreler olan plerosferler bile olabilmektedir (Dhake vd. 2017).

Kömür santralleri dünya elektriğinin yaklaşık %36'sını üretmekte ve uzun yıllar boyunca önemli bir elektrik kaynağı olmaya devam edecektir. Kömür santralleri tarafından uçucu kül ve taban külü şeklinde büyük miktarlarda atık üretilmektedir. Uçucu kül kömür yakma işleminin bir yan ürünüdür. Esas olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  kimyasal bileşiklerden oluşan ince bir tozudur. Silisyum ve alüminyum oksit bakımından zengin olan uçucu külün kimyasal bileşimi geopolimerizasyon için ideal bir hammadde olmasını sağlamaktadır. Düşük kalsiyumlu uçucu külde bulunan diğer bileşikler  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gibi oksitlerdir. Bu atığın geri dönüşümü için çevresel açıdan sürdürülebilir bir yöntem bulmak dünyanın birçok ülkesinde önemli bir ilgili kaynağıdır. Uçucu kül ve taban külü, genellikle geopolimerlerde kullanılan, geri dönüştürülebilir malzemeler için iyi örnekler olarak gösterilmektedir. Geopolimerizasyon sırasında uçucu kül sulu bir polisiyalat çözeltisi içinde alkalın ortam ile reaksiyona girerek bir alümino-silikat-hidrat (A-S-H) çimentolu bir jel oluşturmaktadır. Hem uçucu kül hem de taban külü, yüksek basınç mukavemetine sahip geopolimerler üretmek için kullanılmaktadır (Mohajerani vd. 2019).

Düzenli depolama sahalarında biriken uçucu kül miktarı hava, su kirliliği, tarım arazisi kaybı ve insan sağlığı ile ilgili birçok soruna neden olmuştur. Böylece uçucu külün inşaat malzemesi olarak yeniden kullanılması hem ekonomi hem de çevre açısından fayda sağlamaktadır. Uçucu külün alkali ile aktive edilmiş bir bağlayıcı olarak kullanılması birçok araştırmacı için çekici olmuştur. Sodyum hidroksitin aktivasyonu ile uçucu kül, geopolimer betonda bağlayıcı malzeme olarak başarıyla kullanılmıştır. Uçucu külün harçta uygulanması uçucu külün bir sodyum hidroksit ve sodyum silikat kombinasyonu ile aktive edildiği önceki çalışmalarda da incelenmiştir. Ancak geopolimer tuğlalar için veri tabanı hala sınırlıdır (Ngo 2020).

Uçucu külün çimentolu özellikleri 19. yüzyılın sonlarında keşfedilmiştir ve 100 yılı aşkın

bir süredir bilinmektedir. Çimento üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle Portland çimentosunun %20 – 80'i arasında ilave edilebilir. Betonda yaygın olarak iki tip uçucu kül kullanılmaktadır: C Sınıfı ve F Sınıfı, C Sınıfı genellikle karbon içeriği %2'den az olan yüksek kalsiyumlu uçucu küllerdir; F Sınıfı ise genellikle karbon içeriği %5'ten az ancak bazen %10'a varan düşük kalsiyumlu uçucu küllerdir (Kumar vd. 2019). C sınıfı uçucu kül %20'den fazla CaO'ya sahiptir (Jeevanandan ve Sreevidya 2019).

### **2.3.1 Uçucu Külün Sınıflandırılması**

Kömürün yanması sırasında oluşan ürünler iki kategoriye ayrılmaktadır. Taban külü ve uçucu küldür. Taban külü, parçacık haline gelmek üzere birleştirilmiş kalıntı kısmıdır. Uçucu kül, külün kazandan çıkan yanma gazında tutulan kısmıdır. Uçucu kül, bileşenlerinin doğasına göre iki gruba ayrılabilir. Biri Linyit külü C sınıfı uçucu kül diğeri ise bitümlü F sınıfı uçucu küldür. Hem F hem de C sınıfı uçucu kül çimento ile benzer şekillerde reaksiyona girer ve bağlayıcı olan kalsiyum silikat hidratı oluşturmak için çimento ve suyun hidrasyonu yoluyla kireç (kalsiyum hidroksit) ile bir puzolanik reaksiyona girmektedir. Örneğin çimento, uçucu kül, puzolanik özelliğinden dolayı PC'nin yerine kullanılmaktadır. Bu betonun işlenebilirliğini artıracaktır. Uçucu kül tuğla imalatında kil yerine hammadde olarak kum, kireç ve alçı ile birlikte kullanılmaktadır. Bu tuğlalar sıkıştırılır, kürlenir ve daha sonra hava sürükleyici katkı maddesi ile sertleştirilmektedir. Bu yöntemde ısı yerine basınç kullanılmaktadır. Böylece enerji tasarrufu sağlar, cıva kirliliğini azaltır ve maliyeti geleneksel tuğla maliyetinden %20 daha azdır. Uçucu kül tuğlalarının yüksek basınçlı üretim tekniği için iyi yalıtım özelliği ve çevresel faydalar ile yüksek mukavemet üretecektir (Elango vd. 2019).

### **2.3.2 Uçucu Külün Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri**

Uçucu külün bileşenleri değişebilir ancak ana bileşenler silisyum dioksit, alüminyum oksit ve kalsiyum oksittir. Krom, arsenik ve diğer metaller minimum yüzdeler de bulunur (Iftikhar vd. 2020).

Ancak uçucu külün alkaliler tarafından aktivasyonu ile amorf inorganik polimerler oluşturmaktadır. Geopolimer üretiminde genellikle F tipi uçucu kül tercih edilmektedir.



C tipi uçucu kül F tipi uçucu külden daha düşük alüminyum oksit ve silika içeriğine sahip olduğundan daha düşük bir reaksiyon derecesi ile sonuçlanmaktadır. Ayrıca C tipi uçucu kül bazlı geopolimerin sertleşmesi F tipi uçucu kül bazlı geopolimerinkinden çok daha hızlıdır. Uçucu kül bazlı geopolimerin özelliklerini etkileyen en önemli faktörler uçucu külün kimyasal ve mineralojik bileşimi, alkali çözeltinin türü, konsantrasyonu ve kürlenme koşulludur. Reaksiyon derecesi ortam sıcaklığında özellikle F tipi uçucu kül bazlı geopolimerde yüksek sıcaklığa göre daha düşüktür. Yüksek sıcaklıkta kürlenme durumunda reaksiyon derecesi ve kinetik enerjideki artışın daha yoğun bir yapı sağladığı gösterilmiştir (Tuyan vd. 2018). Uçucu kül bazlı geopolimerler üzerine yapılan son araştırmalar nispeten saf silisyum ve alüminyum bileşenleri nedeniyle düşük kalsiyumlu uçucu kül üzerinde yoğunlaşmıştır. Kimyasal aktivatör tarafından uyarılan alüminyum silisyum fazlarının bir kısmı esas olarak ince camsı küresel parçacıklardan oluşan uçucu külden çözülecek ve daha sonra alüminyum silisyum fazları düşük kalsiyumlu uçucu külün aktivasyon reaksiyonuna benzer bir geopolimerizasyon alacaktır. İnce parçacık boyutuna ve yüksek CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğine sahip atık tuğla tozları geopolimer haline getirilecek özelliklerle de donatılmıştır (Fu vd. 2021).

#### **2.4 Alkali ile Aktive Edilen Geopolimerlerle İlgili Çalışmalar**

Robayo vd. (2016) yaptıkları çalışmada, harcın içindeki kırmızı kil tuğla atığını külesine göre %10 Na<sub>2</sub>O oranıyla birleştirilen NaOH içeriği ile en iyi basınç dayanımını elde etmişlerdir. 25°C ve 70°C'de 48 saat kürlenmiş bu karışımın basınç dayanımı 28 günde sırasıyla 7.49 ve 15.57 MPa'dır. Bunun yanı sıra alkali aktivatöre (NaOH + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) çözünen silika eklenmesi, oda sıcaklığında (25°C) kürlenme ile %100 kırmızı kil tuğla atığının 54.38 MPa basınç dayanımı maksimum olarak elde edilmiştir. Bu NaOH ile ilgili olarak mukavemette %62'lik bir gelişmeyi temsil etmektedir. Alkali aktivatörde (NaOH + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) %20 PÇ ve sodyum silikatın kombine varlığı oda sıcaklığında 28 günlük kürlenmede maksimum 102.6 MPa basınç dayanımı kazanmıştır. NaOH ile aktive edilen harca %10 SPÇ ilavesi aynı kürlenme koşulları için 41.1 MPa'lık bir mukavemet elde edilmiştir. Bu sonuçlar, bir CaO kaynağının (PÇ) eklenmesinin olumlu etkisini ve mikroyapı analizini destekleyen numunede çözünen silikatın (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) varlığını yansıtmaktadır.

Pathak ve Jha (2013), yaptıkları çalışma ile çeşitli inşaat atıklarından sentezlenen geopolimerlerin karşılaştırmalı çalışmasında, kum çimento karışımı, beton karışımı, tuğla tozu vb. inşaat atıklarından alkali ve alkali-silikat aktivatör olarak kullanılarak geopolimerler sentezlemiştir. Alkali konsantrasyonu (alümino-silikatın çözünmesi için) alkali-silikatın inşaat atıklarına oranı ve kürlenme süresi gibi parametreler geopolimerik ürünlerin kalitesini iyileştirmek için değerlendirilmiştir. Tuğla tozu, kum çimento karışımı ve beton karışımından elde edilen geopolimerik ürünlerin maksimum basınç dayanımları sırasıyla 60.0, 47.0 ve 45.5 MPa olarak elde edilmiştir.

Tebbal ve Rahmouni (2019), yaptıkları bu çalışma ile tuğla atığını aktif hale getirmiş ve bağlayıcı olarak kullanmışlardır. Buna göre üç geopolimer beton karışımı tasarlayarak alkali aktif tuğla atığı ve cam tozu harçlarındaki kür sıcaklığının etkisi ve mekanik dirençlere nüfusu incelemiştir. Bu bağlamda, alkali aktivatör tipi ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ ), sertleşme sıcaklığı ( $40^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$ ) ve kür süresi (7-28 gün) olmak üzere iki seviyede deneysel faktörler basınç dayanımını etkileyen olası değişkenler olarak seçilmiştir. Sonuç olarak tam faktör analizine göre harçta tuğla atığı aktifleştirildiğinde  $60^\circ\text{C}$ 'de sertleştirme sıcaklığı seviyesinde, 28 gün sonra basınç dayanımı yeterince iyi bulunmuştur. Fiziksel ve mekanik analizlerde hem basınç dayanımı için ölçülen hem de tahmin edilen değerler arasında iyi bir uyum olduğunu görülmüştür. Yüksek sertleşme sıcaklığı için sadece küçük sapmalar belirlenmiştir. Erken yaşta tuğla tozunun eklenmesi ile mekanik mukavemet artmaktadır.  $60^\circ\text{C}$ 'de özellikle %100 tuğla ince taneli karışım için bu tür mukavemetler geliştirilebilmektedir. Tuğla atığı yüzdesi ve aktivasyonların dozajı ile pişirme sıcaklığı arasındaki etkileşim mekanik tepki ve harç mukavemet ilerlemesi ile daha tutarlı olduğu açıklanmaktadır.

Iftikhar vd. (2020), yaptıkları bu deneysel çalışmalarında, sürdürülebilir geopolimer yeşil kil tuğlaların sentezi ve karakterizasyonu için kil ve uçucu kül miktarını optimize etmişlerdir. Kil ağırlıkça %0'dan %100'e kadar uçucu kül ile ikame edilmiştir. Makro ölçekte elde edilen geopolimer tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Ardından geleneksel pişmiş kil tuğla standartları ile karşılaştırılmıştır. Geopolimer yeşil tuğlalar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaya dayanarak kütle, görünür ve gerçek yoğunluklar uçucu kül ilavesiyle azalmıştır.

Maksimum birim hacim ağırlığı  $1700 \text{ kg/m}^3$ 'den az elde edilmiştir. Bu açıkça Çin standardında tanımlanan aralıktan ( $1800 - 2000 \text{ kg/m}^3$ ) daha az olduğundan hafif sürdürülebilir malzeme olarak nitelendirilebilir. %60'a kadar uçucu kül ilavesi ile geopolimer tuğlanın su emmesi ağırlıkça %15'ten az bulunmuştur. Belirgin basınç mukavemeti ağırlıkça %30 ile %60 arasında uçucu kül miktarına sahip tuğlalar tarafından sergilenmiş ve yük taşıyan yapı için kullanılabilceği belirlenmiştir. Uçucu kül ilavesi ile fiziksel ve mekanik özellikler arasında ilişkiler kurulmuş ve sonuçlar birbiriyle uyumlu olduğu ortaya konmuştur. Basınç dayanımının artan kütle yoğunluğu ile açıkça artmış ve artan su emilimi ile azalmıştır.

Tuyan vd. (2018), yaptıkları bu çalışmada alkali aktivatör konsantrasyonunun ve kütleme koşulunun atık kil tuğla tozu bazlı geopolimerin mukavemetine ve mikroyapısına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı aktivatör konsantrasyonlarında yirmi adet geopolimer harcı üretilmiş ve optimum alkali aktivatör konsantrasyonuna sahip karışımlar farklı kütleme koşullarına tabi tutulmuştur. Test sonuçları optimum alkali aktivatör konsantrasyonunun bağlayıcının ağırlıkça 1.6'sı  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranına ve %10  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriğine karşılık geldiğini göstermiştir. Maksimum  $36.2 \text{ MPa}$  basınç dayanımı 5 gün boyunca kadar  $90^\circ\text{C}$ , %40 bağıl nemde kürlenerek elde edilmiştir. Su/bağlayıcı oranının 0.4'ten daha düşük değerlere düşürülmesi işlenemez geopolimer karışımlar ile sonuçlanmıştır. Ham atık kil tuğla tozunda geopolimer karışımlarına kıyasla daha yoğun kristal pikleri gözlenmiştir. Ayrıca hammaddenin alkaliler tarafından aktivasyonu ile karışımların amorfliği artmıştır. Geopolimer karışımlarında geopolimerizasyon sürecinin güçlü bir kanıtı olan Si-O ve Al-O bağlarının asimetrik genleşme titreşimleri tespit edilmiştir.  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriğinin artması ve  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranının belirli bir seviyeye (1.6) kadar artması karışımın gözenekliliğini azaltarak daha yoğun bir yapıya ve buna bağlı olarak mukavemet artışına neden olmuştur.

Naceri ve Hamina (2009), yaptıkları bu çalışma ile çimento yerine atık tuğla kullanımı araştırmışlardır. Klinker çimento için ağırlıkça farklı oranlarda (%0, %5, %10, %15 ve %20) atık tuğla ile yer değiştirmişlerdir. Çimentonun susuz haldeki ve hidratlı haldeki fiziko-kimyasal özellikleri, harcın mekanik dayanımları 7, 28 ve 90 gün sonraki eğilme ve basınç dayanımları tespit edilmiştir. Sonuçlar 7 ve 28 günlük sertleşmiş harcın

mekanik davranışı, basınç ve eğilme dayanımları artan yapay puzolan içeriği ile azalmıştır. 90 gün sonunda %10'a kadar atık tuğla içeren harçlar  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriğinin ve  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  oranının değişmesi nedeniyle atık tuğla içermeyen şahit örnekler ile karşılaştırılabilir bir dirence ulaşmamışlardır. Eklenen atık tuğlanın yüksek su absorpsiyonu nedeniyle atık tuğla içeriğinin artmasıyla çimento hamurunun priz süreleri azalmıştır. Elde edilen sonuçlar yapay puzolan ilavesinin çimentonun öğütme süresini ve priz süresini dolayısıyla harcın mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Atık tuğlanın %10'nu ile çimento ikamesi harcın mekanik mukavemetini arttırmıştır. Araştırmanın sonuçları bu atık malzemenin puzolanik çimento üretmek için potansiyel kullanımını doğrulamıştır. Test sonuçlarına göre çimento harcı üretiminde atık tuğlanın çimento yerine %10'a kadar kullanılabileceği önerilmiştir.

Wong vd. (2020), geri dönüştürülmüş tuğla tozu içeren yüksek kalsiyumlu uçucu kül esaslı geopolimerin mekanik dayanımı ve geçirgenlik özelliklerini araştırmışlardır. Akışkanlık, mekanik mukavemet, su emme ve kılcal geçirimsizliğin değerlendirilmesi için kaynak malzeme olarak yüksek kalsiyumlu uçucu kül, tuğla tozu,  $\text{NaOH}$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'ten oluşan alkali aktivatör kullanılmıştır. Uçucu kül esaslı geopolimer harçlar farklı  $\text{NaOH}$  (6, 8 ve 10 M) konsantrasyonları ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranları (1.5, 2.0 ve 2.5) ile üretilmiştir. Daha sonra geri dönüştürülmüş tuğla tozu içeriğinin (%0 - %20) basınç dayanımı, absorpsiyon ve emicilik üzerindeki etkisini daha fazla incelemek için 2.5'lik optimum  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranı seçilmiştir. Sonuç olarak değişkenler arasında tuğla tozunun geopolimer karışımlarının akışkanlığını azaltmada en önemli faktör olduğu ortaya konmuştur. 28 günlük en yüksek basınç dayanımı olan 44.2 MPa, 10 M  $\text{NaOH}$  aktivatör ile birlikte uçucu kül ikamesi olarak %10 tuğla tozunun eklenmesiyle elde edilmiştir. 2.5  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  oranının yüksek kalsiyumlu uçucu kül bazlı geopolimerin basınç dayanımı gelişimi için optimum olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, tuğla tozunun %10'un üzerinde artması basınç dayanımı ve akışkanlığın azalmasına yol açtığından %10 tuğla tozu ikamesi optimum olarak alınmıştır.

Youssef vd. (2019), yeni bir geopolimer tuğla üretmek için başka bir endüstriyel atık olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ile atık tuğla geri dönüşümüne bağlı deneysel bir çalışma yapmışlardır. Sonuçlar tuğla atığına (TA) dayalı geopolimer matrisine öğütülmüş

granüle yüksek fırın cürufunun (ÖGYFC) dahil edilmesinin geopolimer tuğlanın fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. 89.91 MPa'lık en iyi basınç dayanımı ÖGYFC/TA = 80/20 oranı, silikat/hidroksit oranı = 2 ve molarite 8 M NaOH için elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen en yüksek eğilme mukavemeti ÖGYFC/TA = 20/80 oranı silikat/hidroksit oranı = 2 ve molarite 8 M NaOH için 10.97 MPa elde edilmiştir. Bu nedenle geopolimer tuğlaların geleneksel fırınlanmış tuğlalara göre çevre dostu bir alternatif olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Migunthanna vd. (2021), rijit üstyapı uygulaması için geopolimer bağlayıcıların kısmi ikamesi olarak atık kil tuğlanın incelenmesinin yapıldığı bu çalışmada, atık kil tuğlası (AKT) PÇ yerine geopolimer bağlayıcıların üretilmesi için uygun bir alternatif çimentolu malzeme olarak tanımlanmıştır. Tek aktivatör olarak susuz katı sodyum metasilikat kullanılırken, AKT'nin uçucu kül veya cüruf ile ikili karışımlarını kullanarak ortam kütleme koşullarında tek parça geopolimer bağlayıcıların mekanik özelliklerini ve çevresel etkilerini araştırmışlardır. AKT alüminosilikat öncüllerini elde etmek için kütlece %20, %40, %60 ve %80 oranında uçucu kül ve cüruf ile ayrı ayrı değiştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, tüm ikili geopolimer sistemleri için toplam bağlayıcının kütlece %10'luk bir optimum aktivatör içeriğini göstermiştir. Tek başına AKT ve AKT-uçucu kül karışımları ile karşılaştırıldığında, AKT-cüruf karışımlarının ikili geopolimer sistemleri daha yüksek basınç dayanımlarını göstermiştir. AKT-cüruf karışımlarından yüksek erken dayanım kazanımı elde edilmiştir. Sırasıyla 24 ve 72 saat için karşılık gelen 28 günlük dayanımın %22 ve %48'inden fazlasını kazanmıştır. 81.8 MPa'lık en yüksek 28 günlük basınç dayanımı alüminosilikat öncüsünde %40 AKT, %60 cüruf içeren bağlayıcı için elde edilmiştir. AKT parçacık boyutunu 150 µm'dan 75 µm'a düşürüldüğünde mukavemet daha da artarak 96.8 MPa'a yükselmiştir. Üretimler sırasında karbondioksit emisyonu ve enerji tüketimi dikkate alındığında PÇ'ye göre AKT esalı geopolimer bağlayıcıların karbon emisyonlarını %78'e kadar ve enerji tüketimini %85'e kadar azaltabildiği görülmüştür. %40 AKT ve %60 cüruftan oluşan bir karışım hem çevresellik ve hem de fonksiyonellik birlikte dikkate alındığında en iyi performansı göstermiştir. Basınç dayanımı değerleri ve erken dayanım kazanma oranı göz önüne alındığında, üstyapı yapımında kullanılacak geopolimer beton deneme karışımlarının geliştirilmesi için AKT-cüruf esaslı tek bileşenli bağlayıcılar önerilmiştir.

Zawrah vd. (2016), yaptıkları çalışma ile geopolimer üretimi için granüle yüksek fırın cürufu içeren atık pişirilmiş kil tuğlaların geri dönüşümü ve kullanımını değerlendirilmiştir. Geopolimer üretiminde atık pişmiş kil tuğlaların yerine %20, %40, %60 ve %80 olarak granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Aynı zamanda kür süresinin geopolimerlerin özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çalışmada iki endüstriyel yan ürünün geri dönüşüm ve değerlendirme sürecinin fizibilitesi için başarılı bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

Youssef vd. (2020), geopolimer tuğla imalatının ekonomik analizi çalışmasında, (Fransa'nın kuzeyindeki tuğla fabrikalarına ilişkin bir Fransız vaka çalışması) hem geopolimer tuğlaların hem de geleneksel fırınlanmış tuğlaların üretim süreçleri araştırılmıştır. Bu çalışma için, geopolimer tuğla üretimindeki hammaddelerin çıkarılmasından depolanmasına kadar tüm aşamaları toplanmış ve analiz edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları geopolimer tuğlaların üretim maliyetinin formülasyonunda kullanılan bileşenlere bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Kil bazlı geopolimer tuğla 20 MPa'lık aynı basınç dayanımı için geleneksel pişmiş tuğlaya kıyasla %5'lik bir mali kazanç sağladığını göstermiştir. Atık tuğlalar söz konusu olduğunda, aynı üretim maliyeti için geopolimer tuğlaların basınç dayanımı pişmiş tuğlaların iki katına çıkmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada geopolimer tuğlaların endüstriyel üretimine olan ekonomik ilgiyi göstermiştir. Atık tuğla ile üretilen geopolimer tuğlalarda pişmiş tuğlalarla aynı üretim maliyeti ile basınç dayanımında %100'lük bir ilerleme sağlanabilmiştir. Bu sonuçlar endüstriyel düzeyde geopolimer esaslı yapı malzemelerinin üretiminde kullanılmak üzere bir veri tabanı olarak değerlendirilebilmiştir.

Rovnaník vd. (2018), ikili atık olarak kırmızı tuğla tozu / metakaolin geopolimerinin reolojik özellikleri ve mikro yapısını araştırmışlardır. Metakaolinin %0, 25, 50, 75 ve 100'ünün AKT ile ikame edildiği beş farklı karışım hazırlanarak geopolimer karışımın mekanik ve reolojik özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, x-ışını difraksiyonu, fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisini, nükleer manyetik rezonans ile gerçekleştirilen mikroyapısal analizi ile ilişkilendirilmiştir. Tüm karışımların akma gerilmesi/sünme gerilmesinin çok düşük olduğu ancak geopolimerizasyon reaksiyonu ile zamanla arttığı gözlemlenmiştir. AKT ve MK'nin geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerinde açıkça olumlu bir etkiye sahip olduğu açıklanmıştır.

Gado vd. (2020), atık kil tuğlaların alkali aktivasyonu; silika modülü,  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  molar oranı ve sıvı/katı oranının etkisi gibi çeşitli reaksiyon koşullarının atık pişmiş kil tuğlaların geopolimerizasyon reaksiyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar atık pişirilmiş kil tuğlaların geopolimerizasyon sisteminin oda sıcaklığında incelenen reaksiyon koşullarından etkilendiğini göstermiştir. Alkali çözeltinin optimum silika modülü,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  molar oranı sırasıyla  $M_s = 1.25$  ve  $12.5$  olarak elde edilmiştir. Optimum koşullarda üretilen geopolimer numunelerinin basınç dayanımı diğer koşullara kıyasla  $4.5 \text{ MPa}$ 'dan  $37.5 \text{ MPa}$ 'a kadar önemli ölçüde artmıştır.

Rovnaník vd. (2016), yaptıkları bu çalışmada geopolimer üretiminde uçucu kül ve tuğla tozundan hazırlanan malzemeleri kullanmışlardır. Araştırılan parametrelerin sonuçları uçucu kül ve tuğla tozu oranlarına göre farklılıklar göstermiştir. Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül daha geniş spesifik yüzeye, daha yüksek puzolanik aktiviteye ve daha kompakt mikroyapının bir sonucu olarak daha yüksek eğilme ve basınç dayanımlarına ulaşmıştır. Ayrıca alkali ile aktive olan tuğla tozu malzemesinin daha düşük eğilme ve basınç dayanımları, düşük puzolanik aktivite ve kompakt olmayan mikro yapılar elde edilmiştir. Öteyandan alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül ve harmanlanmış malzemelerin mikro yapısı çok kompakt iken alkali ile aktifleştirilmiş tuğla tozu keskin kenarlı taneler arasında daha fazla gözenek bulunan daha az sıkıştırma yapılarını sergilemiştir.

Foşt vd. (2019), tuğla tozu kullanılarak hazırlanan geopolimerlerin karakterizasyonu çalışmasında, farklı alkali aktivatörler ve kür koşulları ile toz halindeki atık tuğla kullanılarak çeşitli geopolimer karışımları hazırlanmıştır. Çalışmada geopolimerlerin reaksiyon hızı, mikro yapısı ve bileşimini analiz etmek için malzeme karakterizasyon tekniklerinin uygulanmasına dayanan deneysel çalışmalara göre sonuçlar, artan silikat modülünün yanı sıra kütleme sıcaklığının artmasıyla erken yaşta reaksiyon hızının azaldığını göstermiştir. Örneğin, tuğladaki düşük amorf faz içeriğinden dolayı metakaolin bazlı geopolimerlerden önemli ölçüde daha yavaştır. En kompakt mikro yapı erken yaşlarda en yüksek reaksiyon hızına sahip geopolimerlerde gözlenmiştir. Aktivatörün artan silikat modülü ve azalan kütleme sıcaklığı ile kompaktlık giderek azalır ve özgül gözenek hacmi artar. Termal analiz tüm sıcaklıklar için artan silikat modülü ile azalan bir ağırlık kaybı gösterirken N-A-S-H ve C-A-S-H jellerinin dehidrasyonu en önemli

faktörler olarak tanımlanır. 60°C ve 80°C’de kürlenmiş geopolimerler için zeolitik fazların oluşumu gözlenmiştir.

Youssef vd. (2019), yaptıkları çalışma ile geopolimer tuğlaları üretmek için kil ve atık tuğlalara dayalı yedi formülasyon kullanmışlardır. Sonuçlar geleneksel pişmiş tuğlalarla karşılaştırılmıştır. Çevresel değerlendirmeyi belirlemek ve analiz etmek için geopolimer tuğlalar için yaşam döngüsünün değerlendirmesinin kavramı kullanılmıştır. Sonuçlar kil bazlı geopolimer tuğlaların pişmiş tuğlalara kıyasla CO<sub>2</sub> emisyonlarını %55’e kadar azaltabildiğini ve yapısal işler için gerekli mekanik mukavemeti sağlayabildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca atık tuğla bazlı geopolimerler pişmiş tuğlaların iki katı basınç dayanımı ile CO<sub>2</sub> emisyonlarını %29.5’e kadar azaltmıştır.

Riyap vd. (2020), yaptıkları çalışma ile alüminosilikat kaynakları olarak kullanılan metakaolin ve atık pişmiş tuğladan elde edilen geopolimer çimentoların basınç dayanımları ve mikroyapısal özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar geopolimer çimentonun hazırlanması sırasında kaolinin kalsinasyonunun düşük değerli alüminosilikat açısından zengin atık olarak atık pişmiş tuğlanın doğrudan kullanılmasıyla önlenebileceğini göstermiştir.

Faria vd. (2019), tuğla atığı esaslı geopolimerin teknolojik özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> molar oranı 4 olarak belirlenmiştir. Kalıplanmış ve preslenmiş numuneler 7 ve 14 gün boyunca oda sıcaklığında ve 60°C’de olgunlaşmaya bırakılmıştır. Daha sonra eğilme mukavemeti, lineer rötre, su emme ve görünür porozite testlerine tabi tutulmuştur. Kür süresinin uzamasıyla; numunelerin hem oda hem de sıcaklık kontrollü olarak kür edilmesi sonucunda teknolojik özelliklerinin daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Ahmed vd. (2020), atık kil tuğla kullanılarak metakaolin esaslı geopolimer betonun ısı yalıtımının iyileştirilmesini incelediği bu çalışmada kil tuğla atıkları iki seri karışımda kullanılmıştır. Birincisi ağırlıkça %10, %15 ve %20 metakaolinin (MK) kısmi ikamesi olarak atık kil tuğla tozu (AKT) içerirken, ikinci karışım grubu hacimce %10, %20 ve %30 doğal iri agrega değiştirme seviyesinde öğütülmüş kil tuğla atık agregası içermektedir. Neticede %10 ve %15 AKT’ye sahip numunelerin sonuçları daha yüksek



ultrasonik darbe hızını ve daha az boşluk içeriğini gösterirken, kil tuğla agregasının %20 ve %30 oranında ikame edilmesi ultrasonik darbe hızında bir azalmaya neden olmuştur.

Bu tez çalışmasında geopolimer hammaddesi olarak, Afyonkarahisar bölgesinde bulunan tuğla fabrikalarından elde edilen atık tuğla tozları kullanılmıştır. Gerek tuğla üretimi gerekse inşaat atıkları ile ortaya çıkan tuğla atıkları ciddi bir çevre sorunu haline gelmektedir. Bu konu üzerinde yapılan birçok çalışma literatürde bulunmaktadır. Farklı tuğla üretim teknolojilerinin tuğla tozu üretiminde öğütme işlemine etkisi ve bu etki ile birlikte geopolimer harcın fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Uçucu kül ile ikame edilerek elde edilen seriler farklı NaOH molariteleri ile üretilmiş, fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur.

### **3. MATERYAL ve METOT**

Atık tuğla tozlarının geopolimer harç üretiminde kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada, Afyonkarahisar bölgesinde bulunan tuğla fabrikalarına ait atıklar kullanılmıştır. Geopolimer harç üretiminde kullanılan malzemeler ve deney yöntemleri ile ilgili detaylar bu bölüm altında sunulmuştur.

#### **3.1 Materyal**

Bu tez çalışmasında Afyonkarahisar bölgesinde üretilen pişirilmiş kil tuğlalarına ait atık tuğlaların öğütülmesi ile elde edilen tuğla tozları kullanılmıştır. Beş farklı tuğla fabrikası üretim teknolojilerine göre belirlenmiştir. Tuğla üretim tesislerinin teknolojileri genel olarak yakma, kurutma, üretim yöntemi, otomasyon, hammadde işleme ve şekillendirme sistemlerine göre tanımlanmaktadır (İnt. Kay. 1). Buna göre seçilen beş farklı pişmiş tuğla atığı görece T1: yüksek teknoloji, T2: orta teknoloji, T3: düşük teknoloji, HT1: geleneksel harman tuğla (açık renkli) ve HT2: geleneksel harman tuğla (koyu renkli) olarak adlandırılmıştır. Atık tuğla tozları ile ikame edilerek kullanılacak diğer hammadde uçucu küldür. Harç üretiminde agrega olarak silis kumu, alkali aktivatör kaynağı ise NaOH ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  tır.

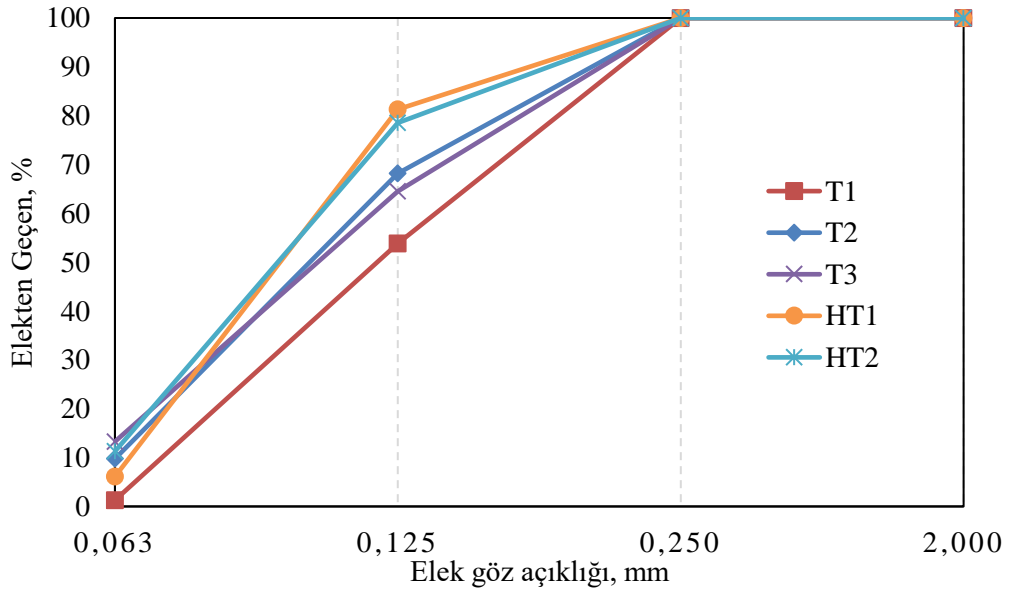
##### **3.1.1 Tuğla Atığı**

Geopolimer harç üretiminde kullanılacak olan tuğla atığı tozları, kırılan tuğla parçaları toz haline getirilmeden önce yüzeyindeki olası kirli malzemelerden arındırmak amacıyla yıkanmış, laboratuvar ortamında kurutulduktan sonra bilyalı değirmende 2 saat boyunca öğütülerek toz haline getirilmiştir. Her fabrikanın üretim yöntemindeki farklılık, malzemenin öğütülme özelliğine etki edeceği düşünülerek, tuğla atıklarının değirmende öğütme süresi sabit tutulmuştur. Yapı bloğu olarak değerlendirilebilecek olan ürünlerin mümkün olduğunda az enerji ile elde edilmesi bu çalışmanın temel amacı olduğundan öğütme işleminde belli bir incelik hedeflenmemiş ve Şekil 3.1'de verilen elek analizi sonuçları elde edilmiştir. Çalışmada tüm tuğla tozları 250 $\mu\text{m}$  elek altı boyutunda kullanılmıştır. Resim 3.1'de tuğla tozu atıklarının hazırlanma aşamaları gösterilmektedir.

Karışımlarda kullanılan tuğla tozlarına ait olan XRF sonuçlarına göre kimyasal kompozisyonlar Çizelge 3.1'deki gibidir.



Resim 3.1 Tuğla tozu atıklarının hazırlanması.



Şekil 3.1 Atık tuğla tozlarının elek analizi.

**Çizelge 3.1** Atık tuğla tozlarına ait kimyasal kompozisyonlar (%).

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
<b>T1</b>	7.99	48.78	20.57	7.89	4.08	2.34	0.95	0.99
<b>T2</b>	6.99	49.48	19.85	8.40	4.09	2.43	1.16	0.99
<b>T3</b>	5.12	50.99	22.61	8.59	4.51	2.44	1.18	1.09
<b>HT1</b>	16.30	45.40	14.65	5.91	3.44	2.15	0.95	0.77
<b>HT2</b>	17.67	48.82	15.05	6.42	3.10	2.33	1.06	0.81

### 3.1.2 Uçucu Kül

Geopolimer harç üretimlerinde Tunçbilek Termik Santraline ait uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Uçucu kül Afyon Kolsan Hazır Beton tesisinden temin edilmiştir. Uçucu küle ait XRF analizi sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.2** UK’nin XRF analizi sonuçları (Şinik 2019).

Kimyasal Bileşim, %	UK
SiO <sub>2</sub>	54.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.59
CaO	3.18
MgO	4.09
Na <sub>2</sub> O	0.32
K <sub>2</sub> O	2.39
SO <sub>3</sub>	0.71
TiO <sub>2</sub>	1.02
Kızdırma Kaybı	1.52

### 3.1.3 Agregası

Geopolimer harç üretimlerinde agrega olarak silis esaslı kum kullanılmıştır. Kullanılan kumun tane boyutu 0-3 mm aralığındadır. Kumun özgül ağırlığı 2.61 olarak bulunmuştur.

### 3.1.4 Alkali Aktivatör

Bu çalışmada geopolimer harçların imalatında alkali aktivatör olarak NaOH (SH) ve

Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (SS) kullanılmıştır. Alkali aktivatörler 1:2 oranında kullanılmıştır. Çizelge 3.3'te alkali aktivatörlerin kimyasal içerikleri verilmiştir. Pelet formundaki NaOH saf su ile istenilen molarite de 5 M ve 10 M olarak çözelti haline getirilimiş ve 24 saat bekletildikten sonra kullanılmıştır.

**Çizelge 3.3** Alkali aktivatörlerin kimyasal içerikleri.

Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	NaOH
Na <sub>2</sub> O: 7,5–8,5%	5 M, 10 M
SiO <sub>2</sub> : 25,5–28,5%	M: 40 g/mol
Yoğunluk (20°C) 1,296-1,396 g/ml	Yoğunluk (20°C) 2,13 g/cm <sup>3</sup>
Fe ≤ 0,05%	NaOH ≥ %98
Ağır metaller: (as Pb) ≤ 0,005%	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> < %0,5

### 3.2 Metot

NaOH konsantrasyonu ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı mekanik mukavemet gelişiminde önemli rol oynamaktadır. NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> alüminatsilikat ağı oluşturmak için Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> kaynağı olan uçucu kül ve tuğla tozundaki silika ve alüminayı çözmek için aktivatör görevi göstermektedir. Bununla birlikte aşırı NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanımı geopolimerin mekanik gücünü azaltabilir. Bu amaçla NaOH çözeltisi, literatürde yaygın olarak kullanılan 5M ve 10M olarak seçilmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı 2 olarak kullanılmıştır. Karışım içerisindeki tuğla tozu miktarı, uçucu kül ile %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ikame edilerek hazırlanmıştır.

Tuğla tozu atığını aktive etmek için 5 farklı tuğla tozu kaynağı (T1, T2, T3, HT1, HT2), 5 farklı tuğla tozu oranı (%0, %25, %50, %75, %100), 2 farklı NaOH molaritesi (5M ve 10 M) ile 42 farklı seri oluşturulmuştur. Fiziksel ve mekanik deneylerin ardından herbir tuğla tozu kaynağı için seçilen optimum karışımlar için farklı numunelerin üretilmesi ile daha detaylı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Harç karışım oranları Çizelge 3.4'te verilmiştir. Çizelgelerdeki numunelerin kodlanması incelendiğinde örneğin T1-5-100 serisi için T1 kullanılan tuğla atığı tozunun tipini, 5 kullanılan NaOH çözeltisinin molaritesini, 100 kullanılan atık tuğla tozu kullanım oranını göstermektedir. Tuğla tozunun hiç kullanılmadığı %100 UK içerilik seriler ise 5M NaOH için R-5M ve 10M

NaOH için ise R-10M olarak adlandırılmıştır.

Yapılan çalışmada öncelikle 42 adet geopolimer harç serisi üretilmiş ve geopolimerlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Cephe kaplaması veya yapı bloğu olarak pişmiş kil esaslı tuğla birimlere alternatif olarak değerlendirilebilecek olan geopolimer harçlar arasından çeşitli seriler seçilmiştir. Bu seçim yapılırken beş tuğla tozu kaynağının her biri için en düşük su emme değerlerine sahip olanlar belirlenmiştir. Geopolimerlerin dış ortam koşullarına karşı daha dayanıklı olacağı ve geopolimer içerisindeki kimyasalların geopolimer yüzeyine çıkmasının daha az gerçekleşeceği düşünüldüğünden su emme değeri düşük olan seriler seçilmiştir. Ayrıca beş tuğla tozu kaynağının her biri için en yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olan serilerde seçilmiştir. Bu optimizasyon işlemine örnek olarak, T1 atık tuğla tozu ile üretilen ve NaOH çözeltisinin 5 ve 10M olarak kullanıldığı tüm seriler incelendiğinde en düşük su emme değerine sahip serilerin T1-10-100 serileri olduğu görülmüştür. Yine T1 atık tuğla tozu kullanılarak üretilen serilerin basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımına sahip serilerin T1-10-25 serilerinden elde edildiği görülmüştür. Bu kapsamda T1 için en düşük su emme oranı T1-10-100, en büyük basınç dayanımı T1-10-25, T2 için en düşük su emme oranı ve en büyük basınç dayanımı T2-10-100, T3 için en düşük su emme oranı T3-10-100, en büyük basınç dayanımı T3-5-100, HT1 için en düşük su emme oranı ve en büyük basınç dayanımı HT1-5-100, HT2 için en düşük su emme oranı HT2-10-75, en büyük basınç dayanımı HT2-10-25 olmak üzere toplam 8 seri seçilmiştir.

**Çizelge 3.4** Geopolimer harç numunelerindeki malzemelerin karışım miktarları.

Seri Adı	Kum (gr)	Tuğla Tozu (gr)	Uçucu Kül (gr)	NaOH (ml)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ml)
T1-5-100	750	250	-	58	117
T1-5-75	750	187.5	62.5	58	117
T1-5-50	750	125	125	58	117
T1-5-25	750	62.5	187.5	58	117
T1-10-100	750	250	-	58	117
T1-10-75	750	187.5	62.5	58	117
T1-10-50	750	125	125	58	117
T1-10-25	750	62.5	187.5	58	117
T2-5-100	750	250	-	58	117

**Çizelge 3.4 (Devam) Geopolimer harç numunelerindeki malzemelerin karışım miktarları.**

Seri Adı	Kum (gr)	Tuğla Tozu (gr)	Uçucu Kül (gr)	NaOH (ml)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ml)
T2-5-75	750	187.5	62.5	58	117
T2-5-50	750	125	125	58	117
T2-5-25	750	62.5	187.5	58	117
T2-10-100	750	250	-	58	117
T2-10-75	750	187.5	62.5	58	117
T2-10-50	750	125	125	58	117
T2-10-25	750	62.5	187.5	58	117
T3-5-100	750	250	-	58	117
T3-5-75	750	187.5	62.5	58	117
T3-5-50	750	125	125	58	117
T3-5-25	750	62.5	187.5	58	117
T3-10-100	750	250	-	58	117
T3-10-75	750	187.5	62.5	58	117
T3-10-50	750	125	125	58	117
T3-10-25	750	62.5	187.5	58	117
HT1-5-100	750	250	-	58	117
HT1-5-75	750	187.5	62.5	58	117
HT1-5-50	750	125	125	58	117
HT1-5-25	750	62.5	187.5	58	117
HT1-10-100	750	250	-	58	117
HT1-10-75	750	187.5	62.5	58	117
HT1-10-50	750	125	125	58	117
HT1-10-25	750	62.5	187.5	58	117
HT2-5-100	750	250	-	58	117
HT2-5-75	750	187.5	62.5	58	117
HT2-5-50	750	125	125	58	117
HT2-5-25	750	62.5	187.5	58	117
HT2-10-100	750	250	-	58	117
HT2-10-75	750	187.5	62.5	58	117
HT2-10-50	750	125	125	58	117
HT2-10-25	750	62.5	187.5	58	117
R-5M	750	-	250	58	117
R-10M	750	-	250	58	117

### 3.2.1 Presleme İşlemi

Geopolimer harçlar, karışıma giren malzemeler ile alkali sıvıların uygun oranlarda mekanik bir harç mikseri ile 3 dakika süreyle karıştırılmasıyla hazırlanmıştır. Alkali çözeltiler, öğütülmüş atık tuğla tozu, uçucu kül ve kum kullanılarak hazırlanan karışımlar 50 mm çap ve 50 mm yüksekliğe sahip silindirik kalıplara yerleştirilmiştir. Her bir karışım için 3'er adet numune üretilmiştir. Silindirik numunelerin hazırlanmasında Resim

3.2’de gösterilen hidrolik ekipman kullanılmıştır. Üretilen silindirik numuneler 80 bar ile sıkıştırılmıştır. Üretim sonrasında tüm numuneler 80°C sıcaklıktaki etüvde 5 saat boyunca kürlenmiştir. Etüv kürü sonrasında numuneler 28 gün boyunca ortam sıcaklığında bekletilmiştir. Hazırlanan bu silindir numuneler üzerinde birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, görünen porozite, su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık deneyleri yapılmıştır.



Resim 3.2 Geopolimer harç numunelerinin üretim aşamaları.

### 3.2.2 Kalıplama İşlemi

Üretilen geopolimer harçlarının eğilme dayanımı, elektriksel özdirenç ve yüzey sıcaklıklarındaki değişimleri belirlemek amacıyla da silindir numunelerden farklı olarak numunelerde üretilmiştir. Eğilme dayanımları için üretilmiş geopolimer harç numunelerin boyutları 210 mm x 65 mm x 15 mm’dir. Üretilen geopolimer harçların elektriksel özdirenç ve yüzey sıcaklıklarındaki değişimleri belirlemek için 100 mm çapında ve 50 mm yüksekliğinde disk şeklindeki numunelerde üretilmiştir. Bu numuneler 1 dakika süre ile titreşim sehbasında titreşim uygulanarak kalıplarına yerleştirilmiştir. Hazırlanan numunelere 80°C sıcaklığa sahip etüvde 5 saat boyunca kür uygulanmıştır. Üretilen numunelere ait görüntüler Resim 3.3’te gösterilmiştir.





**Resim 3.3** Üretilen geopolimer harç numunelerine ait görüntüler.

### 3.3 Fiziksel ve Mekanik Deneyler

Geopolimer harç numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için çeşitli deneyler yapılmıştır. Bu deneyler birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, görünen porozite, su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı, yüksek sıcaklık, eğilme dayanımı, elektriksel özdirenç ve yüzey sıcaklığı deneyleridir.

#### 3.3.1 Birim Hacim Ağırlık, Görünür Yoğunluk, Görünen Porozite ve Su Emme

Fiziksel özellikler, üretilen numunelerin yapısının değerlendirilmesinde oldukça önemlidir. Birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, görünen porozite ve su emme deneyleri 50 mm çapında ve 50 mm yüksekliğindeki silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Geopolimer harç numuneleri üretildikten hemen sonra 80°C sıcaklıktaki etüvde 5 saat boyunca kürlenmiş ve sonrasında 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numunelerin su içerisindeki ağırlıkları belirlemek için Arşimet terazisi kullanılmıştır. Üretilen geopolimer harç numunelerinin birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk, görünen porozite ve su emme değerleri sırasıyla Denklem (3.1-3.4) yardımıyla

hesaplanmıştır.

$$BHA = \frac{W_1}{W_3 - W_2} \quad (3.1)$$

$$GY = \frac{W_1}{W_1 - W_2} \quad (3.2)$$

$$GP = \frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \times 100 \quad (3.3)$$

$$SE = \frac{W_3 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3.4)$$

Denklemlerdeki  $W_1$ : Numunenin etüvde  $105^\circ\text{C}$ 'de 24 saat boyunca bekletildikten sonraki ağırlığını (gr),  $W_2$ : Suyu doymuş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),  $W_3$ : Suyu doymuş numunenin havadaki ağırlığı (gr), BHA: Birim hacim ağırlığı ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), GY: Görünür yoğunluk ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), GP: Görünen porozite (%) ve SE: Su emme (%) değerlerini göstermektedir. Arşimet deneyine ait görüntüler Resim 3.4'te gösterilmiştir.



**Resim 3.4** Arşimet deneyinin yapılışı.

### 3.3.2 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyleri  $\Phi 50 \times 50$  mm boyutlarındaki silindir geopolimer harç numuneleri üzerinde yapılmıştır. Üretilen numuneler  $80^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki etüvde 5 saat boyunca bekletilmiş ve sonrasında 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletildikten sonra ultrases geçiş hızı deneyleri gerçekteştirilmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı Resim 3.5'te gösterilmiştir. Geopolimer harç numuneleri üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı deneyleri TS EN 12504-4'ye (2021) göre gerçekteştirilmiştir.



Resim 3.5 Ultrases geçiş hızı deneyi.

### 3.3.3 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri  $\Phi 50 \times 50$  mm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyinin yapılışı Resim 3.6'da gösterilmiştir. Mekanik özelliklerden olan basınç dayanımı deneyleri ise TS EN 196-1 (2016) nolu standarda göre otomatik bilgisayar kontrollü basınç presinde yapılmıştır.



Resim 3.6 Basınç dayanımı deneyi.



### 3.3.4 Yüksek sıcaklık deneyi

Yüksek sıcaklık deneyleri  $\Phi 50 \times 50$  mm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılacak silindir numunelere öncelikle 5 saat boyunca  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta etüv kürü uygulanmıştır. Daha sonra numuneler 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiş ve sonrasında bu numunelere yüksek sıcaklık deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık değeri olarak  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  seçilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler Resim 3.7’de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık fırını  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  getirildikten sonra numuneler bu sıcaklıkta 3 saat boyunca bekletilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler üzerinde ağırlık kaybı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.



**Resim 3.7** Yüksek sıcaklık fırını ve numuneler.

### 3.3.5 Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı deneyleri  $210 \times 65 \times 15$  mm boyutlarındaki levha şeklindeki numuneler üzerinde yapılmıştır. Levha şeklindeki numunelere öncelikle 5 saat boyunca  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta etüv kürü uygulanmış ve sonrasında numuneler 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Eğilme deneyinin yapılışı Resim 3.8’de gösterilmiştir. Üretilen geopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı değerleri Denklem (3.5) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\text{eğilme}} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.5)$$

Denklemdaki P: Maksimum kırılma yükünü (kN), L: Mesnetler arası mesafeyi (mm), b: Numune enini (mm), d: Numune yüksekliğini (mm),  $\sigma_{\text{eğilme}}$ : Eğilme dayanımını (MPa) değerlerini göstermektedir.



**Resim 3.8** Eğilme dayanımı deneyi

### 3.3.6 Elektriksel Özdirenç Deneyi

Elektriksel özdirenç ölçümleri  $\Phi 100 \times 50$  mm boyutlarındaki disk numuneler üzerinde yapılmıştır. Geopolimer harç numunelerinin elektriksel özdirenç ölçümünde kullanılan deney düzeneği Resim 3.9'da gösterilmiştir. Disk şeklindeki numunelere öncelikle 5 saat boyunca  $80^\circ\text{C}$  sıcaklıkta etüv kürü uygulanmıştır. Daha sonra numuneler 28 gün boyunca oda sıcaklığında bekletildikten sonra elektriksel özdirenç ölçümleri yapılmıştır.



**Resim 3.9** Elektriksel özdirenç deney düzeneği.

Elektriksel özdirenç ölçümlerinden önce geopolimer harç numuneleri suya doymun hale getirilmiştir. Deney düzeneği elektrot görevi gören iki adet bakır levha, mekanik kelepçe,

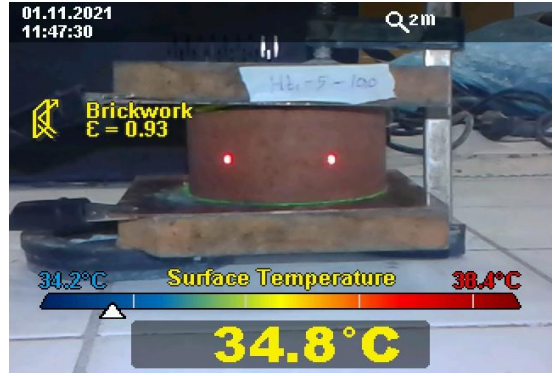
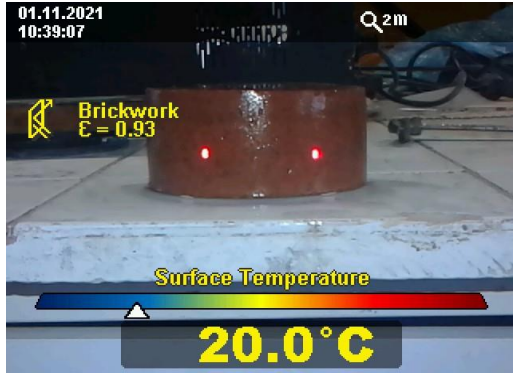
iletkenliği arttırmak için ıslak bezler, akımı ve voltajı gösteren bir güç kaynağından oluşmaktadır. Geopolimer numunelerinin karşılıklı iki yüzeyine yerleştirilen bakır levhalar mekanik kelepçe vasıtasıyla sabitlenmiştir. Güç kaynağının artı kutbu bir bakır elektroda eksi kutbu da diğer bakır elektroda bağlanarak devre tamamlanmıştır. Bu işlemlerden sonra güç kaynağından sabit 60 V verilerek her bir geopolimer numunesinin çektiği akım değerleri kaydedilmiştir. Denklem 3.6 yardımı ile beton numunelerinin özdirenç ( $\rho$ ) değerleri hesaplanmıştır.

$$\rho = Rx \frac{S}{L} \quad (3.6)$$

Denklemdaki  $\rho$  = elektriksel özdirenci ( $\Omega\text{cm}$ ); L, bakır elektrotlar arası mesafe (cm); R ölçülen direnç ( $\Omega$ ); ve S, elektrot iletken alanı ( $\text{cm}^2$ )'dır (Boğa 2017).

### 3.3.7 Yüzey Sıcaklığı Deneyi

Elektriksel özdirenç deneyi yapılan numunelerin ayrıca zamana bağlı olarak yüzey sıcaklıklarındaki değişimler de incelenmiştir. Yüzey sıcaklıklarının ölçümünde ısı dedektörü kullanılmıştır. Öncelikle numunelerin yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Daha sonra DC güç kaynağı ile 60 V uygulanan numunelerin 1, 2, 4, 8, 16, 32 ve 64 dakika sonraki yüzey sıcaklıklarındaki değişimler belirlenmiştir. Yüzey sıcaklık ölçümlerine ait görüntüler Resim 3.10'da gösterilmiştir.



Resim 3.10 Yüzey sıcaklıklarının ölçümü.

## 4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

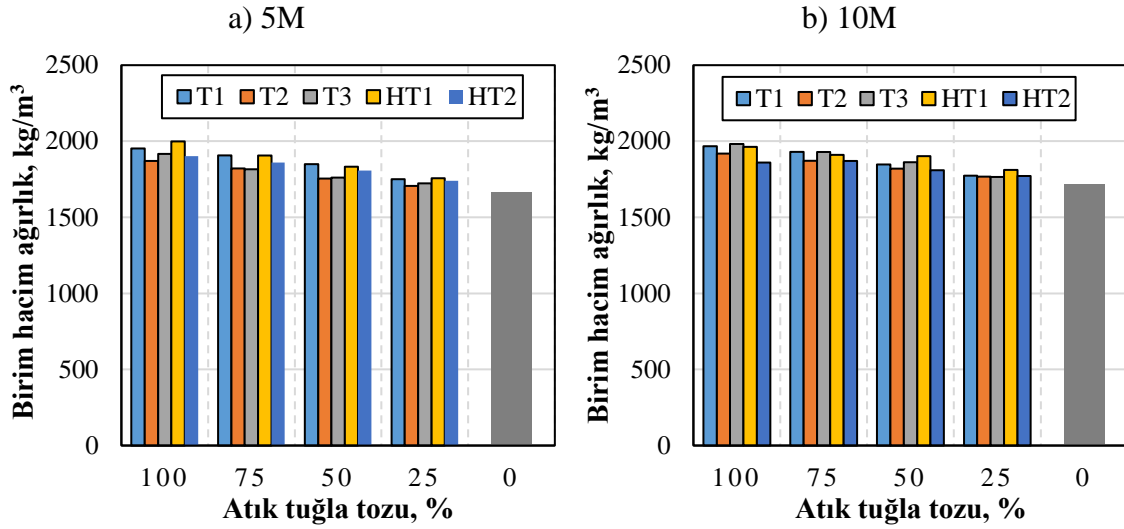
### 4.1 Birim Hacim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Geopolimer serilerinin birim hacim ağırlıklarındaki değişimler atık tuğla tozu (ATT) kullanım oranlarına göre Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde atık tuğla tozu kullanım oranlarının azalışı ile birlikte geopolimer serilerinin birim hacim ağırlıklarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Çalışmada atık tuğla tozu yerine uçucu kül kullanıldığı için ve uçucu külün özgül ağırlığının atık tuğla tozunun özgül ağırlığından daha düşük olmasından dolayı birim hacim ağırlık değerleri azalmıştır. Şekil 4.1a ve 4.1b karşılaştırıldığında molarite değerinin artışı ile birlikte birim hacim ağırlık değerlerinde genel olarak artışların olduğu sonucuna varılmıştır.

Atık tuğla tozu kullanım oranının %100 ve molaritenin 5 olması durumunda T1, T2, T3, HT1 ve HT2 serilerinin ortalaması alınarak elde edilen birim hacim ağırlık değeri 1928 kg/m<sup>3</sup> iken molaritenin 10 olması ile ortalama birim hacim ağırlık değeri 1938 kg/m<sup>3</sup> olmuştur. ATT’nin %75, 50, 25 ve 0 oranlarında ve NaOH çözeltisinin 5 M olarak kullanılması durumunda ortalama birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 1862, 1801, 1735 ve 1668 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunurken, NaOH çözeltisinin 10 M olarak kullanılması durumunda birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 1902, 1848, 1778 ve 1719 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur.

Farklı tuğla fabrilarından elde edilen ATT’ler ile üretilen geopolimerlerin birim hacim ağırlık değerleri karşılaştırıldığında değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak Şekil 4.1 genel olarak incelendiğinde 5M olan serilerde T1 ve HT1 serilerinden diğer serilere göre daha yüksek birim hacim ağırlık değerleri elde edilirken, 10M olan serilerde ise T1, T3 ve HT1 serilerinden daha yüksek birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir.



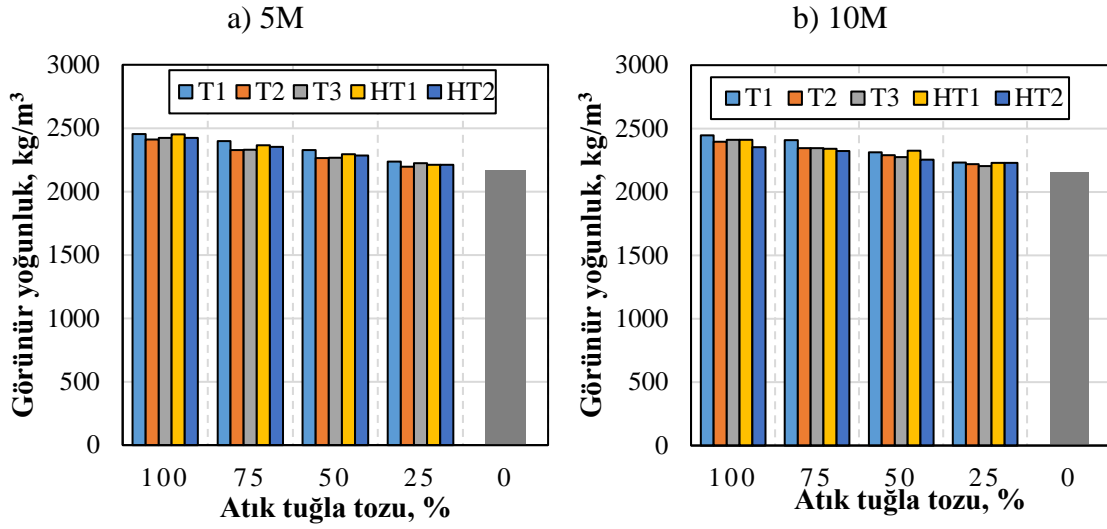


Şekil 4.1 Birim hacim ağırlık sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M

#### 4.2 Görünür Yoğunluk Deneyi Sonuçları

Geopolimer serilerinin atık tuğla tozu (ATT) kullanım oranlarına göre görünür yoğunluklarındaki değişimler Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde birim hacim ağırlık sonuçlarında olduğu gibi atık tuğla tozu kullanım oranlarının azalışı ile birlikte geopolimer serilerinin görünür yoğunluklarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Şekil 4.2a ve 4.2b karşılaştırıldığında molarite değerinin artışı ile bazı serilerde görünür yoğunluk değerlerinde artışlar gerçekleşirken bazı serilerde ise azalmalar gerçekleşmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde ATT’nin %100, 75, 50, 25 ve 0 oranlarında ve NaOH çözeltisinin 5 M olarak kullanılması durumunda; T1, T2, T3, HT1 ve HT2 serilerinin ortalaması alınarak elde edilen görünür yoğunluk değerleri sırasıyla 2432, 2354, 2287, 2216 ve 2168 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. NaOH çözeltisinin 10 M olarak kullanılması durumunda ortalama görünür yoğunluk değerleri sırasıyla 2404, 2353, 2292, 2223 ve 2161 kg/m<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.

Görünür yoğunluk değerleri farklı atık tuğla tozlarına göre değerlendirildiğinde ise birbirine oldukça yakın değerlerin elde edildiği görülmüştür. En yüksek görünür yoğunluk değerleri her iki molarite değerinde de T1 serilerinden elde edilmiştir.



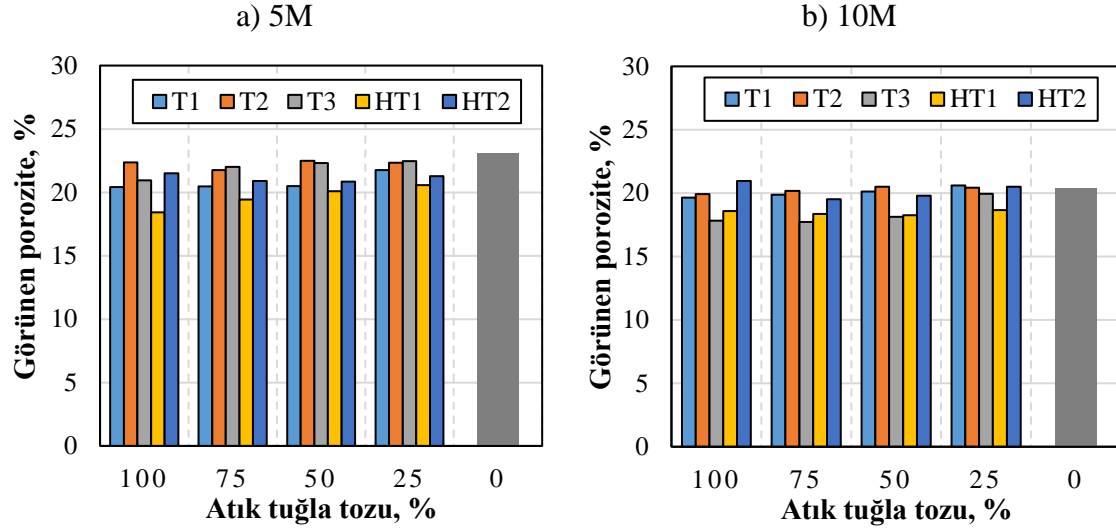
Şekil 4.2 Görünür yoğunluk sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.

### 4.3 Görünen Porozite Deneyi Sonuçları

Görünen porozite sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.3'ten görüldüğü üzere atık tuğla tozu kullanım oranlarının azalması ile birlikte genel olarak görünen porozite değerlerinde artışların olduğu sonucuna varılmıştır. NaOH çözeltisinin 5M olarak kullanıldığı ve ATT oranının azalışına bağlı olarak T2 ve HT2 serilerinden elde edilen görünen porozite değerlerinde artışların ve azalışların olduğu görülmüştür. 5M olan serilerde en küçük görünen porozite değerleri HT1 serilerinden elde edilirken, 10M olan serilerde ise en küçük görünen porozite değerleri T3 ve HT1 serilerinden elde edilmiştir. Ayrıca molarite değerinin artışı ile birlikte görünen porozite değerlerinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.3'ten görüldüğü üzere ATT'nin %100, 75, 50, 25 ve 0 oranlarında ve NaOH çözeltisinin 5M olarak kullanılması durumunda; T1, T2, T3, HT1 ve HT2 serilerinin ortalaması alınarak elde edilen görünen porozite değerleri sırasıyla %20.73, 20.92, 21.25, 21.68 ve 23.10 olarak bulunmuştur. ATT'nin %100, 75, 50, 25 ve 0 oranlarında kullanıldığı ve 10 M olan serilerden elde edilen ortalama görünen porozite değerleri ise sırasıyla %19.40, 19.14, 19.36, 20.04 ve 20.40 olarak elde edilmiştir. Elde edilen ortalama değerlerden de görüldüğü üzere molarite değerinin artışı ile birlikte görünen porozite değerleri azalmıştır. Ayrıca ATT'nin kullanım oranlarının azalması ile yani uçucu kül

kullanım oranlarının artması ile birlikte her iki molaritede de genel olarak görünen porozite değerlerinin arttığı elde edilen ortalama değerlerden görülmektedir.



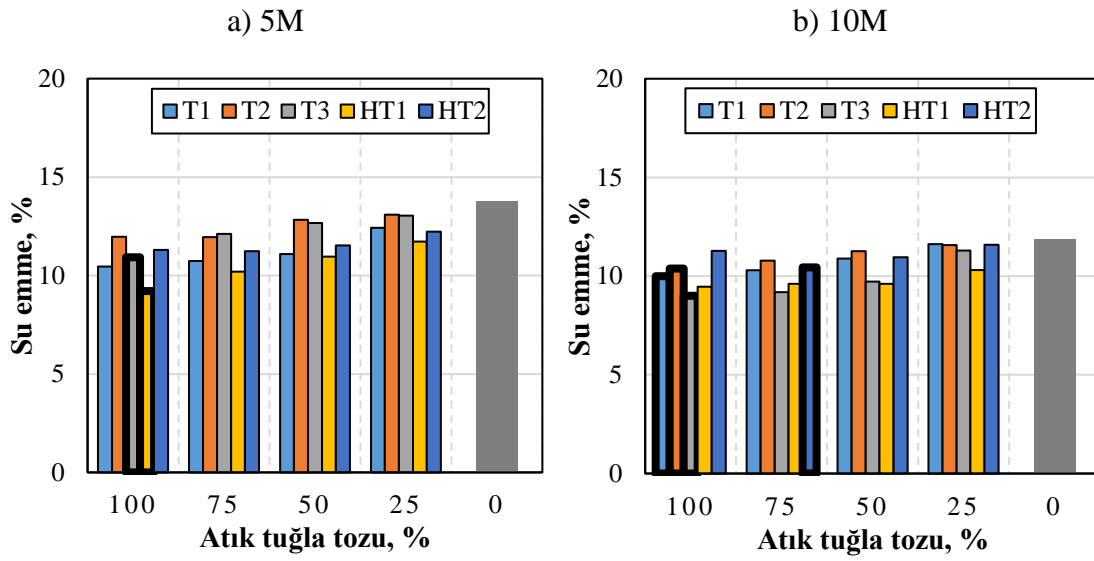
Şekil 4.3 Görünen porozite sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.

#### 4.4 Su Emme Deneyi Sonuçları

Su emme deneyi sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde ATT kullanım oranının azalması ile yani uçucu kül kullanım oranının artması ile birlikte su emme oranlarının arttığı sonucuna varılmıştır. Su emme deneyleri sonucunda, görünen porozite deneylerinden elde edilen değişimlere benzer değişimler elde edilmiştir. NaOH çözeltisinin 5M olarak kullanıldığı serilerden en düşük su emme oranı değerleri HT1 serilerinden elde edilmiştir. NaOH çözeltisinin 10M olarak kullanıldığı serilerden ise en düşük su emme oranı değerleri T3 ve HT1 serilerinden elde edilmiştir. Su emme oranı değerleri incelendiğinde molarite değerinin artışı ile birlikte su emme oranı değerlerinde azalışların olduğu görülmüştür.

NaOH çözeltisinin 5 M ve ATT'nin %100 oranında kullanılması durumunda; T1, T2, T3, HT1 ve HT2 serilerinin ortalaması alınarak elde edilen su emme oranı değeri %10.77 olarak belirlenmiştir. ATT'nin %75, 50, 25 ve 0 oranlarında kullanılması durumunda ise ortalama su emme oranı değerleri sırasıyla %11.25, 11.82, 12.50 ve 13.80 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere ATT kullanım oranlarının azalması ile birlikte su emme oranları artmıştır.

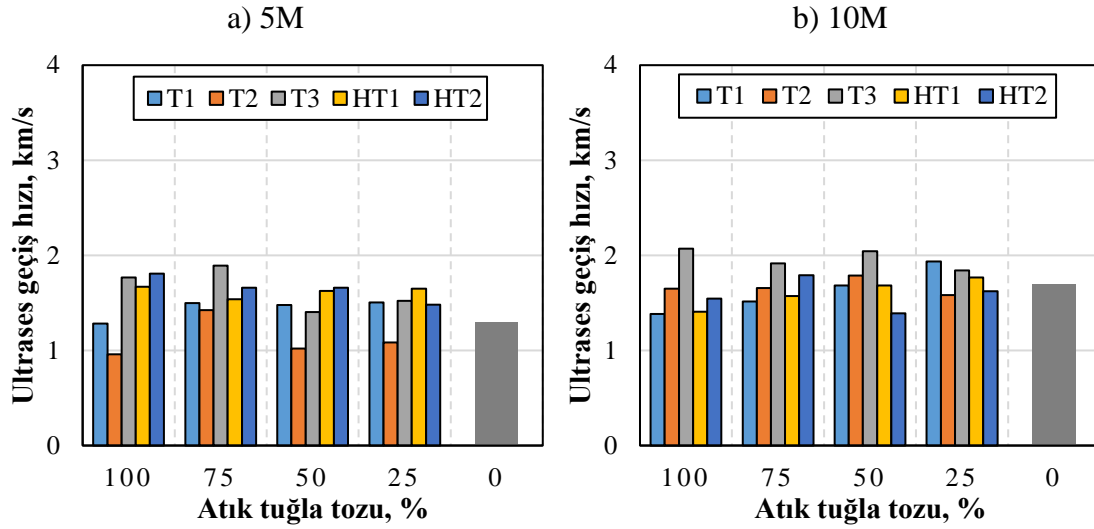
NaOH çözeltisinin 10M ve ATT'nin %100 oranında kullanılması durumunda ise; ortalama su emme oranı değeri %10.02 olarak elde edilmiştir. ATT kullanım oranlarının %75, 50, 25 ve 0 olması durumunda ise ortalama su emme oranları sırasıyla %10.07, 10.49, 11.28 ve 11.90 olarak bulunmuştur. 10M olan serilerde de 5M olan serilerde olduğu gibi ATT kullanım oranlarının azalması ile su emme oranlarında artışların olduğu sonucuna varılmıştır. 5 ve 10M olan serilerden elde edilen su emme oranı değerleri karşılaştırıldığında da 10M olan serilerden daha düşük değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.4 Su emme oranı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.

#### 4.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

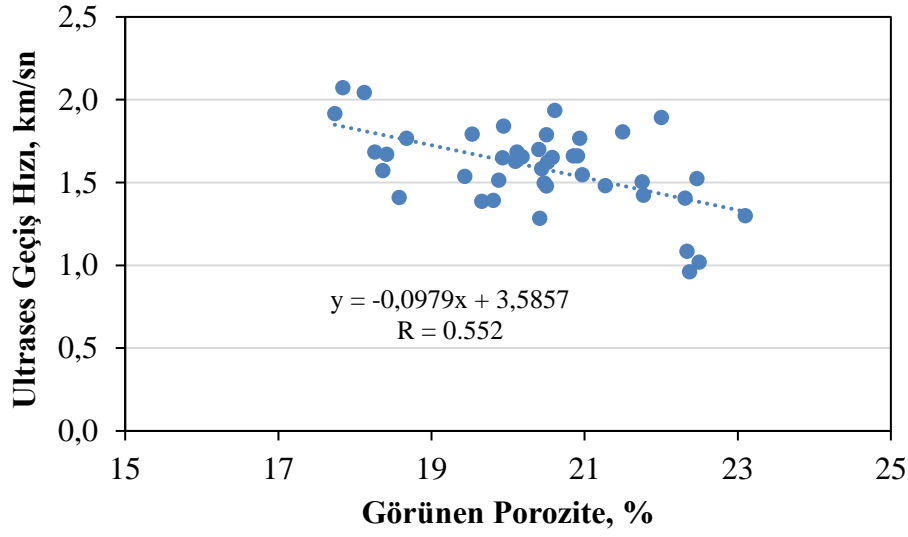
Ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde NaOH çözeltisinin 5M olarak kullanıldığı tüm serilerde en düşük ultrases geçiş hızı değerleri T2 serilerinden elde edilmiştir. Ultrases geçiş hızı değerlerinin çok değişken olduğu görülmüştür. ATT kullanım oranının azalması ile ultrases geçiş hızı değerleri bazı serilerde artarken bazı serilerde ise azalmıştır. NaOH çözeltisinin 5M olarak kullanıldığı serilerde ultrases geçiş hızı değerleri 1.0 ve 1.9 km/sn değerleri arasında değişirken, 10M olan serilerde ise 1.4 ve 2.1 km/sn değerleri arasında değişmiştir.



**Şekil 4.5** Ultrases geçiş hızı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.

Molaritenin artışı ile birlikte ultrases geçiş hızı değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır. NaOH çözeltisinin 5M ve ATT'nin %100 oranında kullanıldığı T3 serilerinden elde edilen ultrases geçiş hızı değeri 1.8 km/sn iken, kullanılan çözeltinin 10M olması durumunda ultrases geçiş hızı değeri 2.1 km/sn olarak bulunmuştur.

Ultrases geçiş hızı ile görünen porozite sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.6'da gösterilmiştir. 5 ve 10M'lık seriler ayrılmadan tüm seriler kullanılarak Şekil 4.6 oluşturulmuştur. Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere görünen porozite değerlerinin artışı ile birlikte ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. Sonuç olarak porozitesi yüksek yani daha boşluklu bir yapıya sahip olan serilerden daha düşük ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir.



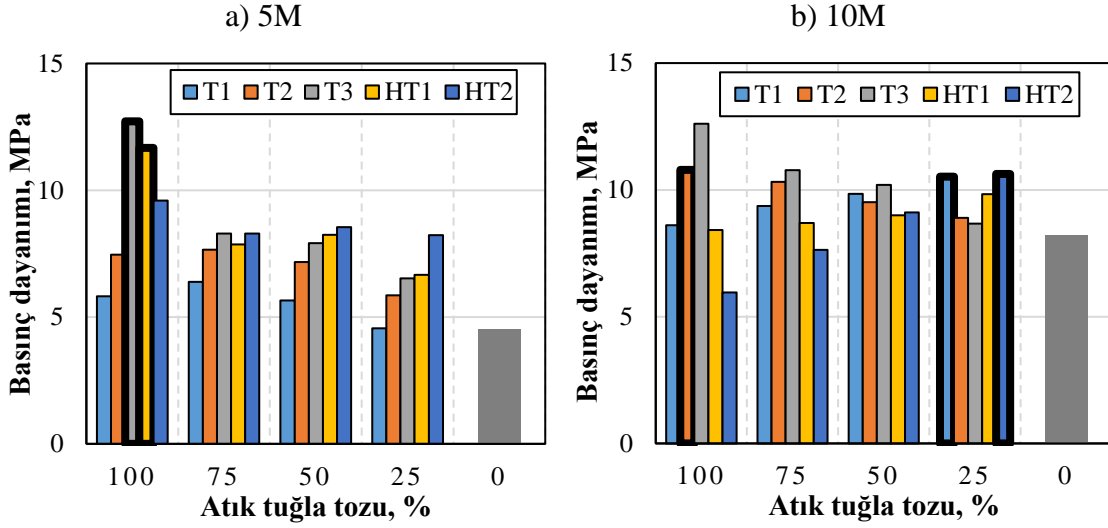
Şekil 4.6 Ultrases geçiş hızı ile görünen porozite sonuçları arasındaki ilişki.

#### 4.6 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

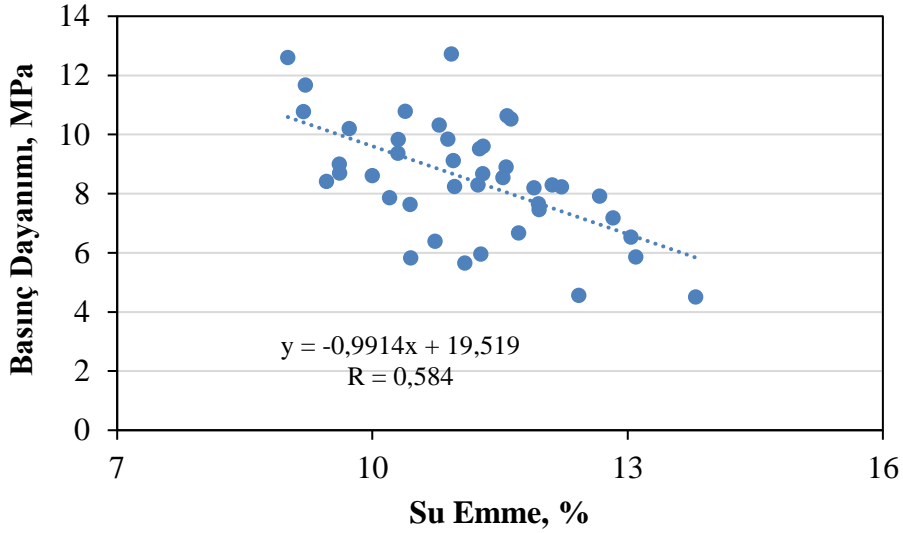
Basınç dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Şekil 4.7’de NaOH çözeltilisinin 5M olduğu seriler incelendiğinde, ATT’nin %100 oranında kullanıldığı serilerden genel olarak daha yüksek basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. ATT kullanım oranının azalması ile birlikte genel olarak basınç dayanımı sonuçlarının azaldığı görülmüştür. ATT’nin %100 oranında kullanıldığı serilerden elde edilen ortalama basınç dayanımı değeri 9.45 MPa olarak bulunurken, ATT’nin %75, 50, 25 ve 0 oranlarında kullanılması ile sırasıyla ortalama basınç dayanımları 7.70, 7.51, 6.37, 4.50 MPa olarak bulunmuştur. Uçucu kül kullanım oranlarının artması ile oluşan basınç dayanımlarındaki azalmaların sebebi olarak, uçucu küllerin bağlanması için kullanılan 5M’lık çözeltilinin yeterli olmadığı düşünülmektedir.

NaOH çözeltilisinin 10M olarak kullanıldığı seriler incelendiğinde en yüksek basınç dayanımları ATT’nin %100 oranında kullanıldığı T3 (12.6 MPa) serilerinden elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımları ise yine ATT’nin %100 oranında kullanıldığı HT2 (6 MPa) serilerinden elde edilmiştir. T1, HT1 ve HT2 serilerinde ATT kullanım oranlarının azalması ile birlikte genel olarak basınç dayanımlarında artışların olduğu görülmüştür. T2 ve T3 serilerinde ise basınç dayanımı değerlerinde azalmalar olmuştur.

10M olan serilerde ATT'nin %100, 75, 50, 25 ve 0 oranlarında kullanılması ile sırasıyla ortalama basınç dayanımları 9.27, 9.36, 9.53, 9.71 ve 8.20 MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen ortalama basınç dayanımı değerlerinden de görüldüğü üzere 10M olan serilerden 5M olan serilere göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. NaOH çözeltisinin 10M olarak kullanılması ile uçucu kül daha iyi aktive olmuş ve basınç dayanımları artmıştır.



Şekil 4.7 Basınç dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.

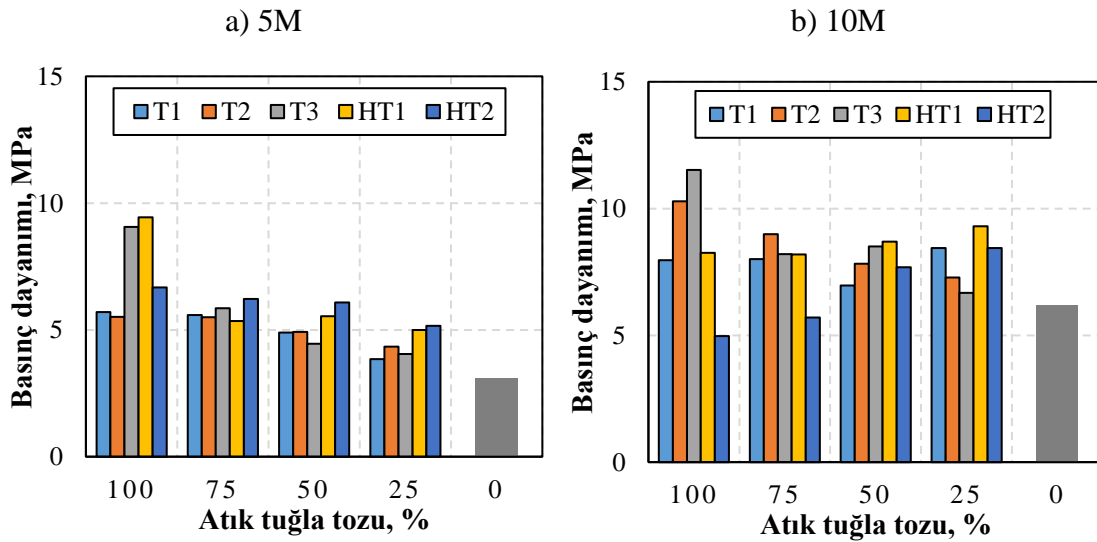


Şekil 4.8 Basınç dayanımı ile su emme sonuçları arasındaki ilişki.

Basınç dayanımı ile su emme sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.8’de gösterilmiştir. 5 ve 10M’lık serilerden elde edilen tüm sonuçlar kullanılarak Şekil 4.8 oluşturulmuştur. Şekil 4.8’den görüldüğü üzere su emme değerlerinin artışı ile birlikte basınç dayanımı değerlerinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Su emme değeri yüksek olan serilerin daha fazla boşluklu olmasından dolayı, basınç dayanımı değerleri daha düşük olarak elde edilmiştir.

#### 4.7 Yüksek Sıcaklık Deneyi Sonuçları

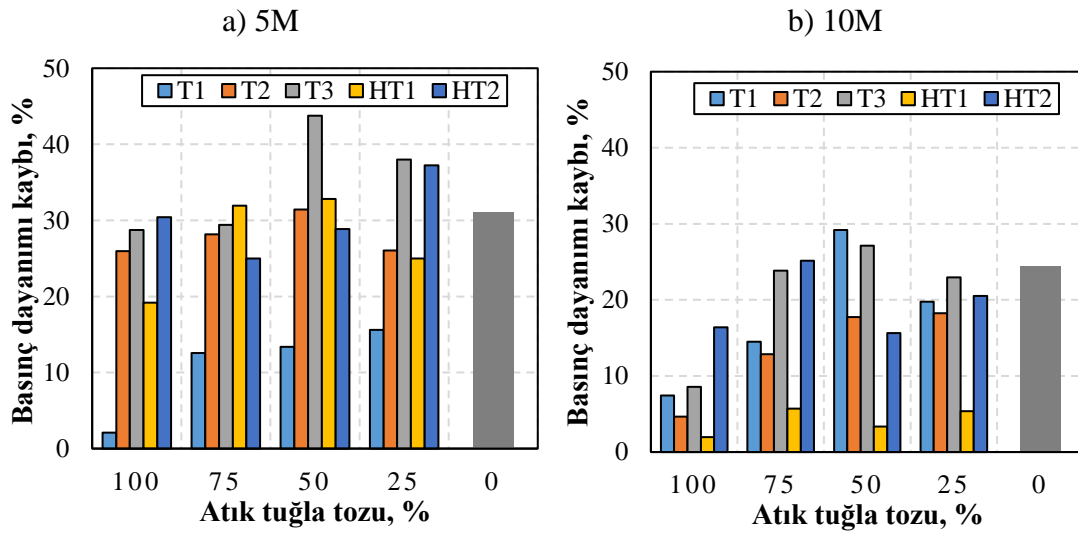
Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi Şekil 4.9’da verilmiştir. Yüksek sıcaklığa (800 °C) maruz bırakılan geopolimer serilerinin basınç dayanımlarının azaldığı sonucuna varılmıştır. NaOH çözeltisinin 5M olarak kullanıldığı seriler incelendiğinde, yüksek sıcaklık sonrasında en yüksek basınç dayanımı sonuçları ATT’nin %100 oranında kullanıldığı T3 ve HT1 serilerinden elde edilmiştir. NaOH çözeltisinin 10M olarak kullanıldığı serilerde ise, en yüksek basınç dayanımı değeri ATT’nin %100 oranında kullanıldığı T3 serilerinden 11.5 MPa olarak elde edilmiştir. NaOH çözeltisinin 5 ve 10M olmasına durumuna göre yüksek sıcaklık sonrasında elde edilen basınç dayanımları karşılaştırıldığında 10M olan serilerden genel olarak daha yüksek basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.9 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.



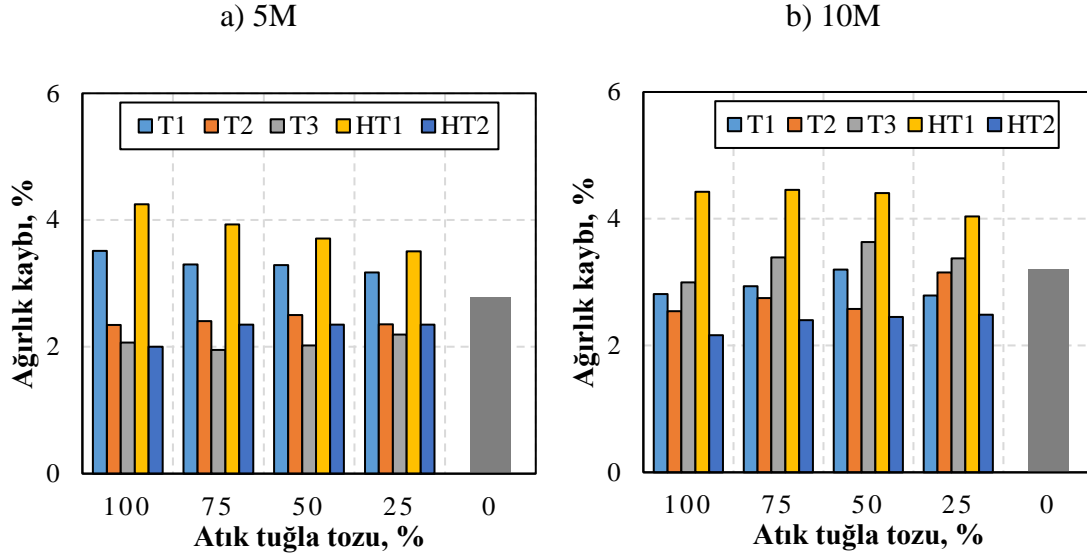
Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kayıplarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde NaOH çözeltisinin 5M olarak kullanıldığı serilerde en düşük basınç dayanımı kayıpları ATT'nin %100 oranında kullanıldığı T1 serilerinden elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı kayıpları ise ATT'nin %50 oranında kullanıldığı T3 serilerinden elde edilmiştir. Diğer serilerdeki basınç dayanımı kayıpları %12 ile 38 oranları arasında değişmiştir. NaOH çözeltisinin 10M olarak kullanıldığı seriler incelendiğinde ise en düşük basınç dayanımı kayıpları tüm ATT kullanım oranları için HT1 serilerinden elde edilirken, en yüksek basınç dayanımı kayıpları ise ATT'nin %50 oranında kullanıldığı T1 ve T3 serilerinden elde edilmiştir. NaOH çözeltisinin 5 ve 10M olduğu seriler karşılaştırıldığında ise 10M olan serilerden daha düşük basınç dayanımı kayıplarının elde edildiği görülmüştür. NaOH çözeltisinin 10M olarak kullanıldığı serilerin yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.10 Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kayıplarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.

Yüksek sıcaklık sonrası numunelerde oluşan ağırlık kayıplarının atık tuğla tozu kullanım oranına göre değişimi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Şekil 4.11'den görüldüğü üzere NaOH çözeltisinin 5 M olarak kullanılması durumunda tüm serilerden elde edilen ağırlık kaybı değerlerinin % 1.95 ile 4.25 arasında değiştiği sonucuna varılmıştır. NaOH çözeltisinin 10M olarak kullanıldığı tüm serilerden elde edilen ağırlık kaybı değerleri ise % 2.16 ile 4.46 değerleri arasında değişmiştir. 5M olan seriler incelendiğinde, tüm seriler için en

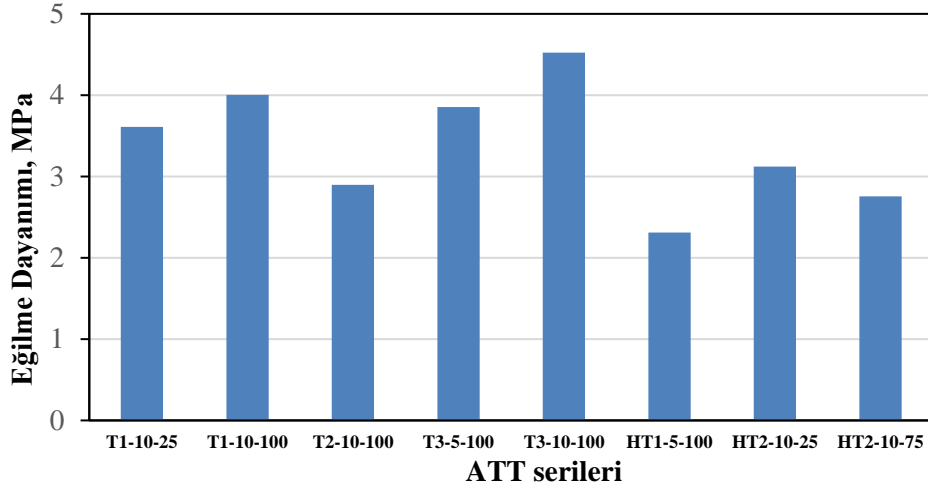
yüksek ağırlık kaybı değerleri genel olarak T1 ve HT1 serilerinden elde edilirken 10M olan serilerde oluşan en yüksek ağırlık kaybı değerleri ise T3 ve HT1 serilerinden elde edilmiştir.



Şekil 4.11 Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kayıplarının atık tuğla tozu oranına göre değişimi a) 5M b) 10M.

#### 4.8 Eğilme Deneyi Sonuçları

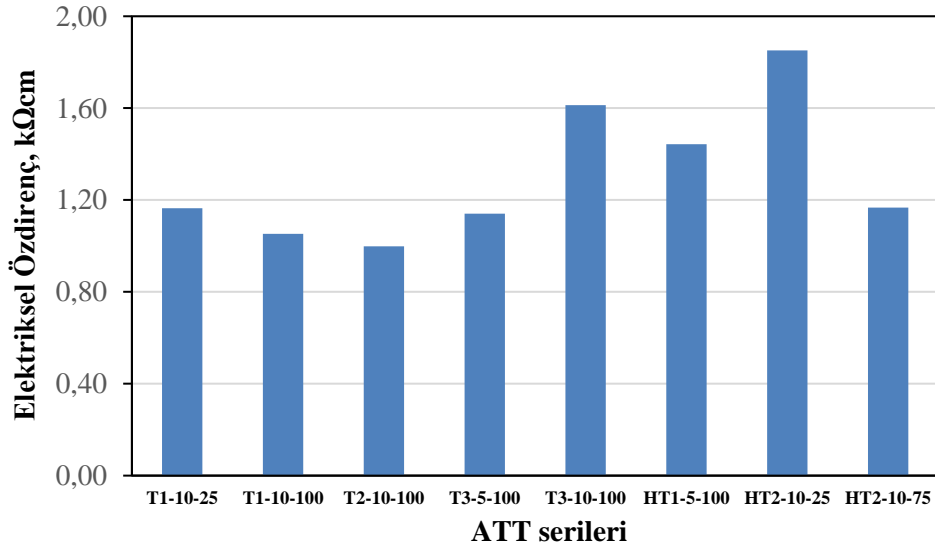
Eğilme dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu serilerine göre değişimi Şekil 4.12’de gösterilmiştir. Yüksek basınç dayanımlarına göre seçilen seriler üzerinde gerçekleştirilen eğilme deneylerinden elde edilen sonuçlar, basınç dayanımı değerleri ile benzerlik göstermektedir. Şekil 4.12 incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımı değerleri T3-10-100 serilerinden elde edilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçları 2.31 ile 4.52 MPa arasında değişmektedir. En düşük eğilme dayanımları HT1-5-100 serilerinden elde edilmiştir.



Şekil 4.12 Eğilme dayanımı sonuçlarının atık tuğla tozu serilerine göre değişimi.

#### 4.8 Elektriksel Özdirenç Deneyi Sonuçları

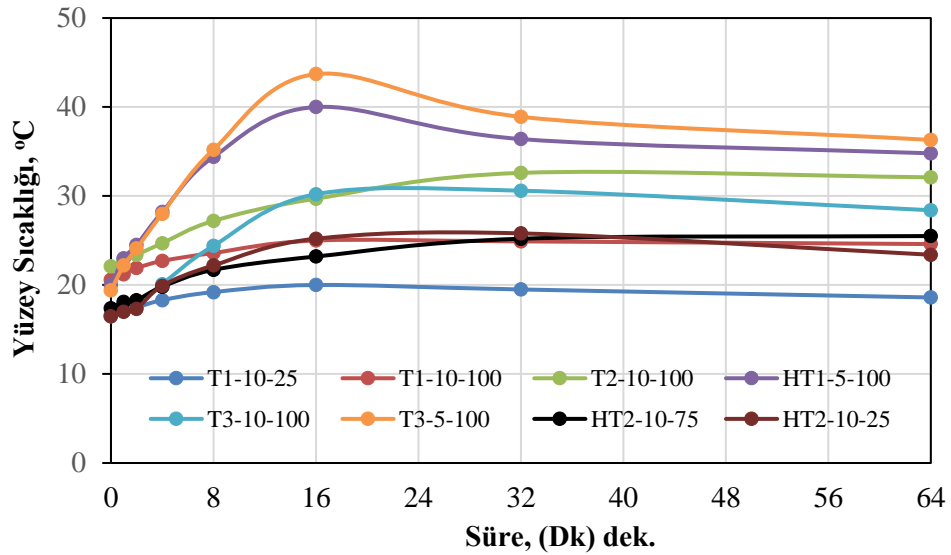
Elektriksel özdirenç sonuçlarının atık tuğla tozu serilerine göre değişimi Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Şekil 4.13 incelendiğinde elektriksel özdirenç sonuçları tüm serilerde 1.00 kΩcm üzerinde olduğu görülmüştür. En yüksek elektriksel özdirenç 1.85 kΩcm değerleri ile HT2-10-75 serilerinden elde edilmiştir. En düşük elektriksel özdirenç sonuçları T2-10-100 serilerinden elde edilmiştir. Elde edilen elektriksel özdirenç sonuçlarından geopolimer harçlarının oldukça iletken olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.13 Elektriksel özdirenç sonuçlarının atık tuğla tozu serilerine göre değişimi.

#### 4.9 Yüzey Sıcaklığı Sonuçları

Geopolimer harçların yüksek iletkenlik değerlerine sahip olması nedeniyle DC güç kaynağı ile elektrik verilen numunelerin yüzey sıcaklıklarındaki değişimler de incelenmiştir. Yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.14’de gösterilmiştir. En yüksek yüzey sıcaklıkları seçilen bu seriler arasında 5M olan örneklerde görülmüştür. Elektriksel özdirenci 1.14 k $\Omega$ cm olan T3-5-100 serilerinde en yüksek sıcaklık gözlenmiştir. Bu serilerde 16 dakika sonra yüzey sıcaklıkları 43.7 °C’ye çıkmıştır. En düşük yüzey sıcaklığı değerleri T1-10-25 serilerinden elde edilmiştir. Bu serilerden elde edilen sıcaklıklar 20 °C civarında değişmiştir. Pik sıcaklık değerlerinin gözlemlendiği 16. dk ele alındığından 5M’lık seriler 40 °C üzerinde iken 10M’lık seriler 30°C altında yüzey sıcaklıkları sergilemiştir.



Şekil 4.14 Yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değişimi.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Farklı atık tuğla tozları ve farklı molaritelerde üretilen geopolimer harçlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi ile ilgili yapılan bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler haline verilmiştir.

- Atık tuğla tozu kullanım oranlarının azalışı ile birlikte geopolimer serilerinin birim hacim ağırlıklarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Molarite değerinin artışı ile birlikte birim hacim ağırlık değerlerinde genel olarak artışların olduğu sonucuna varılmıştır.
- Atık tuğla tozu kullanım oranlarının azalışı ile birlikte geopolimer serilerinin görünür yoğunluklarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Molarite değerinin artışı ile bazı serilerde görünür yoğunluk değerlerinde artışlar gerçekleşirken bazı serilerde ise azalmalar gerçekleşmiştir. En yüksek görünür yoğunluk değerleri her iki molarite değerinde de T1 serilerinden elde edilmiştir.
- Atık tuğla tozu kullanım oranlarının azalması ile birlikte genel olarak görünen porozite değerlerinde artışların olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca molarite değerinin artışı ile birlikte görünen porozite değerlerinin azaldığı sonucuna varılmıştır.
- ATT kullanım oranının azalması ile yani uçucu kül kullanım oranının artması ile birlikte su emme oranlarının arttığı sonucuna varılmıştır. Su emme deneyleri sonucunda, görünen porozite deneylerinden elde edilen değişimlere benzer değişimler elde edilmiştir.
- ATT kullanım oranının azalması ile ultrases geçiş hızı değerleri bazı serilerde artarken bazı serilerde ise azalmıştır. Molaritenin artışı ile birlikte ultrases geçiş hızı değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır.

- NaOH çözeltisinin 5M olduğu seriler incelendiğinde, ATT'nin %100 oranında kullanıldığı serilerden genel olarak daha yüksek basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir. ATT kullanım oranının azalması ile birlikte genel olarak basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür.
- NaOH çözeltisinin 5 ve 10M olması durumuna göre yüksek sıcaklık sonrasında elde edilen basınç dayanımları karşılaştırıldığında 10M olan serilerden genel olarak daha yüksek basınç dayanımı sonuçları elde edilmiştir.
- Elektriksel özdirenç sonuçları tüm serilerde 1.00-1.85 kΩcm arasında gerçekleşmiştir. Elde edilen bu elektriksel özdirenç sonuçlarına göre geopolimer harçlarının oldukça iletken olduğu sonucuna varılmıştır.
- En yüksek yüzey sıcaklıkları 5M olan örneklerde görülmüştür. Pik sıcaklık değerlerinin gözlemlendiği 16. dk ele alındığından 5M'lık seriler 40 °C üzerinde iken 10M'lık seriler 30°C altında yüzey sıcaklıkları sergilediği sonucuna varılmıştır.
- En yüksek basınç ve eğilme dayanımı T3 tuğla tozunun %100 kullanıldığı 10M'lık örneklerden elde edilmiştir.

Elde edilen tüm fiziksel ve mekanik sonuçların ışığında Afyonkarahisar bölgesinde üretilen tuğla atıklarının tozları geopolimer harç üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir. Renk, doku ve mekanik özellikleri ile bu geopolimer harçların tuğlaya alternatif yapı bloğu olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Tüm tuğla tozu serilerinin ve oranlarının bu şartı sağlamasına karşın en iyi olarak T3 tuğla atığı tozunun, 10M NaOH çözeltisinin ve %100 tuğla tozu oranının kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- Ahmari S, 2012, Recycling and Reuse of Wastes As Construction Material Through Geopolymerization, The University of Arizona, Faculty of the Department of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Ph.D. Thesis, 224p, Arizona.
- Ahmed M F, Khalil W I, Frayyeh Q J, 2020, Thermal Insulation Enhancement of Metakaolin-Based Geopolymer Concrete Using Waste Clay Brick, IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, 842, 1–6.
- Aleem M I A, Arumairaj P D, 2011, Geopolymer Concrete - A Review, International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, 1, 118–122.
- Boğa A R, 2017, Harçların Mekanik ve Elektriksel İletkenlik Özelliklerine Karbon Lifi ve Çelikhane Cürufu Kullanımının Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17, 1066-1075.
- Cheng H, 2016, Reuse Research Progress on Waste Clay Brick, Procedia Environmental Sciences, 31, 218–226.
- Chowdhury S, Mohapatra S, Gaur A, Dwivedi G, Soni A, 2020, Study of Various Properties of Geopolymer Concrete – A Review, Materials Today, Proceedings, 46, 5687–5695.
- Cong P ve Cheng Y, 2021, Advances In Geopolymer Materials, A Comprehensive Review, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 8, 283–314.
- Dange S P ve Suryawanshi S R, 2017, Behaviour of Geopolymer Concrete, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 6, 14326–14330.
- Davidovits J, 2008, Geopolymer Chemistry and Applications, Institut Géopolymère, 585p, France.
- Davidovits J, 1989, Geopolymers and geopolymeric materials, Journal of Thermal Analysis, 35, 429–441.

- Dhake V S, Badhe T A, Bhoge R S, 2017, Experimental Investigation on Eco-Friendly Sustainable geopolymer Bricks, *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 5, 244–251.
- Drive C P, 2006, Manufacturing of Brick. *Technical Notes on Brick Construction*, December, 1–7.
- Elango S, Selvakumar K, Indhu S, 2019, Experimental Investigation on Utilization of Waste Materials In Fly Ash Brick, *International Journal of Intellectual Advancements and Research in Engineering Computations*, 7, 3043–3057.
- Faria K C. P, Fontes Vieira C M, Dias D P, Fagundes M Y S, Ferreira W M, 2019, Technological Properties of Brick Waste-Based Geopolymer, *Minerals, Metals and Materials Series*, 275–281.
- Fořt J, Novotný R, Vejmelková E, Trník A, Rovnaníková P, Keppert M, Pommer V, Černý R, 2019, Characterization of Geopolymers Prepared Using Powdered Brick, *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 6253–6261.
- Fu Q, Xu W, Zhao X, Bu M X, Yuan Q, Niu D, 2021, The Microstructure And Durability of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, A Review, *Ceramics International*, 47, 1–17.
- Gado R A, Hebda M, And M Ł, Mikuła J, 2020, Alkali Activation of Waste Clay Bricks Influence of The Silica Modulus,  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  Molar Ratio, and Liquid/solid Ratio, *Institute of Materials Engineering*, 1–26.
- Ganesh C, Muthukannan M, Aakassh S, Prasad, Subramanaian B, 2020, Energy Efficient Production of Geopolymer Bricks Using Industrial Waste, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 872, 1–8.
- He Z, Shen A, Wu H, Wang W, Wang L, Yao C, Wu, J, 2021, Research Progress on Recycled Clay Brick Waste As An Alternative To Cement For Sustainable Construction Materials, *Construction and Building Materials*, 274, 1–13.
- Iftikhar S, Rashid K, Ul Haq E, Zafar I, Alqahtani F K, Iqbal Khan M, 2020, Synthesis And Characterization of Sustainable Geopolymer Green Clay Bricks An Alternative To Burnt Clay Brick, *Construction and Building Materials*, 259, 1–10.



- Jeevanandan K, Sreevidya V, 2019, Experimental Investigation on Concrete and Geopolymer Concrete, *Materials Today: Proceedings*, 21, 307–312.
- Jia D, He P, Wang M, Yan S, 2020, Geopolymer and Geopolymer Matrix Composites, *Springer Series in Materials Science* 311, 310p, Springer.
- Khater H M, Ezzat M, El Nagar A M, 2016, Engineering of Low Cost Geopolymer Building Bricks Applied For Various Construction Purposes, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7, 81–99.
- Koleżyński A, Król M, Żychowicz M, 2018, The Structure of Geopolymers - Theoretical Studies, *Journal of Molecular Structure*, 1163, 465–471.
- Kumar N, Kumar C S, Babu M H, Rakesh K, Priyanka B, Priyanka G, 2019, A Study on Mechanical Properties of Geopolymer Concrete, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 6, 7022–7026.
- Letelier V, Ortega J M, Muñoz P, Tarela E, Moriconi G, 2018, Influence of Waste Brick Powder In The Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete, *Sustainability (Switzerland)*, 10, 1–16.
- Migunthanna J, Rajeev P, Sanjayan J, 2021, Investigation of Waste Clay Crick As Partial Replacement of Geopolymer Binders For Rigid Pavement Application, *Construction and Building Materials*, 305, 1–12.
- Mohajerani A, Suter D, Jeffrey-Bailey T, Song T, Arulrajah A, Horpibulsuk S, Law D, 2019, Recycling Waste Materials In Geopolymer Concrete, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 493–515.
- Naceri A, Hamina M C, 2009, Use of Waste Brick As A Partial Replacement of Cement In Mortar, *Waste Management*, 29, 2378–2384.
- Nawaz M, Heitor A, Sivakumar M, 2020, Geopolymers In Construction - Recent Developments, *Construction and Building Materials*, 260, 120472.
- Neupane K, 2016, Fly Ash And GGBFS Based Powder-Activated Geopolymer Binders: A Viable Sustainable Alternative of Portland Cement In Concrete Industry, *Mechanics of Materials*, 103, 110–122.

- Ngo S H, 2020, Evaluation of The Engineering Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Bricks, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 11, 43–51.
- Onkar W, Hake S L, 2018, Evaluate Properties of Fly Ash Based Geopolymer Bricks, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5, 286–296.
- Özçelikci E, 2020, Development of Geopolymer Concretes with Construction Demolition Waste, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 135s, Ankara.
- Pathak A, Jha V K, 2013, Comparative Study of The Geopolymers Synthesized From Various Types of Construction Wastes, *Nepal Journal of Science and Technology*, 14, 81–86.
- Riyap H I, Banenzoué C, Tchakouté H K, Nansu C N P, Rüscher C H, 2020, A Comparative Study of The Compressive Strengths And Microstructural Properties of Geopolymer Cements From Metakaolin and Waste Fired Brick As Aluminosilicate Sources, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 58, 236–247.
- Robayo R A, Mulford A, Munera J, Mejía de Gutiérrez R, 2016, Alternative Cements Based On Alkali-Activated Red Clay Brick Waste, *Construction and Building Materials*, 128, 163–169.
- Rovnaník P, Řezník B, Rovnaníková P, 2016, Blended Alkali-Activated Fly Ash / Brick Powder Materials, *Procedia Engineering*, 151, 108–113.
- Rovnaník P, Rovnaníková P, Vyšvařil M, Grzeszczyk S, Janowska Renkas E, 2018, Rheological Properties and Microstructure of Binary Waste Red Brick Powdermetakaolin Geopolymer, *Construction and Building Materials*, 188, 924–933.
- Singh N B, Middendorf B, 2019, Geopolymers as an Alternative to Portland Cement An Overview, *Construction and Building Materials*, 237, 1–15.
- Şinik O, 2019, Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerini araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Afyonkarahisar.

- Tebbal N, Rahmouni Z E A, 2019, Recycling of Brick Waste for Geopolymer Mortar Using Full Factorial Design Approach, The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 7, 44–47.
- Tuyan M, Andiç Çakir Ö, Ramyar K, 2018, Effect of Alkali Activator Concentration and Curing Condition on Strength And Microstructure of Waste Clay Brick Powder-Based Geopolymer, Composites Part B: Engineering, 135, 242–252.
- TS EN 196-1, 2016, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 12504-4, 2021, Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, TSE, Ankara
- Wong C L, Mo K H, Alengaram U J, Yap S P, 2020, Mechanical Strength and Permeation Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Containing Recycled Brick Powder, Journal of Building Engineering, 32, 1–11.
- Youssef N, Lafhaj Z, Chapiseau C, 2020, Economic Analysis of Geopolymer Brick Manufacturing: A French Case Study, Sustainability, 12, 1–12.
- Youssef N, Rabenantoandro A Z, Dakhli Z, Chapiseau C, Waendendries F, Chehade F H, Lafhaj Z, 2019, Reuse of Waste Bricks: A New Generation of Geopolymer Bricks, SN Applied Sciences, 1, 1–10.
- Youssef N, Rabenantoandro A Z, Dakhli Z, Chehade F H, Lafhaj Z, 2019, Environmental Evaluation of Geopolymer Bricks, MATEC Web of Conferences, 281, 1–5.
- Yuan J, Li L, He P, Chen Z, Lao C, Jia D, Zhou Y, 2021, Effects of Kinds of Alkali-Activated Ions on Geopolymerization Process of Geopolymer Cement Pastes, Construction and Building Materials, 293, 1–14.
- Zawrah M F, Gado R A, Feltin N, Ducourtieux S, Devoille L, 2016, Recycling and Utilization Assessment of Waste Firedclay Bricks (Grog) With Granulated Blast-Furnaceslag For Geopolymer Production, Process Safety and Environmental Protection, 103, 237–251.
- Zhang L, 2013, Production of bricks from waste materials - A review, Construction and Building Materials, 47, 643–655.

## **İnternet Kaynakları**

- 1- <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/tugla-kiremit> 10.12.2021

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sayeed Qudratullah HABIBI  
Doğum Yeri ve Tarihi : Faryab/Afghanistan, 26.09.1989  
Yabancı Dili : İngilizce, Üzbikçe, Farsça  
İletişim (Telefon / e-posta) : 05538093832, q.habibi98@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Faryab Hurasan Lisesi (2005 – 2007)  
Lisans : Kabil Politeknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği  
Bölümü, (2010– 2013)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.,  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, (2019 – 2022)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Ulusal ve Uluslararası Yabancı Kurum ACTED/Afghanistan  
(2013 – 2017)