

**T.C.**  
**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**  
**BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ SONUÇ RAPORU**

**PROJE ADI: Endüstriyel ve İnşaat Yıkıntı Atıklarının, Jeopolimer Harçların  
Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi**

**PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ:** Prof. Dr. Cenk KARAKURT

**PROJE NOSU:** 2021-02.BŞEÜ.03-02

**ARAŞTIRMACILAR:**

1-Öğr. Gör. Ahmet Ferdi ŞENOL

2-Arş. Gör. Nazım Çağatay DEMİRAL

**Proje Sözleşmesi BAŞLAMA TARİHİ:** 24.01.2022

**Proje Sözleşmesi BİTİŞ TARİHİ:** 23.01.2023

**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**  
**BİLECİK, 2023**

## Endüstriyel ve İnşaat Yıkıntı Atıklarının, Jeopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

### ÖZET

Günümüz beton teknolojisinde en çok kullanılan yapı malzemesi olan çimentonun, küresel çevre sorunlarına yol açtığı ve çevre dostu olarak kabul edilmediği değerlendirilmektedir. Son yıllarda gelişmekte olan ülkelerde, inşaat yıkıntı atığı (İYA) malzemelerinin ekonomiye kazandırılarak çevresel atık problemlerinin azaltılması ile ilgili çalışmalar önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, çeşitli atık malzemeler (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, mermer atığı ve İYA) ile alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kullanılarak üretilen jeopolimer harç serilerinin fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmanın belirlenen hedefe ulaşması için jeopolimer harçlar iki aşama şeklinde tasarlanmıştır. Birinci aşamada; endüstriyel atık ve İYA'lerden elde edilen bağlayıcıların kullanılmasıyla jeopolimer harç serileri üretilmiş, ikinci aşamada ise en yüksek mekanik dayanımlara ulaşan jeopolimer (yüksek fırın cürufu ve uçucu kül bağlayıcılı) harçlara, nehir kumu yerine kısmen atık mermer agregası (%25, 50 ve 75) ikame edilerek fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Üretilen tüm harç numunelerine yayılma tablası deneyleri uygulanmasını müteakip, 24 saat 60 ve 80 °C'lik ıslık kür uygulanarak 7 ve 28 günlük sürelerde ortam kürüne (20±2 °C) tabi tutulmuşlardır. Kür sonrasında, sertleşmiş harç numuneleri üzerinde fiziksel ve mekanik özellik deneyleri uygulanmıştır. Jeopolimer harçların mikro yapısını incelemek için 28 günlük sertleşmiş harç numunelerine SEM analizleri yapılmıştır. Elde edilen verilere göre, endüstriyel atık tozları ve atık pişmiş kil tozları ile jeopolimer harçların üretilebileceği, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu bağlayıcılı jeopolimer harçlarda, nehir kumu agregası yerine en fazla %25 oranına kadar atık mermer agregası kullanımının mekanik özellikleri iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Jeopolimer Harç, Tuğla Tozu, Mermer Tozu, Fiziksel Özellik, Mekanik Özellik

# **The Effect of Industrial and Construction Demolition Waste on the Physical and Mechanical Properties of Geopolymer Mortars**

## **ABSTRACT**

Cement which is the most used construction material in today's concrete technology, is considered to cause global environmental issues and is not considered environmentally friendly. In recent years, studies on reducing environmental waste problems by bringing construction demolition waste (CDW) materials into the economy have gained importance in developing countries. In this study, the physical and mechanical properties of geopolymer mortar series produced by using various waste materials (fly ash, blast furnace slag, marble waste and CDW) and sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) as alkali activators were investigated. For the study to reach the determined target, it was deemed appropriate to design the geopolymer in two stages. In the first stage, the mixture design of the geopolymer mortar samples was produced and the proportions of sodium hydroxide and sodium silicate to be used were decided after the trial mixtures. In the second stage, geopolymer mortars (with blast furnace slag and fly ash binder), which reached the highest mechanical strengths, were produced with partial replacement of waste marble aggregate (25, 50 and 75%) instead of river sand. After the flow table tests were applied to the produced mortar samples, thermal cure was applied at 60 and 80 °C for 24 hours and then they were subjected to ambient curing (20±2 °C) for 7 and 28 days. After curing, physical and mechanical properties tests were carried out on the hardened mortar samples. In order to examine the microstructure of geopolymer mortars, SEM analyses were performed on 28-day-hardened mortar samples. According to the obtained data, it has been determined that geopolymer mortars can be produced with industrial waste powders and waste baked clay powders. In addition, it was concluded that the use of waste marble aggregate up to 25% instead of river sand in fly ash and blast furnace slag binder geopolymer mortars improves mechanical properties.

**Keywords:** Geopolymer Mortar, Brick Powder, Marble Powder, Physical Property, Mechanical Property.

## İÇİNDEKİLER

<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	iv
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	v
<b>KISALTMALAR VE GÖSTERİMLER</b> .....	vi
1. Giriş .....	1
2. Amaç ve Kapsam .....	2
3. Malzemeler ve Yöntem.....	3
3.1 Malzemeler .....	3
3.2 Yöntem .....	5
4. Analiz ve Bulgular .....	10
4.1 İşlenebilirlik Deney Sonuçları.....	10
4.2 Birim Ağırlık Deney Sonuçları .....	12
4.3 Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları .....	13
4.4 Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları .....	14
4.5 Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	17
4.6 Görünen Porozite ve Su Emme Deney Sonuçları.....	19
4.7 İç Yapı Analizi .....	22
5. Sonuçlar ve Öneriler .....	24
6. Kaynaklar.....	26

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. a) Çatı kiremiti (ÇK), b) Delikli tuğla (DT), c) Harman tuğlası (HT) d) Mermer atığı tozu (M).....	3
Şekil 2. Bağlayıcı malzemelerin tanecik boyut analizi sonuçları. ....	4
Şekil 3. Atık mermer agregası.....	4
Şekil 4. Agreganın granülometri eğrisi. ....	5
Şekil 5. Çalışmanın akış şeması. ....	6
Şekil 6. Jeopolimer harç serilerinin mikserde hazırlanması.....	7
Şekil 7. Üretilen jeopolimer harçların kür işlemleri.....	8
Şekil 8. Mekanik özellik deneyleri.....	9
Şekil 9. Yayılma çaplarının nehir agregalı jeopolimer harç serilerine göre değişimi.....	11
Şekil 10. Atık mermer agregalı jeopolimer harçların, yayılma çaplarının harç serilerine göre değişimi.....	12
Şekil 11. Jeopolimer harçların birim hacim ağırlıklarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.....	13
Şekil 12. Jeopolimer harçların ultrases geçiş hızlarının kür sıcaklıkları ve zamana göre değişimi.....	14
Şekil 13. Jeopolimer harçların eğilme dayanımlarının kür sıcaklıkları ve zamana göre değişimi.....	15
Şekil 14. Atık mermer agregalı jeopolimer harçların, eğilme dayanımlarının kür sıcaklıklarına göre değişimi.....	16
Şekil 15. Jeopolimer harçların basınç dayanımlarının kür sıcaklıkları ve zamana göre değişimi.....	17
Şekil 16. Atık mermer agregalı jeopolimer harçların basınç dayanımlarının kür sıcaklıklarına göre değişimi.....	19
Şekil 17. Jeopolimer harç serilerinin görünen porozite değerlerinin kür sıcaklıklarına göre değişimi.....	20
Şekil 18. Jeopolimer harç serilerinin su emme değerlerinin kür sıcaklıklarına göre değişimi.....	20
Şekil 19. Jeopolimer harç serilerinin görünen porozite ve su emme değerleri arasındaki ilişki.....	21
Şekil 20. S100'ün iç yapısı a) 60 °C ıslıkürü, b) 80 °C ıslıkürü. ....	22
Şekil 21. F100'ün iç yapısı a) 60 °C ıslıkürü, b) 80 °C ıslıkürü. ....	23
Şekil 22. M100'ün iç yapısı a) 60 °C ıslıkürü, b) 80 °C ıslıkürü. ....	24

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 1. ÇK, DT, HT ve M'nin kimyasal özellikleri.....	5
Tablo 2. Jeopolimer harç serileri.....	7
Tablo 3. Atık mermer agregalı jeopolimer harç serileri.....	10

## KISALTMALAR VE GÖSTERİMLER

(İYA)	İnşaat Yıkıntı Atığı
(NaOH)	Sodyum Hidroksit
(Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	Sodyum Silikat
(YFC)	Yüksek Fırın Cürufu
(Ca(OH) <sub>2</sub> )	Kalsiyum Hidroksit
(HT)	Harman Tuğlası
(DT)	Delikli Tuğla
(ÇK)	Çatı Kiremiti
(M)	Mermer Atıkları
(F)	Tipi Uçucu Kül
(S)	Yüksek Fırın Cürufu
(MA)	Atık Mermer Agregası
(K)	Atık Pişmiş Kil
µm	Mikrometre
gr	Gram

## 1. Giriş

Günümüz beton teknolojisinde en çok kullanılan yapı malzemesi olan çimentonun, başlıca küresel sorunlara yol açtığı bilinmektedir. Bu sorunların ortadan kaldırılması veya en az seviyeye indirilmesi amacıyla beton teknolojisinde çimento kullanımını azaltma yollarına gidilmelidir. Bu maksatla, çimento yerine alternatif bağlayıcı malzemelerin kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Dünya çapında üretilen CO<sub>2</sub>'nin yaklaşık %7'sinden, çimento endüstrisinin tek başına sorumlu olduğu tahmin edilmektedir (C.Meyer, 2009). Günümüzde jeopolimer bağlayıcılar, çimento ve kireç bazlı harçların kısmen veya tamamen ikame edilmesi için umut verici bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Jeopolimerler, alkali çözeltiler ile alümina-silikat içeren malzemeler kullanılarak üretilen inorganik polimerlerdir (Zawrah, M. F. vd. 2022). Üretimlerinde hammadde olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin, alkali aktivatör olarak ise sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) yaygın olarak kullanılmaktadır (Podolsky, Z. vd. 2021).

Günümüze kadar yapılan birçok çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; jeopolimer harç ve betonlarda görülen işlenebilirlik kaybı, hızlı priz süresi ve ısıl kür ihtiyacı, bu yapıların dezavantajları olarak bilinmektedir (Khalil, M. G vd. 2020). Isı ile kürlenme ve alkali aktivatörlerin kombinasyonu, yüksek dayanım ve dayanıklılıkta bir polimer yapısı oluşturmak için alüminosilikat kaynağının polimerizasyon reaksiyonunu tetiklemektedir. Uçucu kül bazlı jeopolimerler, ısıyla kürlendiğinde ortam sıcaklık küründen daha yüksek basınç dayanımı göstermekte (Chithambaram, S. J. vd. 2019) ve ortam sıcaklığı kürlenme koşullarında daha iyi dayanım elde etmek için cüruf ilavesinin artırılmasını gerektirmektedir (Katpady, D. N vd. 2020). Alüminosilikatlar arasında olan yüksek fırın cürufu, endüstriyel atık olması ve yaygın olarak bulunması nedeniyle, yapılan çalışmalarda önemli bir jeopolimer kaynağı olarak kabul edilmektedir. Yüksek fırın cürufu (YFC), metalurji endüstrisinin atık ürünü olup, yüksek fırında erimiş demirden ayrılan, metalik olmayan, hızla soğutulmuş bir alüminosilikat malzemedir (El Didamony, H. vd. 2019). Al-Majidi vd. (2016), ortam sıcaklığında ve 24 saat boyunca 60 °C'de ısıyla kürlenmiş uçucu kül ve YFC kombinasyonu ile hazırlanan jeopolimer harç karışımlarının, mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerine kapsamlı bir deneysel araştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, uçucu külün YFC ile %50 oranına kadar kısmen yer

değiştirilmesiyle ısı k rleme işleminden kaınılabileceğini, oda sıcaklığında kürlenen numunelerin 28 günlük basınç dayanımının, ısıyla kürlenen numunelerin sonuçlarına çok yakın olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, jeopolimer harç serilerinin eğilme ve çekme dayanımlarının, YFC içeriği arttıkça önemli ölçüde iyileştiğini tespit etmişlerdir.

Türkiye'nin maden endüstrisindeki en yüksek ihracat oranına sahip doğal kaynaklarından biri de mermerdir. Mermerlerin, madencilik ve işleme aşamalarında iken yaklaşık %70'i atık olarak ortaya çıkmaktadır (Hebhoub vd., 2011). Bu atıklar, genellikle mermer çamuru ile kırık mermer parçalarından oluşarak çevresel sorunlara neden olabilmektedirler. Bu sorunları gidermek amacıyla, araştırmacılar tarafından atık mermer tozlarının beton ve harç üretimlerinde kullanılabilirliği üzerine birçok alışma (Li vd., 2019; Gencel vd., 2014; Aliabdo vd., 2014) yapılmıştır. Ancak, atık mermer tozlarının jeopolimer harçların üretiminde bileşen olarak kullanıldığı çalışma sayısı çok azdır. Tekin (Tekin, 2016), mermer, traverten ve volkanik t f atıklarını, 200  m'nin altındaki boyutlarda öğüterek NaOH çözeltileri ile aktive ederek jeopolimer harç üretmiştir. Jeopolimer harçlarda 24 saatlik 45 C'de etüv k r n n en uygun olduğunu, 75 C'lik ısı k r sonucunda jeopolimer harçların çatladığını tespit etmiştir. Ayrıca, ıslak k rde jeopolimer harçların basınç dayanımları zamanla azalırken, kuru k rde zamanla arttığı sonucuna ulaşmıştır. Coppola vd. (2020), atık mermer çamurunun farklı k rleme koşulları (kuru, nemli ve ıslak atmosferler) ve karışım eşitleri (%2,5 ve 5 atık cam tozu ilaveli) etkisinde, alkali aktivasyona uğrama potansiyelini araştırmışlardır. Üretilen numuneler, 60 C'de 24 saat k r edildikten sonra oda sıcaklığında hava, nem ve suda küre tabi tutulmuşlardır. K r sonunda, havayla k rlemenin en uygun k rleme koşulu olduğunu ve 38 ile 45 MPa arasında basınç dayanımlarına ulaştıklarını bildirmişlerdir. Ayrıca, cam tozu ilavesinin mekanik özellikleri iyileştirdiğini, Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girebilen ilave silikatlar oluşturduğu ve numunelerin suya daldırıldıktan sonra çatlama problemlerinin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır.

## **2. Amaç ve Kapsam**

Bu çalışmada, imento üretimi sırasında çevreye verilen zararlı etkilerin azaltılması amacıyla, imento bağlayıcı harçlara alternatif olarak, endüstriyel atıkların (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, atık mermer tozu) inşaat yıkıntılarında elde edilen pişmiş kil (harman tuğlası, delikli tuğla, çatı kiremiti) atıklarının ve atık mermer agregalarının kullanılması ile farklı kür sıcaklıklarında üretilen jeopolimer harçların fiziksel ve

mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çalışma sonunda, çimento bağlayıcılı harçların yerine tamamen atık malzemelerin ikame edilmesi ile üretilen jeopolimer harçların, inşaat endüstrisinde kullanımı hedeflenmektedir.

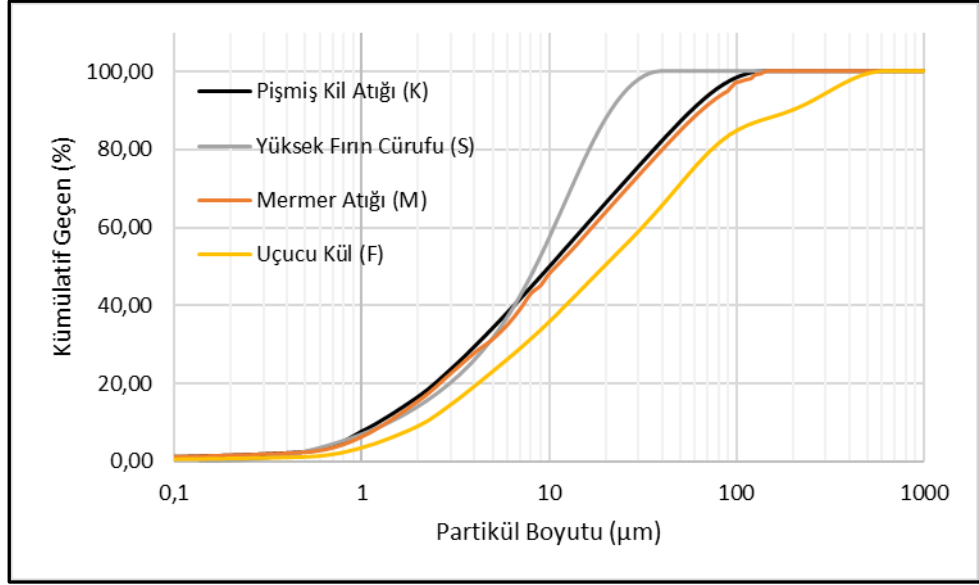
### 3. Malzemeler ve Yöntem

#### 3.1 Malzemeler

Jeopolimer harç üretimlerinde öncül toz malzeme olarak, Bilecik ili şehir merkezindeki inşaat yıkımlarından ve mermer kesim işletmelerinden toplanan (Şekil 1); harman tuğlası (HT), delikli tuğla (DT), çatı kiremiti (ÇK) ve mermer atıkları (M) öğütülüp kullanılmıştır. Bu amaçla malzemeler önce çeneli kırıcıda 4 mm elek altından geçecek şekilde kırılmıştır. Daha sonra bilyalı değirmende yüzey alanını artırmak için 120 dakika boyunca öğütülerek, %95'i 90 µm'lik elekten geçebilecek şekilde toz haline getirilmiştir. Çalışmada kullanılan endüstriyel atıklardan; F tipi uçucu kül (F) ve yüksek fırın cürufu (S); Hatay-İskenderun bölgesindeki Termik Santral ve Demir Çelik Tesislerinden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan bağlayıcı malzemelerin tanecik boyut analizi sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. a) Çatı kiremiti (ÇK), b) Delikli tuğla (DT), c) Harman tuğlası (HT) d) Mermer atığı tozu (M).

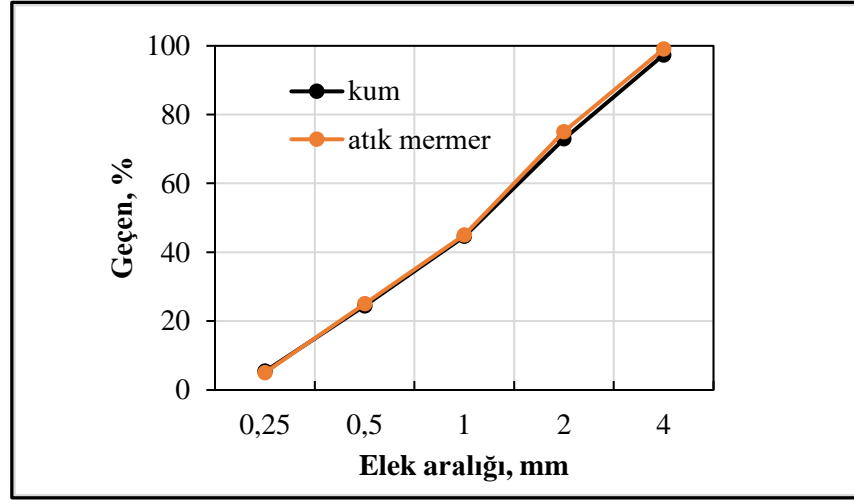


**Şekil 2.** Bağlayıcı malzemelerin tanecik boyut analizi sonuçları.

Karışımlarda agrega olarak, 0-4 mm boyutlarında, Osmaneli nehir kumu ve atık mermer agregaları (Şekil 3) kullanılmıştır. Kullanılan agregaların özgül ağırlığı ve ağırlıkça su emmesi, kum için sırası ile  $2,61 \text{ gr/cm}^3$  ve  $\%1,28$  atık mermer agregası için  $2,3 \text{ gr/cm}^3$  ve  $\%1,1$ 'dir. Agrega üzerinde yapılan elek analizi sonrası oluşturulan granülometri eğrisi Şekil 4'te sunulmuştur. Kullanılan atık mermer agregalarının (MA) granülometrisi, nehir kumu agregasının granülometrisine göre ayarlanmıştır. Çalışmada kullanılan atık tozlar (ÇK, DT, HT ve M) üzerinde yapılan kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Jeopolimer harç üretimlerinde alkali çözelti olarak, LAPOINTE firmasından alınan NaOH (yoğunluğu  $2,1 \text{ gr/cm}^3$ , pH değeri 14 ve  $\%98$  saflıktadır) ve Detsan Tic.Ltd.Şti.'den temin edilen, cam suyu olarak da bilinen  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (yoğunluğu  $1,38 \text{ gr/cm}^3$ ,  $\%8,9 \text{ Na}_2\text{O}$ ,  $\%28,7 \text{ SiO}_2$  ve  $\%64,8 \text{ H}_2\text{O}$ ) beraber kullanılmıştır.



**Şekil 3.** Atık mermer agregası.



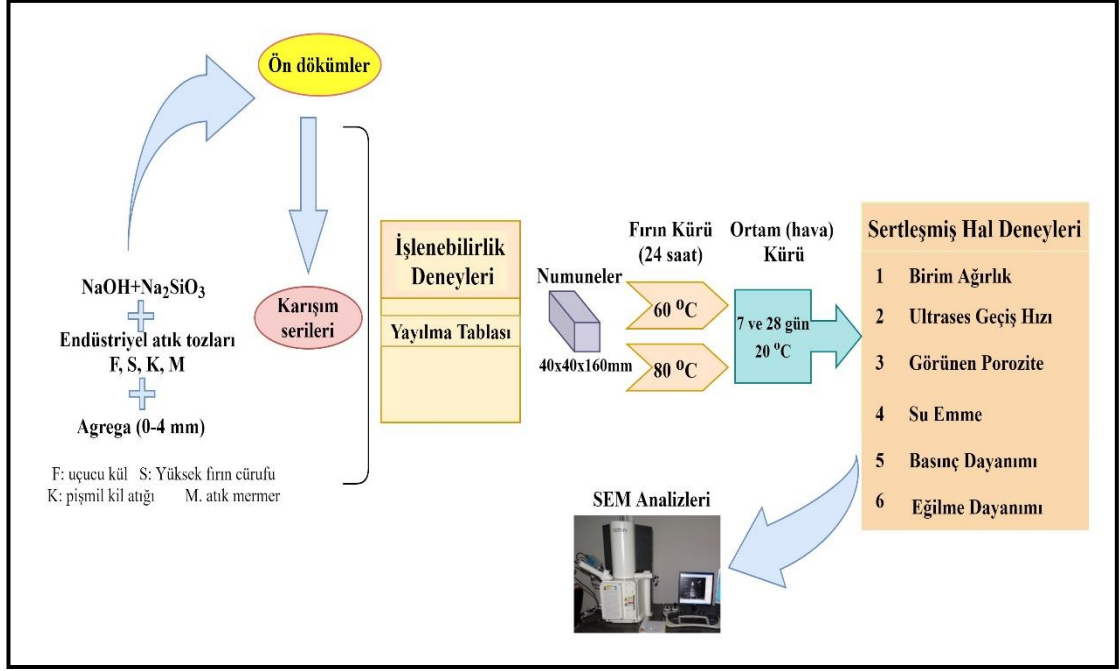
Şekil 4. Agrega granülometri eğrisi.

Tablo 1. ÇK, DT, HT ve M'nin kimyasal özellikleri.

Oksitler, %	ÇK	DT	HT	M	F	S
SiO <sub>2</sub>	44,7	48,9	44,6	1,2	60,07	32,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,7	17,2	17,2	-	21,35	11,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,2	7,1	9,8	1,2	7,41	0,62
CaO	8,8	4,7	7,5	72,1	0,99	36,1
MgO	5,2	6,5	6,8	0,4	1,82	5,64
SO <sub>3</sub>	0,3	3,5	0,3	-	0,22	1,21
K <sub>2</sub> O	1,6	3,2	3,2	-	2,91	0,83
TiO <sub>2</sub>	1,9	0,8	0,8	-	0,94	1,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,3	1,2	1,1	-	0,15	0,01
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2	0,1	0,1	-	0,08	1,48
Kızdırma Kaybı	9,1	6,8	8,6	25,1	1,52	2,35
Özgül Ağırlık, gr/cm <sup>3</sup>	2,9	2,9	2,8	2,3	2,29	2,9

### 3.2 Yöntem

Şekil 5'te verilen çalışmanın akış şemasına göre, değişen oranlarda atık pişmiş kil (K), atık mermer tozları (M), uçucu kül (F), yüksek fırın cürufu (S), agrega (0-4 mm) ve hazırlanan alkali çözeltileri (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) karıştırılarak jeopolimer harç serileri üretilmiştir.



Şekil 5. Çalışmanın akış şeması.

Çalışmanın ilk aşamasında, kullanılacak agrega/bağlayıcı oranı, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH miktarlarının belirlenmesi amacıyla ön dökümler yapılmıştır. Bu bağlamda kontrol karışımları olan; %100 uçucu kül (F), %100 cüruf (S) ve %100 pişmiş kil (K) atıkları içeren karışımlara; 7,5-10 ve 12,5 mol (M) NaOH çözeltileri ile Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranlarının ağırlıkça 1,0-1,5-2,0 ve 2,5 olan numune serileri üretilmiştir. Daha sonra, üretilen ön döküm jeopolimer harç serilerine yayılma tablası deneyi ile 7 ve 28 gün ortam küre sonunda mekanik özellik deneyleri uygulanmıştır. Yapılan küre ve deneyler neticesinde 10 M NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH oranı 2,0 olan karışımın, taze ve sertleşmiş hal özellikleri açısından en uygun oranlar olduğu belirlenmiştir. Daha sonra jeopolimer harç serilerinin agrega/bağlayıcı oranını belirlemek için %100 uçucu kül (F100), %100 cüruf (S100) ve %100 pişmiş kil atığı (K100) içeren karışımlara ağırlıkça 0,5-1,0-1,5 ve 2,0 oranlarında agrega/bağlayıcı kullanılarak jeopolimer harç numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere yapılan işlenebilirlik ve sertleşmiş hal deneyleri neticesinde 1,5 oranındaki agrega/bağlayıcının, üretilecek jeopolimer harç serilerinin taze ve sertleşmiş hal özellikleri açısından en uygun oran olduğuna karar verilmiştir.

Ön dökümler neticesinde bütün jeopolimer harç serilerinde ağırlıkça agrega/bağlayıcı oranı 1,5 ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> /10 Mol NaOH oranı 2,0 ve su/bağlayıcı oranı 0,4 olarak sabit tutulmuştur. 10 M NaOH çözeltisi oda sıcaklığına gelinceye kadar cam kavanozlarda 24

saat süre ile bekletilmiş ve kullanılmadan önce 5 dk süre ile karıştırılmıştır. Jeopolimer harç serilerinin üretimindeki ilk aşamada atık tozlar ve kum, harç mikserinde 1,5 dk süre ile düşük hızda (62,5 devir/dakika) karıştırılmış, daha sonra mikserde 10 M NaOH ilave edilerek, aynı hızda 1,5 dk daha karıştırılmıştır. Üçüncü aşamada, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> karışıma ilave edilip 1,5 dk daha düşük hızda karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son olarak ise mikser yüksek hızda (125 devir/dakika) 1,5 dk daha çalıştırılmıştır (Şekil 6).



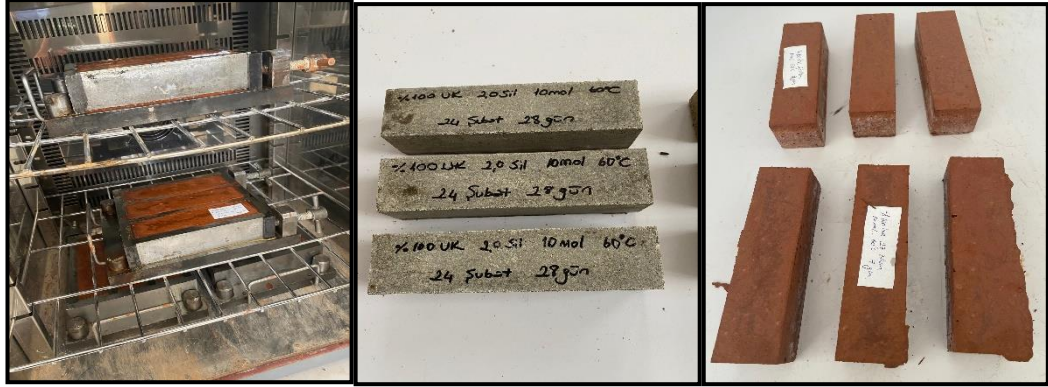
Şekil 6. Jeopolimer harç serilerinin mikserde hazırlanması.

Jeopolimer harç serilerinin adlandırılmasında; K indisi; ÇK, DT ve HT atık tozları karışımını (pişmiş kil atıkları), sayılar ise malzemenin toplam bağlayıcı içerisindeki ağırlıkça yüzdesini ifade etmektedir. Örnek olarak, K100; %100 pişmiş kil atığı (K) içeren jeopolimer harç karışımını belirtmektedir. Nehir agregalı jeopolimer harçların karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Jeopolimer harç serileri.

Seriler	NaOH (mol)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	K			M (g)	F (g)	S (g)	Kum (g)	S/B
			ÇK (g)	DT (g)	HT (g)					
K100			333,3	333,3	333,3	-	-	-		
S100			-	-	-	-	-	1000		
F100	10	320	-	-	-	-	1000	-	1500	0,4
M100			-	-	-	1000	-	-		
K50S50			166,6	166,6	166,6	-	-	500		
K50F50			166,6	166,6	166,6	-	500	-		

Hazırlanan karışımlar, TS EN 12390-1'e göre 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara iki aşamada, sarsma cihazı kullanılarak yerleştirilmiştir. Üretilen jeopolimer harçlara, 60 ve 80 °C'lik etüvde ilk 24 saat süre ile kür işlemi uygulanmıştır (Şekil 7). 24 saat süre sonunda kalıplarından çıkartılan jeopolimer harçlara deney gününe (7 veya 28 gün) kadar ortam koşullarında (20±2 °C sıcaklıkta) hava kürü uygulanmıştır.



Şekil 7. Üretilen jeopolimer harçların kür işlemleri.

Jeopolimer harç serilerine, TS EN 12350-5 standartlarında yayılma tablası deneyi, TS EN 772-4'e göre birim hacim ağırlık deneyi, TS EN 12504-4'e göre ultrases geçiş hızı deneyi ve TS EN 196-1'e göre mekanik özellik deneyleri (Şekil 8) uygulanmıştır. Birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve eğilme dayanımı testlerinde her bir karışım serisi için üç adet numunenin ortalama değerleri alınırken, basınç dayanım testinde altı adet numunenin değerlerinin ortalaması alınmıştır. Görünen porozite ve su emme deneyleri her serideki üç adet 28 günlük 40x40x160 mm'lik numuneler üzerinde uygulanmış ve numunelerin su içerisindeki ağırlıklarını belirlemek için Arşimet terazisi kullanılmıştır.



Şekil 8. Mekanik özellik deneyleri.

Üretilen jeopolimer harç numunelerinin birim hacim ağırlık, görünen porozite ve su emme değerleri, sırasıyla Denklem (3.1-3.3) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$BHA=[w_1/(w_3-w_2)] \quad 3.1$$

$$GP= [(w_3-w_1)/(w_3-w_2)]x100 \quad 3.2$$

$$SE=[(w_3-w_1)/(w_1)]x100 \quad 3.3$$

Denklemlerdeki  $w_1$ : Numunenin etüvde 105 °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 ( $kg/m^3$ ), GP: Görünen porozite (%) ve SE: Su emme (%) değerlerini göstermektedir.

Çalışmanın 2’nci aşamasında, mekanik deneyler sonrasında yüksek dayanım sonuçları elde edilen endüstriyel atık bazlı S100 ve F100 seri karışımlarındaki nehir kumu agregası yerine %25, %50 ve %75 oranlarında atık mermer agregası (0-4 mm) kullanılarak S100MA25, S100MA50, S100MA75, F100MA25, F100MA50 ve F100MA75 serileri üretilmiştir. Üretilen taze jeopolimer harç serileri üzerinde yayılma tablası uygulanmış ve 28 günlük kür sonundaki serilerin eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanarak atık mermer agregalarının jeopolimer harçların mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

**Tablo 3.** Atık mermer agregalı jeopolimer harç serileri.

Seriler	NaOH (mol)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	F (g)	S (g)	Kum (g)	MA (g)	S/B
S100			-	1000	1500	-	
S100MA25			-	1000	1125	375	
S100MA50				1000	750	750	
S100MA75	10	320	-	1000	375	1125	0,4
F100			1000	-	1500	-	
F100MA25			1000		1125	375	
F100MA50			1000		750	750	
F100MA75			1000		375	1125	

#### 4. Analiz ve Bulgular

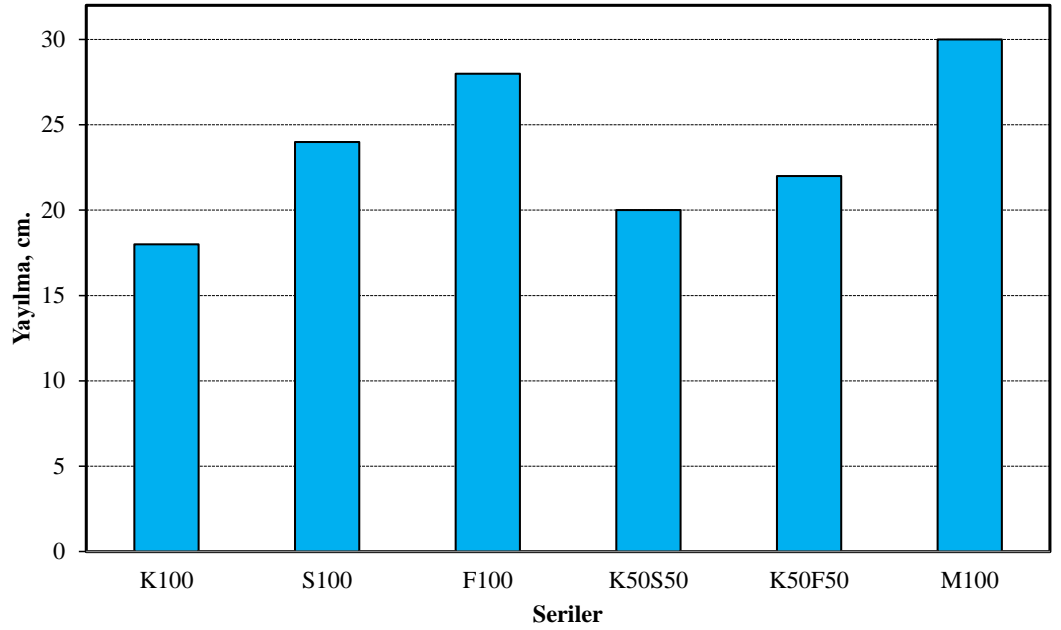
##### 4.1 İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Yayılma tablası deneyi ile jeopolimer harç serilerinin işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Jeopolimer harç serilerinin yayılma çaplarındaki değişimler Şekil 9 ve 10'da verilmiştir. Şekil 9'da görüldüğü üzere nehir agregalı serilerde en yüksek işlenebilirlik M100 (30 cm)'de en düşük işlenebilirlik ise K100 (18 cm)'de tespit edilmiştir. K100'ün düşük işlenebilirliği; atık pişmiş kil parçacıklarının, atık tuğla ve kiremitlerin öğütme işlemi sırasında parçalanarak üretilmesi sebebiyle, düzensiz mikro yapısı ve pürüzlü köşelere sahip olmasından kaynaklanabileceği (Ma vd. 2020) şeklinde değerlendirilmektedir. K100, K50S50 ve K50F50 serileri karşılaştırıldığında, K100 serisindeki pişmiş kil yerine, %50 oranında yüksek fırın cürufu ilavesi yapıldığında K50S50'nin işlenebilirliğinin %11 oranında arttığı, uçucu kül ilavesi yapıldığında ise K50F50'nin işlenebilirliğinin %22 oranında arttığı tespit edilmiştir. Uçucu kül tanelerinin pürüzsüz ve küresel bir yapı ile düşük özgül ağırlığa sahip olması (Behera vd.,2021), uçucu küllü serilerdeki işlenebilirliğin, killi ve cürufu serilere göre daha fazla artmasına sebep olduğu şeklinde değerlendirilmiştir.

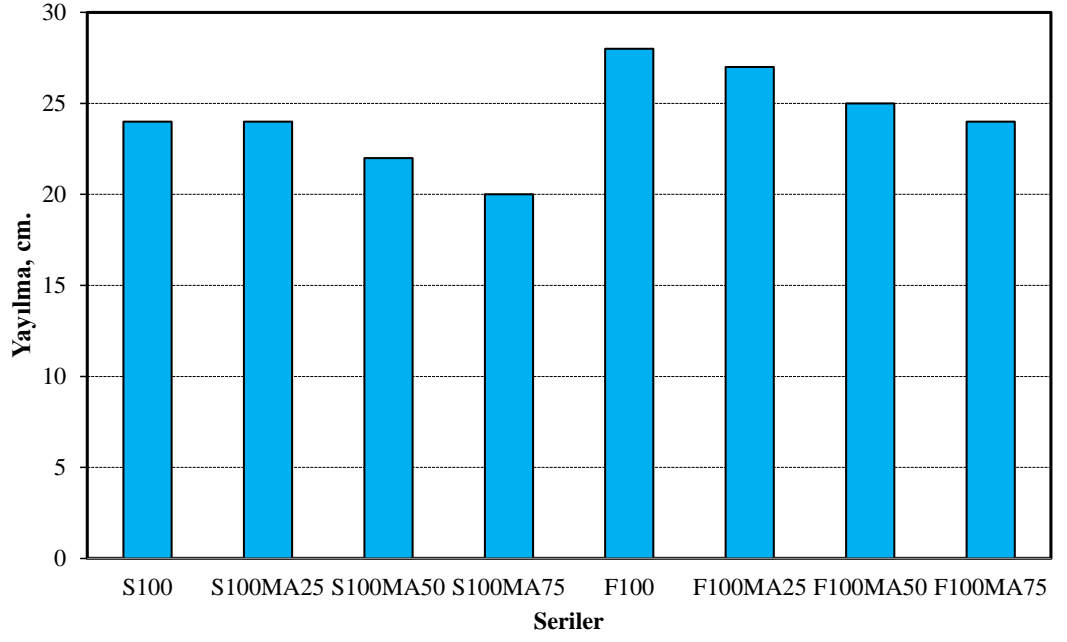
M100 serisi K100 serisine göre yaklaşık %67 daha fazla yayılma özelliği göstermiştir. Bu durum, mermer atığı tozunun hem özgül ağırlığının (2,3 g/cm<sup>3</sup>), pişmiş kil

atıklarından (2,8-2,9 g/cm<sup>3</sup> arası) daha düşük olmasına hem de su emme miktarının düşük olmasından kaynaklanabilmektedir.

Şekil 10 incelendiğinde, S100 serisine nehir agregası yerine %25, %50, %75 oranlarında atık mermer agregası ilavesi, S100'ün işlenebilirliğini sırasıyla; %0, %8 ve %17 oranında azaltmış, F100'ün işlenebilirliğini ise sırasıyla; %3,5, %10,7 ve %14,3 oranlarında düşürmüştür. Bu durum nehir agregasının atık mermer agregasına göre daha küresel yapıda olmasına ve atık mermer agregasının hazırlanma aşamasında kırılarak elde edilmesi sebebiyle, nehir agregasına göre daha köşeli ve pürüzlü yapıda olmasına bağlanabilir.



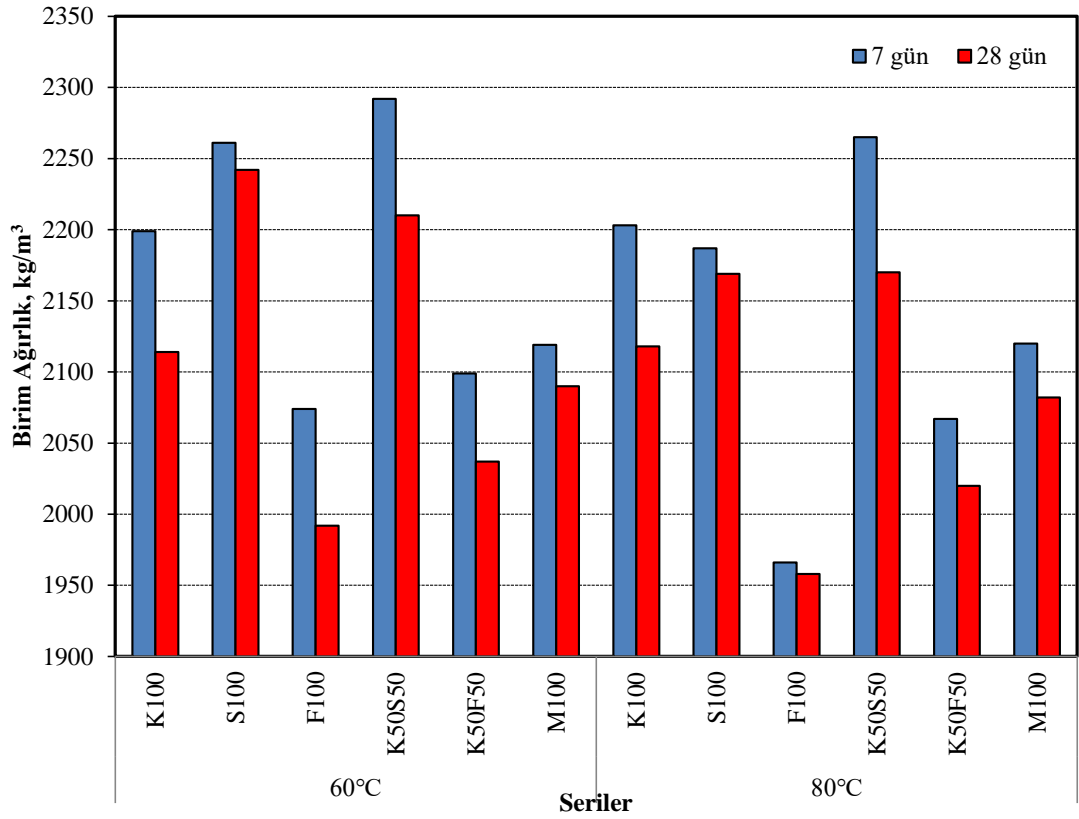
Şekil 9. Yayılna çaplarının nehir agregalı jeopolimer harç serilerine göre değişimi.



**Şekil 10.** Atık mermer agregalı jeopolimer harçların, yayılma çaplarının harç serilerine göre değişimi.

#### 4.2 Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Üretilen jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük birim ağırlık sonuçlarının kür sıcaklıklarına ve serilere göre değişimi Şekil 11’de verilmiştir. Sonuçlar, F100 karışım serisinin birim ağırlığının her iki kür süresi ve sıcaklığında da diğer karışım serilerine göre düşük olduğunu göstermektedir. 60 °C kür uygulanan karışım serileri arasında en yüksek birim hacim ağırlık değerine sahip olan karışım 7 günlük kür süresi için K50S50, 28 günlük kür süresi için S100 serisidir. 80 °C kür sıcaklığı uygulanan karışım serilerinde ise 7 günlük kür süresi için en yüksek birim hacim ağırlık değerine K50S50 karışımında, 28 günlük kür süresi için ise S100 serisinde ulaşılmıştır. 60 ve 80 °C sıcaklıktaki, K50S50 ile K50F50 serilerinin 28 günlük birim ağırlıkları karşılaştırıldığında; K50S50 serisinin birim ağırlıkları K50F50’ye göre sırayla %7,8 ve %6,9 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi uçucu kül ve cürufun, pişmiş kil atığına göre jeopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırdığı ve matriste daha kompakt bir yapı oluşturmasına bağlanabilir.



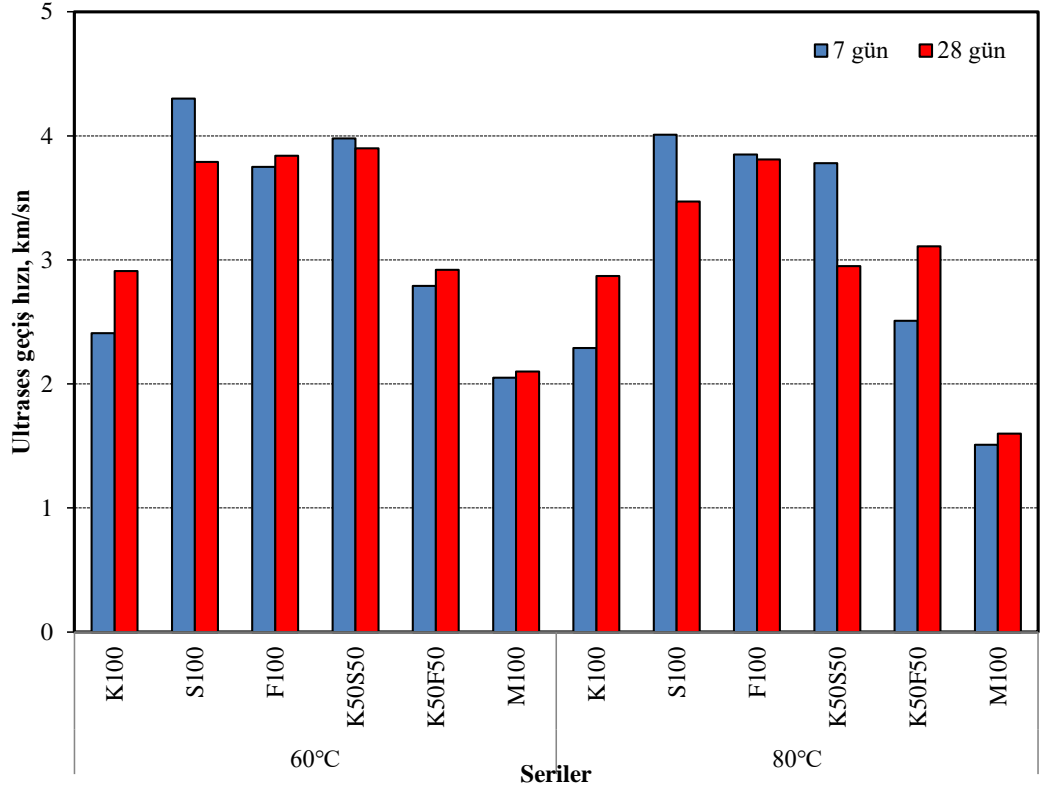
**Şekil 11.** Jeopolimer harçların birim hacim ağırlıklarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

### 4.3 Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

Ultrases geçiş hızı ölçümleri ile jeopolimer numunelerinin sürekliliği, homojenliği, muhtemel çatlak ve hasarları gibi birçok değişken değerlendirilebilir. Jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı ölçüm değerlerinin kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 12’de verilmiştir. Şekil 12 incelendiğinde ultrases geçiş hızlarının 1,51 ile 4,30 km/s arasında değiştiği görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde, M100 karışım serisinin ultrases geçiş hızı sonuçları her iki kür süresi ve sıcaklığında diğer karışım serilerine göre düşük çıkmıştır. 60 °C sıcaklıktaki seriler arasında 7 günlük en yüksek ultrases geçiş hızı değerine sahip olan seri S100, 28 gün kür süresi için K50S50’dir. 80 °C kür sıcaklığı seriler arasında 7 günlük en yüksek ultrases geçiş hızı değerine sahip olan seri S100, 28 günlük kür süresi için ise F100 serisidir. 60 ve 80 °C sıcaklıktaki K50S50 serisi ile K50F50 serisinin 28 günlük ultrases geçiş hızları

karşılaştırıldığında; K50S50 serisi K50F50'ye göre 60 °C sıcaklıkta %25,1 daha yüksek ve 80 °C sıcaklıkta %5,1 daha düşük çıkmıştır.

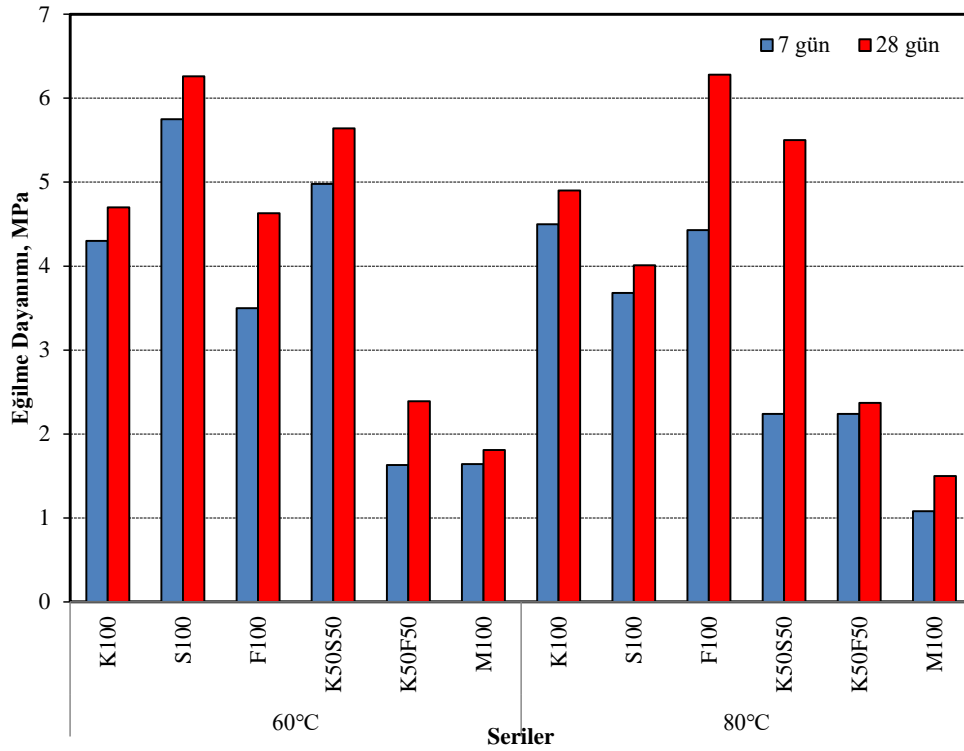
Ultras ses geçiş hızı sonuçları genel olarak incelendiğinde, S100 ve K50S50 serileri hariç, kür süresi arttıkça serilerin ultras ses geçiş hızlarının arttığı, dolayısıyla serilerin daha boşluksuz hale geldiği değerlendirilmiştir.



Şekil 12. Jeopolimer harçların ultras ses geçiş hızlarının kür sıcaklıkları ve zamana göre değişimi.

#### 4.4 Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Laboratuvar ortamında 7 ve 28'inci günlere kadar ortam (hava) kürüne tabi tutulan numunelere, deney gününde üç noktalı eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Jeopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı değerlerinin kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 13'te verilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde, serilerin eğilme dayanımlarının 1,1 ile 6,2 MPa arasında değiştiği görülmektedir.



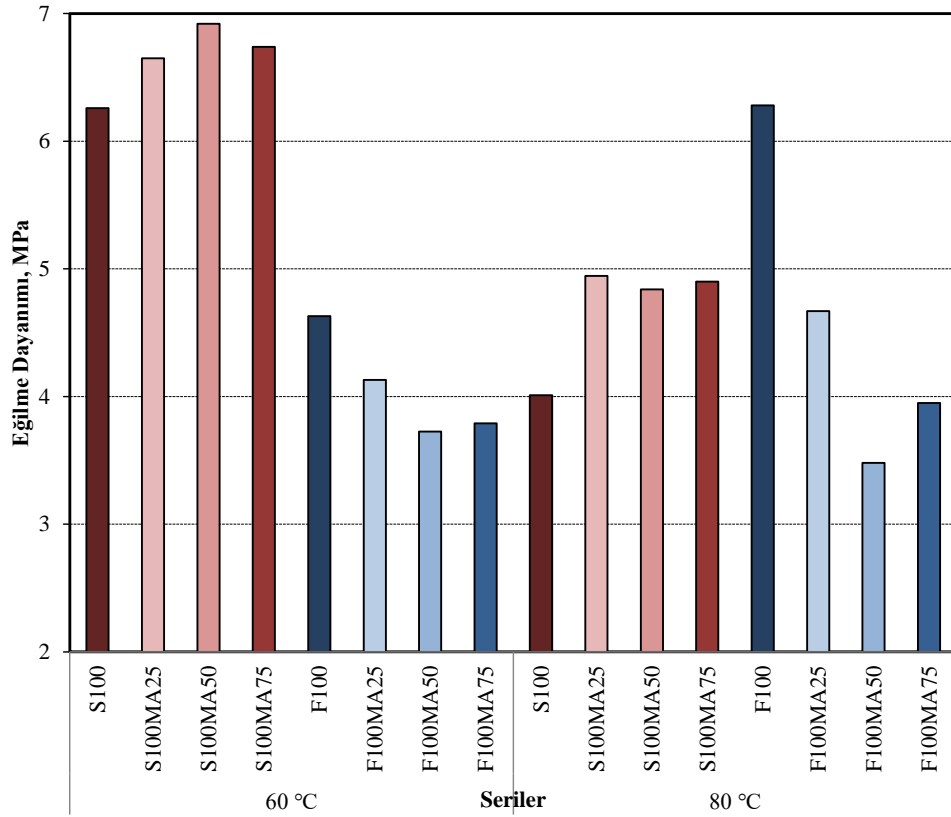
**Şekil 13.** Jeopolimer harçların eğilme dayanımlarının kür sıcaklıkları ve zamana göre değişimi.

Elde edilen sonuçlara göre, her iki kür süresi ve sıcaklığında da en düşük eğilme dayanımı M100 serisinde tespit edilmiştir. 60 °C kür uygulanan serilerin eğilme dayanımları incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımlarının 7 (5,7 MPa) ve 28 (6,2 MPa) günlük kür sürelerinde S100 serisinden elde edildiği tespit edilmiştir. 80 °C kür uygulanan serilerin eğilme dayanımları incelendiğinde ise en yüksek eğilme dayanımları, 7 günlük kür süresinde K100 (4,9 MPa), 28 günlük küre süresinde ise F100 (6,28 MPa) serilerinden elde edilmiştir. S içeren jeopolimer harç serilerinde  $Al_2O_3/SiO_2$  oranının F ve K içeren karışımlara göre daha yüksek olması sebebiyle jeopolimerizasyon reaksiyonlarının daha hızlı gerçekleştiği söylenebilir. Bu yüzden karışımların eğilme dayanımları için S içeren karışımlarda 60 °C ve F içeren karışımlarda ise 80 °C kür sıcaklığının daha uygun olduğu söylenebilir (Islam vd, 2014; Mermerdaş vd., 2017). Bunun yanı sıra, S içeren serilerde yüksek sıcaklık sonucunda jeopolimerizasyon için hayati öneme sahip suyun buharlaşması da eğilme dayanımlarının düşmesine bir diğer sebep olarak gösterilebilir (Chindaprasirt vd., 2007; Bakharev, 2005).

60 ve 80 °C sıcaklıktaki K50S50 serisi ile K50F50 serisinin 28 günlük eğilme dayanımları karşılaştırıldığında, K50S50 serisinin K50F50'ye göre sırasıyla %57,6 ve %56,9 daha yüksek dayanımlara ulaştığı tespit edilmiştir. Çalışma sonunda en yüksek

eğilme dayanımına (6,2 MPa) 28 gün kür süresi sonunda 80 °C kürlenen F100 karışımı ulaşmıştır.

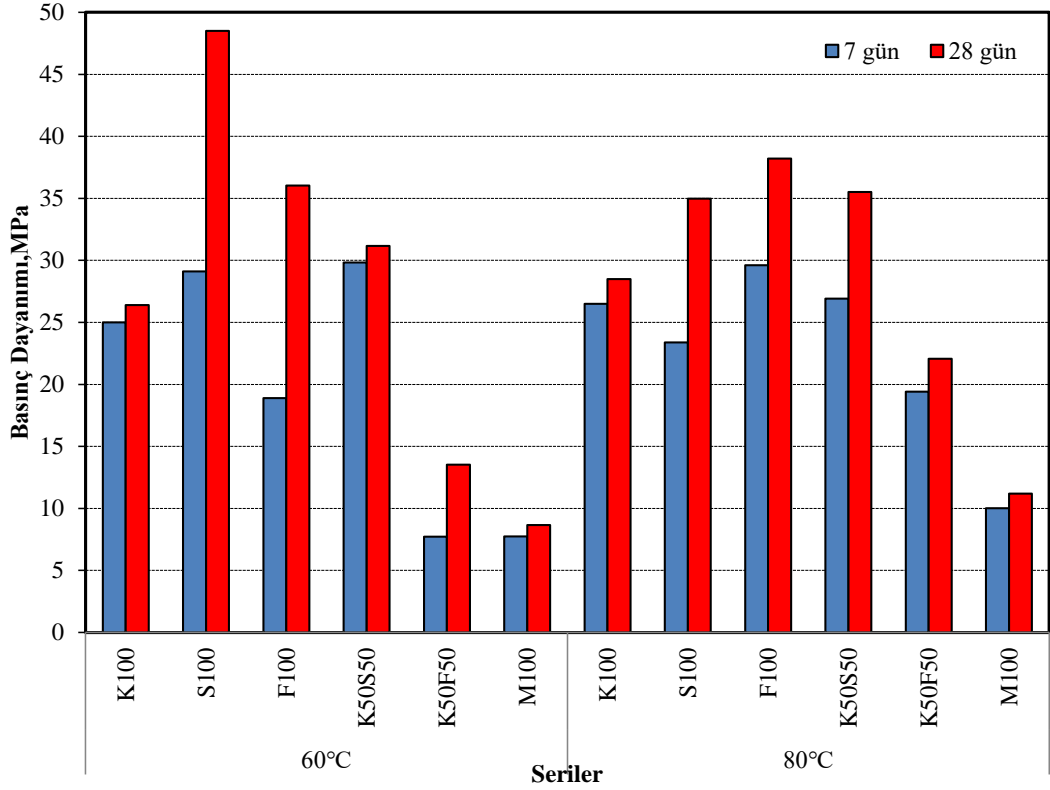
Çalışma kapsamında geliştirilen bağlayıcılara, nehir agregası yerine belirli oranlarda mermer agregası ikamesinin 28 günlük eğilme dayanımına etkisi Şekil 14'te gösterilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanan mermer agregalı serilerin eğilme dayanımları incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımlarının 60 °C kür sıcaklığında S100MA50 (6,9 MPa) ve 80 °C kür sıcaklığında S100MA25 (4,9 MPa) serisinden elde edildiği tespit edilmiştir. Sonuçlara göre, 60 °C kür sıcaklığı uygulanan S100 serisine %25, %50, %75 oranlarında atık mermer agregası ikamesi ile S100'ün eğilme dayanımlarında sırasıyla; %6, %10,5 ve %7,7 oranlarında, 80 °C kür sıcaklığında ise %23,3, %20,7 ve %22,2 oranlarında daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir. 60 °C kür sıcaklığında F100 serisine nehir agregası yerine atık mermer agregasının %25, %50 ve %75 oranında ikame edilmesi ile F100 serisine göre sırasıyla %6,2, %10,5 ve %7,6 oranlarında ve 80 °C kür sıcaklığında ise %23,3, %20,7 ve %22,2 oranlarında daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.



**Şekil 14.** Atık mermer agregalı jeopolimer harçların, eğilme dayanımlarının kür sıcaklıklarına göre değişimi.

#### 4.5 Basınç Dayanımı Denev Sonuçları

Jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin kr sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 15'te görülmektedir. Şekil 15 incelendiğinde serilerin basınç dayanımlarının 7 günlük kür süresinde 7,7 MPa ile 29,6 MPa arasında, 28 günlük kür süresinde ise 8,6 MPa ile 48,5 MPa arasında değiştiği görülmektedir.

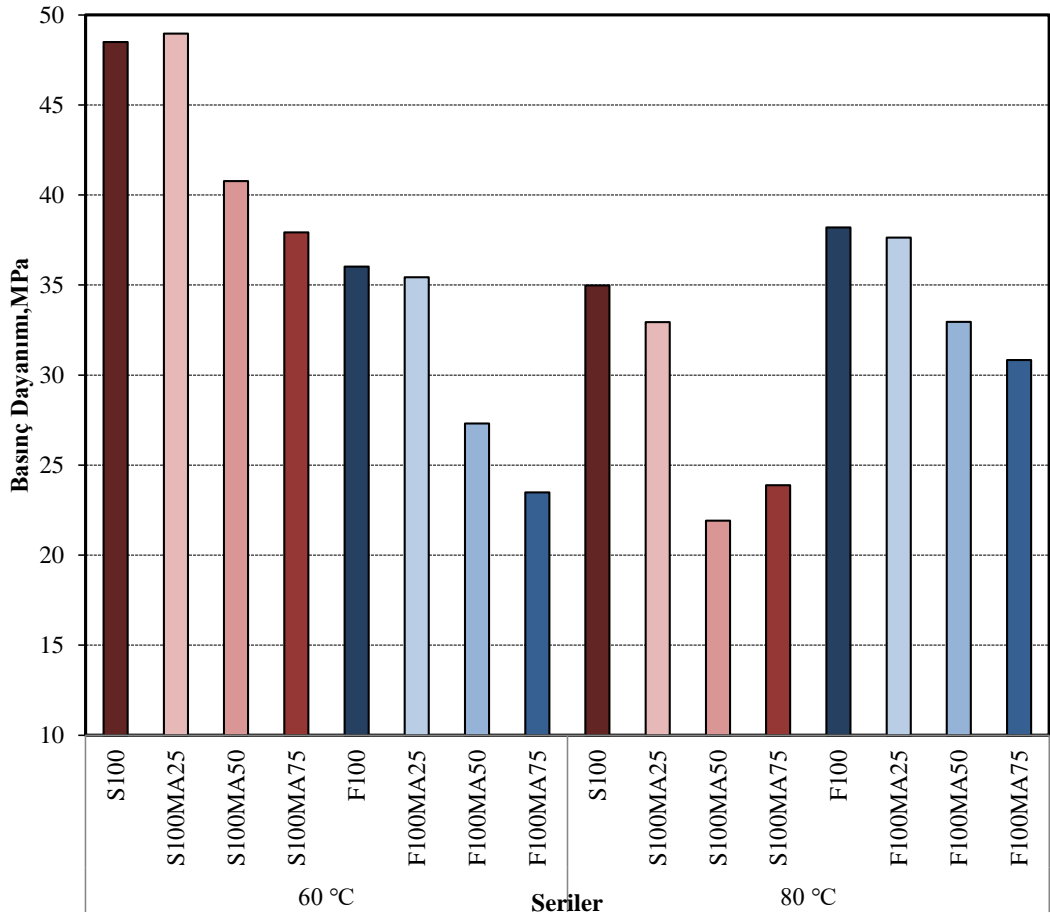


Şekil 15. Jeopolimer harçların basınç dayanımlarının kr sıcaklıkları ve zamana göre değişimi.

Elde edilen sonuçlara göre, her iki kr süresi ve sıcaklığında da en düşük basınç dayanımı M100 serisinde tespit edilmiştir. 60 C kr uygulanan serilerin basınç dayanımları incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımları; 7 günlük kür süresinde K50S50 (29,8 MPa)'den ve 28 günlük kür süresinde S100 (48,5 MPa) serisinden elde edilmiştir. 80 C kr uygulanan serilerin basınç dayanımları incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımları; 7 (29,6 MPa) ve 28 (38,2 MPa) günlük kür sürelerinde F100 serisinden elde edilmiştir. 60 ve 80 C sıcaklıktaki K50S50 serisi ile K50F50 serisinin 28 günlük basınç dayanımları karşılaştırıldığında, K50S50 serisinin K50F50'ye göre sırasıyla; %56,6 ve %37,9 daha yüksek dayanımlara ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum cüruf ve uçucu kül arasındaki  $Al_2O_3/SiO_2$  oranındaki fark ile açıklanabilir. Islam vd. (2014)'nin yaptığı bir çalışmada

$Al_2O_3$  ile  $SiO_2$ 'den gelen aluminat ve silikatlar arasındaki reaksiyonun yalnızca silikatların kendi arasında yaptığı reaksiyondan daha hızlı olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, çalışmada kullanılan S'nin F'ye göre daha yüksek  $Al_2O_3/SiO_2$  oranına sahip olması nedeniyle jeopolimerizasyon reaksiyonları K50S50 serisinde K50F50'ye göre daha hızlı gerçekleşmiş ve daha yüksek basınç dayanımlarının oluşmasına sebep olabilir (Mermerdaş vd., 2017). Çalışma sonunda en yüksek basınç dayanımına 60 °C kürlenen (48,5 MPa) 28 günlük S100 karışımı ulaşmıştır.

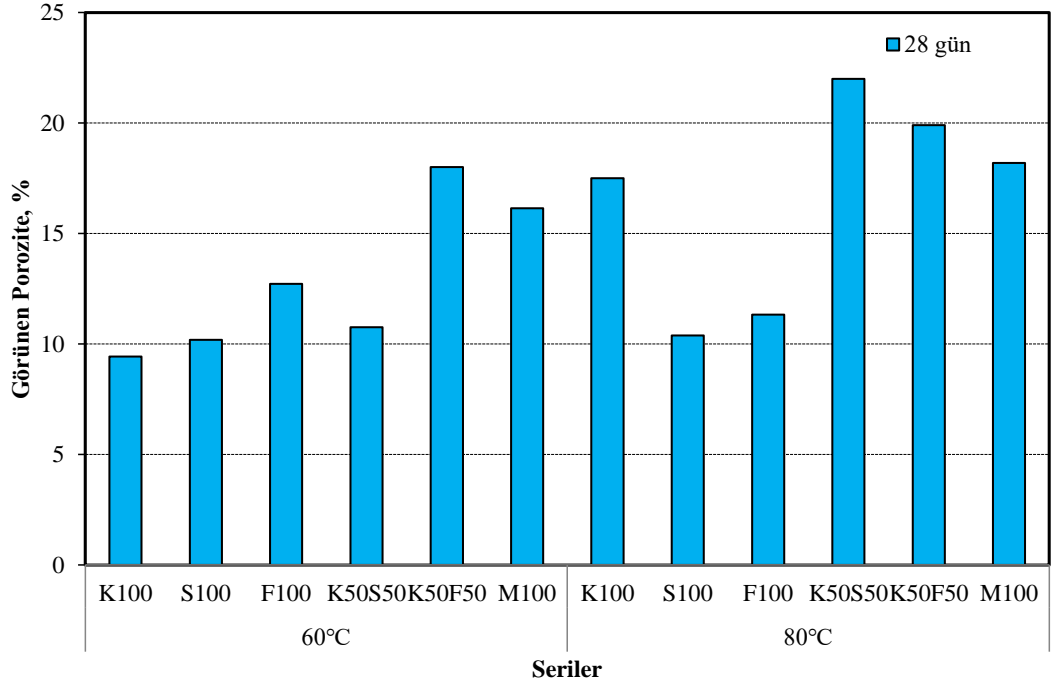
Çalışmanın ikinci aşamasındaki, bağlayıcılara nehir agregası yerine belirli oranlarda mermer agregası ikamesinin, 28 günlük basınç dayanımına etkisi Şekil 16'da gösterilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanan mermer agregalı serilerin basınç dayanımları incelendiğinde; en yüksek basınç dayanımlarının 60 °C kür sıcaklığında S100MA25 (49,00 MPa) ve 80 °C kür sıcaklığında F100MA25 (37,60 MPa) serisinden elde edildiği tespit edilmiştir. Sonuçlara göre, 60 °C kür uygulanan S100 serisine nehir agregası yerine %25, %50, %75 oranında atık mermer agregası ikamesi ile S100 serisinde göre sırasıyla %1 daha yüksek, %10,5 ve %7,7 daha düşük, 80 °C kür sıcaklığında ise %5,8, %37,4 ve %31,7 daha düşük dayanım sonuçları elde edilmiştir. 60 °C kür uygulanan F100 serisine nehir agregası yerine %25, %50 ve %75 oranlarında atık mermer agregası ikame edilmesi ile sırasıyla; %1,6, %24,2 ve %34,8 oranlarında ve 80 °C kür uygulandığı ise %1,5, %13,7 ve %19,3 oranlarında daha düşük dayanımlar elde edilmiştir.



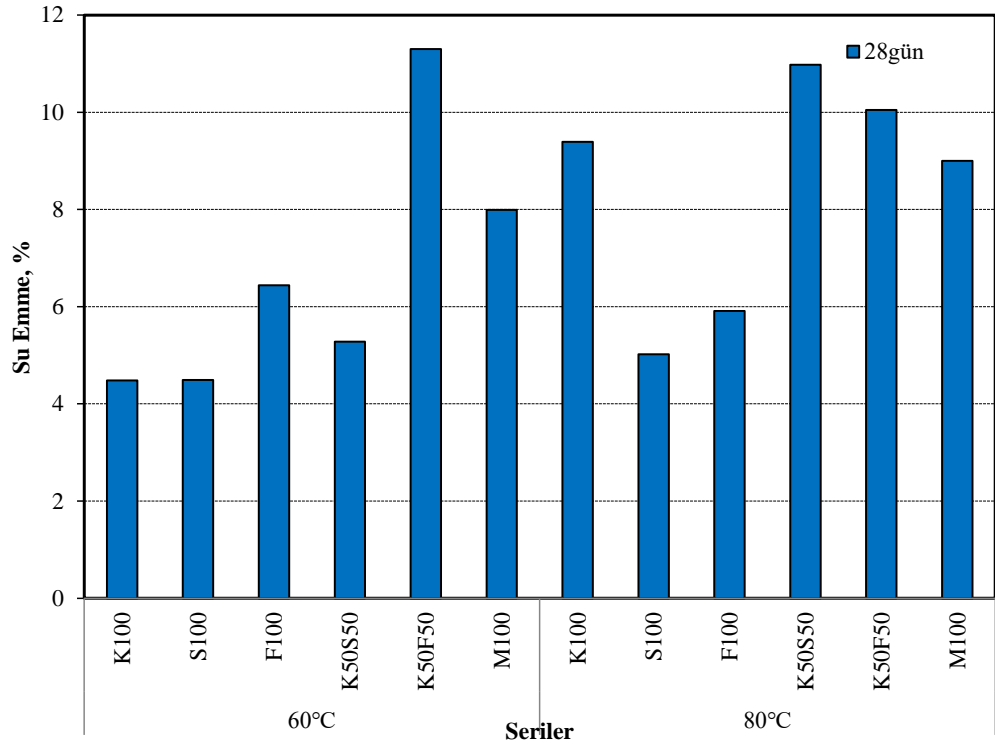
**Şekil 16.** Atık mermer agregalı jeopolimer harçların basınç dayanımlarının kür sıcaklıklarına göre değişimi.

#### 4.6 Görünen Porozite ve Su Emme Denev Sonuçları

Çalışmada, 60 ve 80 °C kür sıcaklığına maruz bırakılan jeopolimer harç numunelerinin 28 günlük su emme ve görünen porozite değerleri Şekil 17 ve 18’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Jeopolimer harç serilerinin görünür porozite değerlerinin kür sıcaklıklarına göre değişimi.

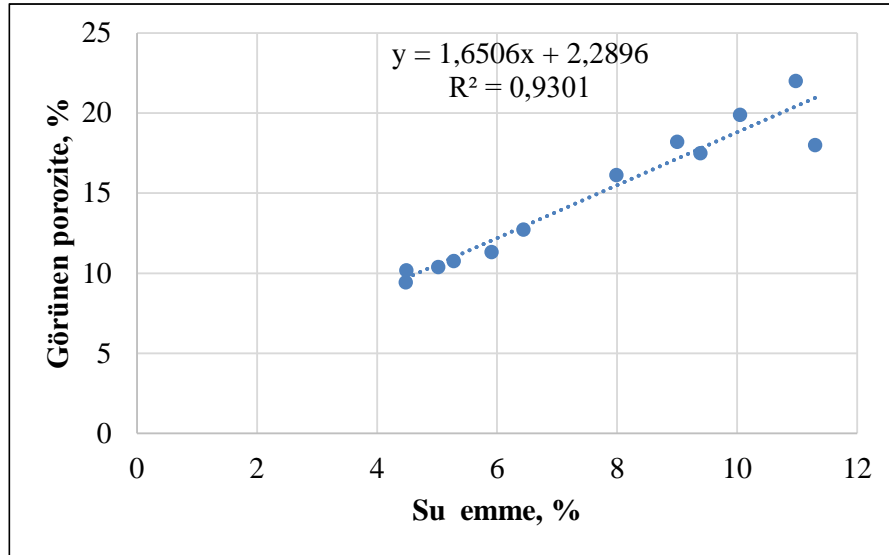


Şekil 18. Jeopolimer harç serilerinin su emme değerlerinin kür sıcaklıklarına göre değişimi.

Serilerin 60 °C sıcaklığındaki 28 günlük görünen porozite değerleri %9,4 ile %18 değişirken, 80 °C sıcaklığındaki porozite değerleri ise %10,4 ile %22 arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, 60 °C sıcaklığında en yüksek görünen porozite değeri K50F50 (%18), en düşük görünen porozite değeri ise K100 (%9,4) serisinde tespit edilmiştir. 80 °C kür uygulanan serilerin görünen porozite değerleri incelendiğinde en yüksek görünen porozite değeri K50S50 (%22) ve en düşük görünen porozite değeri ise S100 (%10,4) serisinden elde edilmiştir. Farklı kür sıcaklıklarındaki K50S50 ile K50F50 serilerinin görünen porozite değerleri karşılaştırıldığında, 60 °C kür sıcaklığındaki K50F50 serisinin K50S50'ye göre görünen porozite değeri %40,2 daha yüksek ve 80 °C kür sıcaklığında ise %10,5 daha düşük değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.

Çalışmada yapılan su emme ve görünen porozite deney sonuçlarının arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla yapılan analiz Şekil 19'da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her iki kür sıcaklığı için yapılan görünen porozite ve su emme deneyleri arasında  $R^2 = 0,93$  olmak üzere doğrusal, güçlü bir ilişki olduğu görülmektedir.

Serilerin su emme değerleri incelendiğinde, en yüksek ve en düşük su emme değerlerine ulaşan seriler, en yüksek ve en düşük görünen porozite değerlerine ulaşan serilerle aynıdır. Serilerin 60 °C sıcaklığındaki 28 günlük su emme değerleri %4,5 ile %11,3 değişirken, 80 °C sıcaklığındaki su emme değerleri ise %5,0 ile %11 arasında değişmiştir.

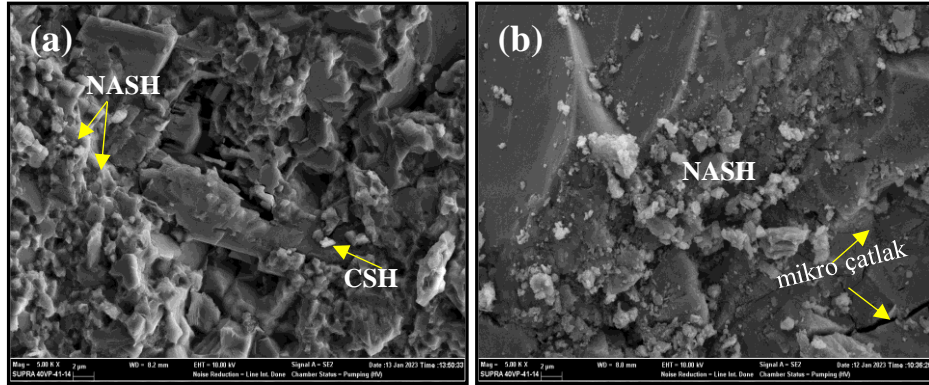


Şekil 19. Jeopolimer harç serilerinin görünen porozite ve su emme değerleri arasındaki ilişki.

#### 4.7 İç Yapı Analizi

İç yapı analizleri, atık toz malzemelerin jeopolimer harçlar üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir araçtır. Farklı sıcaklıklarda (60 °C ve 80 °C) 24 saat ısı kürü uygulanan jeopolimer harç serileri, 28'inci güne kadar ortam şartlarında (20±2°C) kür edilmiş ve S100, F100 ve M100 numunelerinden alınan parçaların iç yapı görüntü analizleri, ZEISS Supra 40 VP model taramalı elektron sistemi (SEM) ile incelenmiştir. Yapılan SEM incelemelerine göre;

M100 dışındaki tüm jeopolimer serilerinde bağlayıcı faz olarak yoğun N-A-S-H (sodyum alüminosilikat hidrat) oluşumları gözlemlenirken, S bağlayıcılı serilerde ise hem N-A-S-H ve C-A-S-H (kalsiyum alüminosilikat hidrat) hem de C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) oluşumunun görüldüğü yoğun bir mikro yapı tespit edilmiştir. S100 serisinin 60 ve 80°C'lik ısıl kürü sonrası alınan iç yapı görüntüleri (x5000 büyütme oranında) Şekil 20.a ve 20.b'de sırası ile sunulmuştur.

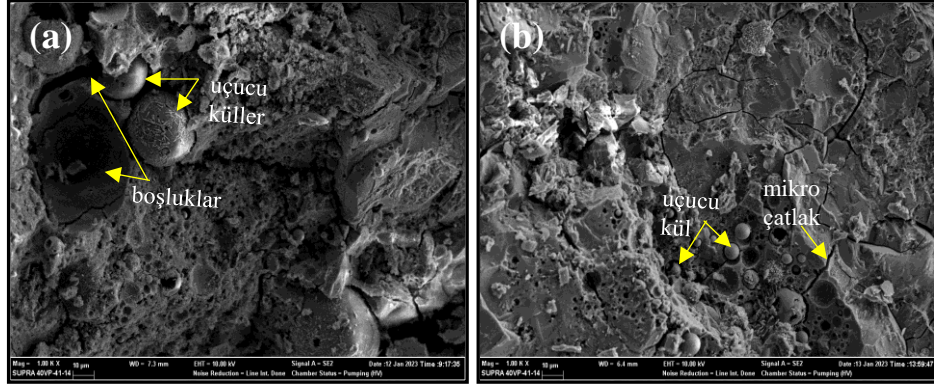


Şekil 20. S100'ün iç yapısı a) 60 °C ısıl kürü, b) 80 °C ısıl kürü.

S100 serisinin iç yapısında oluşan görünür boşlukların, diğer jeopolimer harç serilerinin iç yapı görüntülerine göre daha az olması, ayrıca 60 °C'lik ısıl küre maruz kalan S100 numunesinde (Şekil 20.a), 80 °C'lik ısıl kür uygulanan S100 numunesine (Şekil 20.b) göre daha az görünür boşlukların ve mikro çatlakların oluşması, jeopolimer matrisinin tüm bölgelerde uyumluluk içinde olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, S100 serisinde, geleneksel Portland karışımlarında gözlemlenen agrega-çimento hamuru ara yüzey geçiş bölgeleri gibi, agrega etrafında tanımlanmış zayıf geçiş bölgeleri olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, jeopolimer harç serilerinde en yüksek basınç ve eğilme

dayanımı sonuçlarına ulaşan S100 serisindeki jeopolimer matrisin yüksek bağ gücüne bağlanabilir.

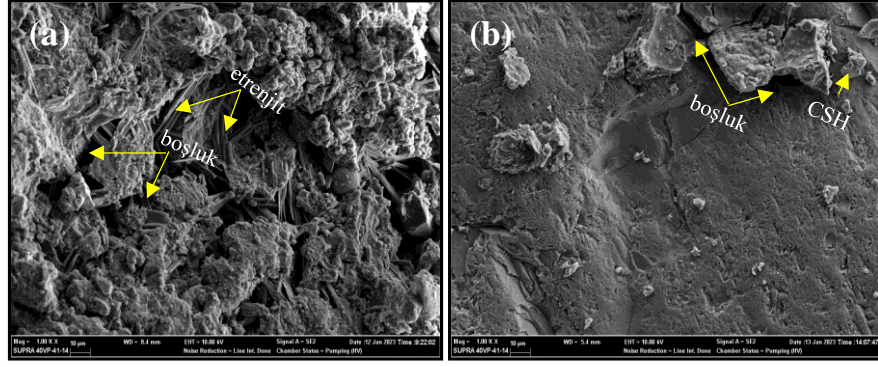
F100 serisinin 60 ve 80°C'ısl kürü sonrası alınan iç yapı görüntüleri (x1000 büyütme oranında) Şekil 21'de sunulmuştur.



**Şekil 21.** F100'ün iç yapısı a) 60 °C ısl kürü, b) 80 °C ısl kürü.

60 °C'lik kür uygulanan F100 numunesinin iç yapısındaki (Şekil 21.a) gözenekler, mikro çatlaklar ve kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül parçacıklarının sayısı, 80 °C'lik ısl kür uygulanan F100 numunesine (Şekil 21.b) göre daha fazladır. Bu durum, 80 °C'lik ısl kür uygulanan F100 numunesinin basınç ve eğilme dayanımlarında bir miktar artışa sebep olmuştur. Jeopolimer harçlara uygulanan ısl kürü, jeopolimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmak için faydalıdır. İlk 24 saatlik yüksek sıcak kür (80 °C) etkisi, reaksiyona girmemiş uçucu kül partiküllerinin sayısının, 60 °C'lik küre göre daha düşük miktarlarda oluşmasına yol açmıştır. Bununla birlikte matristeki bazı mikro çatlakların, erken dayanımın hızlı gelişimi ve kullanılmayan serbest suyun uzaklaştırılması ile oluştuğu değerlendirilmektedir.

M100 serisinin 60 ve 80°C'ısl kürü sonrası alınan iç yapı görüntüleri (x1000 büyütme oranında) Şekil 22'de sunulmuştur.



Şekil 22. M100'ün iç yapısı a) 60 °C ısıt kürü, b) 80 °C ısıt kürü.

M100 serisi, düşük basınç dayanımı ile tutarlı olan ve yetersiz jeopolimerizasyonu yansıtan gözenekli yapılar sergilemiştir. 60 °C'lik kür uygulanan M100 serisinin iç yapısında (Şekil 22.a) geniş çaplı iğne şeklinde etrenjitler gözlemlenmiştir. Kür sıcaklığı arttıkça (80 °C'de) etrenjit benzeri iğneler azalmış ve mikro yapısının kompaktlığı artmıştır. Sıcaklık etkisi ile 80 °C'de kürlenene jeopolimer, C-S-H oluşumu nedeniyle daha homojen ve daha yoğun bir mikro yapı göstermiştir. Bununla birlikte ısı kürü sırasında su moleküllerinin uzaklaştırılmasından dolayı yapısında birçok mikro gözenek de gözlemlenmiştir.

## 5. Sonuçlar ve Öneriler

Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlara göre yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

- Yayılma tablası deneyi sonuçlarından, nehir agregalı serilerde en yüksek yayılma değeri M100, en düşük yayılma değeri K100 serilerinden elde edilmiştir. Cüruf ve uçucu külün kil yerine ikamesinin işlenebilirliği arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Cüruf ve uçucu kül bağlayıcılı jeopolimer harç serilerinde nehir agregası yerine %75 oranına kadar atık mermer agregası ikame edilmesi, işlenebilirlikleri; uçucu kül bağlayıcılı serilerde %14,3'e kadar, cüruf bağlayıcılı serilerde ise %17'ye kadar azaltmıştır.
- Birim hacim ağırlık deneyi sonuçlarına göre nehir agregalı jeopolimer harç serilerinde kür sıcaklığı ve süresi arttıkça, jeopolimer serilenin birim hacim ağırlıklarının genel olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Kil yerine uçucu kül ve cüruf ikamesinin ise birim hacim ağırlık değerlerini yükselttiği tespit edilmiştir.

- Kür sıcaklığı artışı ile M ve S bağlayıcılı serilerde ultrases geçiş hızlarının düştüğü, F bağlayıcılı serilerde ise yükseldiği belirlenmiştir. S100 ve K50S50 serileri hariç, kür süresi arttıkça serilerin ultrases geçiş hızlarının arttığı, dolayısıyla serilerin daha boşluksuz hale geldiği değerlendirilmiştir.
- Nehir kumu agregalı jeopolimer harç serilerinin 28 günlük kür sonundaki en yüksek eğilme dayanımı 60 °C’de S100’de, 80 °C’de ise F100’de tespit edilmiştir. Kür sıcaklığındaki artış, S bağlayıcılı serilerin eğilme dayanımını düşürürken F bağlayıcılı serilerin dayanımını artırmıştır. En düşük eğilme dayanımı her iki kür sıcaklığında da M100 serisinden, 60 °C kür sıcaklığında S100 ve 80 °C kür sıcaklığında ise F100 serisinden elde edilmiştir. Kür sıcaklığının artışı ile F ve K bağlayıcılı serilerin eğilme dayanımlarının arttığı, S ve M bağlayıcılı serilerde ise azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte kür süresindeki artış ile jeopolimer harç serilerinin eğilme dayanımlarının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Atık mermer agregalı jeopolimer harç serilerinin 28 günlük kür sonundaki en yüksek ve en düşük eğilme dayanımları 60 °C kür sıcaklığında sırasıyla; S100MA50 ve F100MA50 serisinden, 80 °C kür sıcaklığında ise sırasıyla; S100MA25 ve F100MA50 serisinden elde edilmiştir.
- S bağlayıcılı jeopolimer harç serilerinde 60 °C ve 80 °C sıcaklıkta kür uygulanması sonrası sırasıyla; %50 ve %25 oranlarında atık mermer agregası kullanımına kadar eğilme dayanımlarını arttırdığı, F bağlayıcılı jeopolimer harç serilerinde ise atık mermer agregası kullanımının her iki kür sıcaklığında da eğilme dayanımlarını düşürdüğü sonucuna varılmıştır.
- Kür süresinin artışı ile tüm jeopolimer harç serilerinin basınç dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. Farklı kür sıcaklıklarına maruz kalan jeopolimer harç serilerinden elde edilen en yüksek ve en düşük basınç dayanımı sonuçları da eğilme dayanımı sonuçlarına benzer şekilde aynı serilerden elde edilmiştir.
- Jeopolimer harç serilerinin 28 günlük kür sonundaki 60 °C kür uygulanan S bağlayıcılı serilerinde %25’ten daha fazla atık mermer agregası kullanımı basınç dayanımlarının azaltırken, 80 °C kür sıcaklığında ise tüm atık mermer agregası kullanım oranlarında basınç dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir. F bağlayıcılı serilerin her iki kür sıcaklığında da atık mermer agregası ikamesi ile basınç dayanımlarının düştüğü sonucuna varılmıştır.

- Jeopolimer harç serilerinin görünen porozite ve su emme sonuçlarından birbirine benzer değişimler elde edildiği ve aralarında güçlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Jeopolimer harç serilerinde uygulanan kür sıcaklığı arttıkça uçucu kül içeren jeopolimer harç serileri hariç su emme ve porozite değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

Çalışma sonunda; jeopolimer harç üretimlerinde K, M, S, F ve MA'nın kullanılması ile hem atık malzemelerin bertaraf edilebileceği hem de çimento esaslı kompozitlere alternatif, sürdürülebilir ve ekonomik harç üretimleri gerçekleştirilebileceği değerlendirilmiştir.

Daha sonraki yapılacak olan çalışmalarda, jeopolimer harçlarda oluşan çatlak gelişimini azaltıcı araştırmalar ile farklı kür sıcaklık ve süreleri üzerine üretim süreçlerini iyileştirici çalışmalar yapılabileceği düşünülmektedir.

## **6. Kaynaklar**

C.Meyer, Cement and Concrete Composites Volume 31, Issue 8, September 2009, Pages 601-605, "The greenin g of the concrete industry.

Zawrah, M. F., Sadek, H. E. H., Ngida, R. E., Sawan, S. A., & El-Kheshen, A. A. (2022). Effect of low-rate firing on physico-mechanical properties of unfoamed and foamed geopolymers prepared from waste clays. *Ceramics International*.

Podolsky, Z., Liu, J., Dinh, H., Doh, J. H., Guerrieri, M., & Fragomeni, S. (2021). State of the art on the application of waste materials in geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00637.

Khalil, M. G., Elgabbas, F., El-Feky, M. S., & El-Shafie, H. (2020). Performance of geopolymer mortar cured under ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 242, 118090.

Chithambaram, S. J., Kumar, S., & Prasad, M. M. (2019). Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 213, 100-108.

Katpady, D. N., Takewaka, K., Yamaguchi, T., & Akira, Y. (2020). Performance of slag based Shirasu geopolymer cured under ambient condition. *Construction and Building Materials*, 234, 117210.

El Didamony, H., Assal, H. H., El Sockary, T. M., & Abdel Gawwad, H. A. (2012). Kinetics and physico-chemical properties of alkali activated blast-furnace slag/basalt pastes. *HBRC Journal*, 8(3), 170-176.

Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., Cundy, A., & Meikle, S. (2016). Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications. *Construction and Building Materials*, 120, 198-211.

TS EN 12390-1. (2021). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12350-5. (2019). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 772-4. (2000). Kâgir Birimler, deney metotları - Bölüm 4: Tabii taş kâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12504-4. (2021). Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 196-1. (2016). Çimento test yöntemleri - Bölüm 1: Dayanımın belirlenmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Behera, S. K., Mishra, D. P., Singh, P., Mishra, K., Mandal, S. K., Ghosh, C. N., ... & Mandal, P. K. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*, 309, 125120.

Ma, Z., Tang, Q., Wu, H., Xu, J., & Liang, C. (2020). Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103758.

Islam, A., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Bashar, I. I. (2014). The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 833-841.

Mermerdaş, K., Algin, Z., Oleiwi, S. M., & Nassani, D. E. (2017). Optimization of lightweight GGBFS and FA geopolymer mortars by response surface method. *Construction and Building Materials*, 139, 159-171.

Bakharev, T. (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and concrete research*, 35(6), 1224-1232.

Chindapasirt, P., Chareerat, T., & Sirivivatnanon, V. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and concrete composites*, 29(3), 224-229

## **7. Ekler**

Bilimsel Araştırma Projesi Mali Sonuç Raporu hazırlanarak, Ek dosyada sunulmuştur.