



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Agrega türünün geopolimer betonun yüksek sıcaklık direncine etkisi

## *The effect of aggregate type on geopolymer concrete high temperature resistance*

*Yazarlar (Authors): Adil GÜLTEKİN<sup>1</sup>, Hojjat HOSSEINNEZHAD<sup>2</sup>, Kambiz RAMYAR<sup>3</sup>*

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-5267-5312

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-9846-2435

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0003-2200-2691

**To cite to this article:** Gültekin A., Hosseinnezhad H. ve Ramyar K., “Agrega türünün geopolimer betonun yüksek sıcaklık direncine etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 26(2):913-921, (2023).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Gültekin A., Hosseinnezhad H. ve Ramyar K., “Agrega türünün geopolimer betonun yüksek sıcaklık direncine etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 26(2):913-921, (2023).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.949657

# Agrega Türünün Geopolimer Betonun Yüksek Sıcaklık Direncine Etkisi

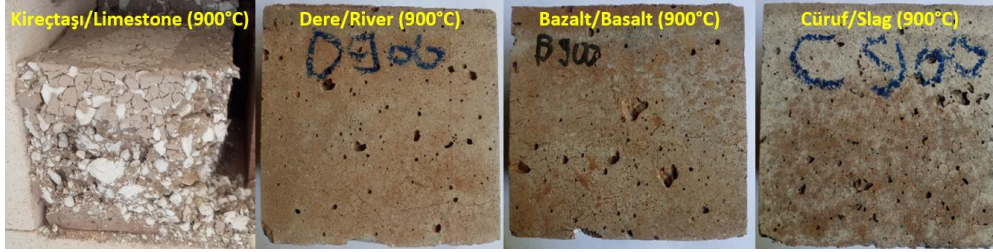
## The Effect of Aggregate Type on Geopolymer Concrete High Temperature Resistance

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Geopolimer beton üretiminde bazalt, kireçtaşı, dere ve cüruf agregaları kullanılmıştır./Basalt, limestone, river and slag aggregates were used in the production of geopolymer concrete.
- ❖ Yüksek sıcaklık etkisindeki geopolimer betonlarda, dere agregasının daha avantajlı olduğu görülmüştür./ River aggregate was found to be more advantageous in geopolymer concrete exposed to high temperature.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada 4 farklı agrega ile üretilen uçucu kül esaslı geopolimer betonların 600 ve 900°C etkisinden sonraki dayanım kayıpları kıyaslanmıştır. / In this study, the strength losses of fly ash-based geopolymer concretes produced with 4 different aggregates up on exposure to 600 and 900°C temperatures were compared.



Şekil. Deney sonrasında numuneler / Figure. Specimens after test

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı, farklı agregaların uçucu kül esaslı geopolimer betonların yüksek sıcaklık direncine etkisinin incelenmesidir./The aim of this study is to examine the effect of different aggregates on the high temperature resistance of fly ash-based geopolymer concretes.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Üretilen geopolimer betonlar 7.5 saat boyunca 600 veya 900°C etkisine maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı kayıpları tespit edilmiştir./The compressive strength losses of geopolymer concrete mixtures were determined after exposure to 600 and 900°C for 7.5 hours.

### Özgünlük (Originality)

4 farklı agrega kullanılarak üretilen geopolimer betonlarda, agrega türünün yüksek sıcaklık direncine etkisi incelenmiştir./The effect of four different types of aggregates on high temperature resistance of geopolymer concrete mixtures was investigated.

### Bulgular (Findings)

Kireçtaşı, dere, bazalt ve elektrik ark cüruf agregası ile üretilen betonların basınç dayanımları 900°C etkisinden sonra %100, 32.9, 48.5 ve 53.6 azalmıştır./The compressive strength of geopolymer concretes produced with limestone, natural river aggregate, basalt and electric arc slag aggregates decreased by 100, 32.9, 48.5 and 53.6%, respectively up on exposure to 900°C.

### Sonuç (Conclusion)

Agrega tipinin geopolimer betonlarda yüksek sıcaklık direncini etkilediği görülmüştür./It has been observed that the aggregate type affects the high temperature resistance of geopolymer concretes.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Agrega Türünün Geopolimer Betonun Yüksek Sıcaklık Direncine Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Adil GÜLTEKİN\***, **Hojjat HOSSEINNEZHAD**, **Kambiz RAMYAR**

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

(Geliş/Received : 08.06.2021 ; Kabul/Accepted : 07.04.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 25.06.2022)

## ÖZ

Beton, dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ancak çimento üretimi sırasında yüksek miktarda enerji tüketilmekte ve karbondioksit salımı yapılmaktadır. Çimentoya alternatif bağlayıcıların üretilmesi, uzun süredir üzerinde çalışılan bir konudur. Geopolimerler, çimentoya alternatif olma potansiyeli taşıyan malzemelerdir. Geopolimerlerin iyi bir yüksek sıcaklık direncine sahip oldukları bilinmektedir. Ancak hem geleneksel hem de geopolimer betonların yüksek sıcaklık dirençleri, kullanılan agreganın türü ve özelliklerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu çalışmada kireçtaşı, dere, bazalt ve cüruf agregaları kullanılarak üretilen geopolimer betonların 600 ve 900°C yüksek sıcaklık etkisine karşı dirençleri basınç dayanımı kayıpları kıyaslanarak tespit edilmiştir. 900°C sıcaklık etkisinde, kireçtaşı ile üretilen geopolimer beton tamamen parçalanırken dere, bazalt ve cüruf agregaları ile üretilen betonların %32.9, 48.5 ve 53.6 oranında basınç dayanımı kaybına uğradıkları tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer, yüksek sıcaklık direnci, agregası türü.

# The Effect of Aggregate Type on Geopolymer Concrete High Temperature Resistance

## ABSTRACT

Concrete is the most used building material in the world. However, during producing cement, a high amount of energy is consumed, and excessive carbon dioxide emissions are made. The production of alternative binders to the Portland cement has been studied for a long time. Geopolymers are materials that have the potential to be an alternative to the cement. It is well-known that geopolymers have a good high temperature resistance. However, the high temperature resistance of both conventional and geopolymer concretes is significantly affected by the type and properties of the aggregate. In this study, the resistance of geopolymer concretes produced by using limestone, river, basalt and slag aggregates to 600 and 900°C temperatures was determined by comparing their compressive strength losses. The geopolymer concrete produced with limestone aggregate was completely decomposed up on exposure to 900°C. However, the counterpart concretes produced with river, basalt and slag aggregates lost 32.9, 48.5 and 53.6% of their compressive strength, respectively.

**Keywords:** Geopolymer, high temperature resistance, aggregate typ.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Portland çimentosu üretilirken hem hammaddelerin kalsinasyonu hem de fosil yakıtların kullanılması neticesinde doğaya yüksek miktarlarda karbondioksit salımı yapılır. Beton endüstrisi, sera gazı salımının önemli miktarından sorumludur [1]. Araştırmalar 1 ton Portland çimentosu üretimi için doğaya yaklaşık olarak 1 ton karbondioksit salımı yapıldığını ortaya koymuştur [2]. Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği'nin istatistiklerine göre 2018, 2019 ve 2020 yıllarında ülkemizde yaklaşık olarak 72.5, 57.0 ve 72.3 milyon ton çimento üretimi yapılmıştır [3]. IEA'nın [4] tahminine göre ise 2019 yılında dünyada yaklaşık olarak 4.2 milyar ton çimento üretimi gerçekleşmiştir. Bu rakamlar, çimento üretiminin vermiş olduğu global zararın boyutunu göz önüne sermektedir.

90'lı yılların başlarında sürdürülebilirlik kavramı tüm mühendislik kollarında önemini arttırmıştır. Bu nedenle başta çimentolu malzemeler olmak üzere, yapı malzemesi sektöründe hem doğayı hem de doğal kaynakları koruma amaçlı çalışmaların sayısı artmıştır [5]. Çimento üretiminin neden olduğu zararları azaltmak adına puzolanların çimentoya ikame olarak kullanılması veya hiç çimento içermeyen alternatif bağlayıcıların değerlendirilmesi bu çalışmalardan bazılarıdır [1]. Geopolimerler daha sürdürülebilir beton üretimi için iyi bir alternatif olma potansiyeli taşımaktadır [6]. Geopolimerlerin düşük üretim sıcaklığı, düşük enerji tüketimi, düşük karbondioksit salımı, hızlı dayanım kazanma, asit ve yüksek sıcaklığa karşı iyi direnç gösterme gibi avantajları bulunmaktadır [7]. Geleneksel beton yerine geopolimerlerin kullanılması, bir yandan çimento üretiminin doğaya vermiş olduğu zararı, diğer yandan da uçucu kül gibi sanayi atıklarının sebep olduğu kirliliği azaltacaktır [8]. Ayrıca geopolimerlerin ekonomik yönü de dikkat çekmektedir. Lloyd ve Rangan'ın [9] yapmış olduğu çalışma, uçucu kül esaslı

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : adilgultekin05@gmail.com

geopolimer betonun, geleneksel betondan %10-30 oranında daha ucuza imal edilmesinin mümkün olduğu ortaya koymuştur.

Yangın, lav ve nükleer erime gibi farklı etkenlerden kaynaklanan yüksek sıcaklık (YS)ların, betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde önemli derecede olumsuz etkisi olduğu bilinmektedir [10]. Yapılan araştırmalar, geopolimer betonların geleneksel betondan daha iyi bir YS direncine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ancak her ne kadar geopolimer hamurların ve bir noktaya kadar da geopolimer harçların YS dirençleri iyi olsa da geleneksel agregaların kullanılması, üretilen geopolimer betonların YS direncini azaltmaktadır [11]. Agregalar, beton hacminin %60-80'ini oluşturmakta olup betonun termal özellikleri üzerinde çok önemli etkiye sahiptir [12]. Agreganın minerolojik kompozisyonu ve gözenekliliğinin betonun YS direncine önemli etkisi olduğu bilinmektedir. Agreganın tane boyutu, geçirirliliği, rutubet içeriği ve ısınma hızına bağlı olarak, agrega tanesinin kendisi yüksek sıcaklığa karşı dirençsiz olabilmekte ve betonda parça atmaya yol açabilmektedir. Bu sebeple agrega türü, betonun yangın direnci üzerinde önemli derecede etkiye sahiptir [13].

Betonun yüksek sıcaklığa direncini belirlemek için uygulanan deneylerin sonucu, betonun içerdiği rutubet miktarı ve agrega özellikleri ile etkiyen gerilme seviyesi ve etki süresi gibi çok sayıda ve aynı zamanda etkili olan faktöre bağlı olarak değişebilmektedir [14]. Betonun YS direncini belirlemek için uygulanan deney yönteminin detayları, deney sonuçlarını etkileyen bir faktör olmasına karşın çoğu çalışmada deney detayları yeterli ölçüde açıklanmamaktadır. Bu nedenle, literatürdeki sonuçlar oldukça farklı hatta çelişkili yorumlara neden olmaktadır. Örneğin, Neville [14], 600°C sıcaklık etkisinde kalan geleneksel betonun, arta kalan basınç dayanımının, orijinal dayanımının %38'i ile %69'u arasındaki geniş bir bantta değiştiğini belirtmiştir.

Granit ve kumtaşı gibi silisi agregalardaki kuvars, yaklaşık olarak 570°C'de  $\beta$ -kuvars dönüşmektedir. Bu dönüşüm sırasında kuvarsın ani olarak %0.85 mertebesinde hacim genişemesi gösterdiği ve bunun çeşitli sorunlara yol açtığı da bilinmektedir [13]. Kalsitin yaklaşık olarak 870°C ve dolomitin ise yaklaşık olarak 800°C'de yaşamış oldukları dekompozisyon da agregaların kimyasal bozulmasına örnek olarak gösterilebilir [15]. Agreganın olası faz dönüşümleri ve termal bozulmasına ek olarak, minerolojisi, agrega ile matris arasındaki farklı termal genişleme ve arayüzün dayanımını belirlediğinden betonun yangına karşı direncini etkilemektedir [13].

Geopolimer beton üretiminde kullanılan farklı türdeki agregaların, geopolimer betonların YS direncine olan etkisi ile ilgili literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır. Şahin vd., [16] farklı kumlar kullanılarak üretilen yüksek fırın cürufu ve metakaolin esaslı geopolimer harçların YS davranışını incelemiştir. Bu kapsamda RILEM kumu, atık betondan elde edilmiş kum, nehir kumu, kumtaşı kumu, silis kumu ve bazalt

kumu kullanılmıştır. 200, 400, 600 ve 800°C'de yapılan YS direnci deneyleri sonrasında, bazalt kumu ile üretilen harçlardan arta kalan basınç dayanımı değerlerinin, diğerlerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 800°C sıcaklık etkisinden sonra atık betondan elde edilen kum kullanılarak üretilen harç tamamen parçalanırken, bazalt kumu kullanılarak üretilen harcın 26.3 MPa gibi kayda değer bir basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Silis kumu ile üretilen harç yaklaşık olarak 20 MPa dayanıma sahipken dere kumu ve kumtaşı içeren harçlar 15 MPa'dan, RILEM kumu içeren harç ise 10 MPa'dan daha düşük dayanım göstermiştir. Kong ve Sanjayan'ın [17] çalışmasında ise F sınıfı uçucu kül, sodyum silikat ve potasyum hidroksit kullanılarak üretilen geopolimer betonların YS direnci incelenmiştir. Çalışmada, iri agrega olarak cüruf ve bazalt, ince agrega olarak ise nehir kumu kullanılmıştır. 800°C sıcaklığın etkisi ile bazalt agrega ile hazırlanan geopolimer betonun basınç dayanımı 70.5 MPa'dan 29.3 MPa'a inerken (%58.4 azalış), cüruf ile hazırlanan betonun dayanımı 61.8 MPa'dan 21.9 MPa'a düşmüştür (%64.6 azalış). Araştırmacılar, bu farkın agregaların termal genişlemelerinin farklı olmasından kaynaklandığını belirtmiştir.

Agrega türünün geopolimer betonların YS direncine etkisi ile ilgili az sayıda çalışma bulunması, YS direnci konusunda geleneksel betona kıyasla avantajlı olduğu bilinen geopolimerlerin bu konudaki avantajlarının anlaşılmasının önüne geçmiştir. Bu çalışmada; kireçtaşı, dere, bazalt ve elektrik ark cüruf agregası kullanılarak üretilen geopolimer betonların YS etkisi sonrasındaki basınç dayanımları incelenmiş ve agregaların YS direncine etkisi araştırılmıştır. Çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Öncelikle farklı Ms oranları (aktivatör çözeltilisindeki  $\text{SiO}_2$ 'nin  $\text{Na}_2\text{O}$ 'ya ağırlıkça oranı) ve farklı  $\text{Na}_2\text{O}$  yüzdeleri (aktivatör çözeltilisindeki  $\text{Na}_2\text{O}$ 'nun uçucu küle ağırlıkça oranı) kullanılarak geopolimer harçlar üretilmiştir. Bu harçların farklı kür koşullarındaki basınç dayanımları incelenmiş ve en yüksek basınç dayanımının elde edildiği karışım ve kür rejimi tespit edilmiştir. Çalışmanın devamında bu bilgiler kullanılarak üretilen geopolimer betonların YS dirençleri araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Materyal (Materials)

#### 2.1.1. Uçucu kül (Fly ash)

Çalışmada alüminosilikat olarak İzmir/Aliağa'da faaliyet gösteren İzdemir Enerji Termik Santrali'nden temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal bileşim ve bazı fiziksel özellikler Çizelge 1'de sunulmuştur.

**Çizelge 1.** Uçucu küle ait bazı özellikler / Some properties of fly ash

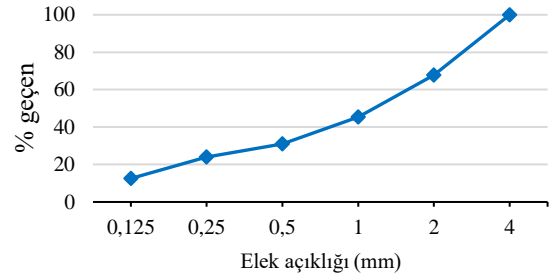
Bileşen	%	Özellik	Değer
SiO <sub>2</sub>	49.12	45 µm elek bakiyesi	%23.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.05	Hacim genişmesi	1 mm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.42	Serbest kireç	%0.08
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	76.6	Özgül ağırlık	2.18
CaO	2.82	Dayanım aktivite indeksi	28 gün %76.0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.29		90 gün %86.2
MgO	1.69		
SO <sub>3</sub>	0.14		
Na <sub>2</sub> O	1.21		
K <sub>2</sub> O	2.17		
TiO <sub>2</sub>	0.68		
Cl	0.1		
Kızdırma kaybı	5.8		

### 2.1.2. Aktivatör çözeltisi (Activator solution)

Aktivatör çözeltisinin hazırlanmasında yerel firmalardan temin edilen, %28.22 SiO<sub>2</sub>, %11.32 Na<sub>2</sub>O ve %60.46 H<sub>2</sub>O içeren çözelti şeklindeki sodyum silikat ile %98 oranında saf olan pelet şeklindeki sodyum hidroksit kullanılmıştır.

### 2.1.3. Agregat (Aggregate)

Harç karışımlarının hazırlanmasında özgül ağırlığı 2.70, su emme kapasitesi %1.2 olan kireçtaşı kırma kum kullanılmış olup kuma ait gradasyon Şekil 1'de sunulmuştur. Geopolimer betonların hazırlanmasında ise en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan kireçtaşı kırma agregatı, dere agregatı, bazalt kırma agregatı ve cüruf agregatı kullanılmıştır. Bazalt agregatı, İzmir/Aliağa; kireçtaşı agregatı, İzmir/Kemalpaşa bölgelerinde faaliyet gösteren taş ocağı işletmelerinden alınmıştır. Dere agregatı İzmir merkezli bir firmadan temin edilmiş olup Toros Dağları'ndaki derelerde oluşmuştur. Cüruf agregatı ise, demir-çelik sektöründe faaliyet gösteren İzmir merkezli bir firmada atık ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Kullanılan agregatların su emme kapasiteleri ve özgül ağırlıkları Çizelge 2'de gösterilmiştir. Agregatlar, çeşitli açıklıktaki eleklerden elenerek ayrı ayrı depolanmış (0-4, 4-8 ve 8-16 mm elek aralıklarında) ve birbirlerine yakın gradasyona sahip olacak şekilde boyut dağılımları ayarlanmıştır. Beton karışımlarının oluşturulmasında kullanılan agregatların tane boyutları Şekil 2'de gösterilen mavi bant içerisinde kalmaktadır.

**Şekil 1.** Harç karışımlarında kullanılan kuma ait gradasyon / Gradation of sand used in mortar mixtures

### 2.1.4. Su (Water)

Harç ve beton karışımlarının hazırlanmasında İzmir şehir şebekesi suyu kullanılmıştır.

### 2.2. Metot (Method)

#### 2.2.1. Harç karışımlarının hazırlanması (Preparation of mortar mixtures)

Pelet şeklindeki sodyum hidroksit, sodyum silikat çözeltisi içinde karıştırma yöntemi ile çözdürülerek 1.25, 1.50, 1.75 ve 2.00 Ms oranlarında aktivatör çözeltileri elde edilmiştir. Hazırlanan çözelti 24 saat dinlendirildikten sonra kullanılmıştır. Harç karışımları hazırlanırken hedef yayılma çapı 19±0.5 cm, kum/uçucu kül oranı 2.7, aktivatördeki toplam Na<sub>2</sub>O'nun uçucu küle ağırlıkça oranı ise %6, 9 ve 12 olarak seçilmiştir. Hedef yayılma çapının sağlanabilmesi için bazı karışımlara farklı miktarlarda su ilavesi yapılmıştır.

Harç karışımları, laboratuvar tipi harç mikserinde hazırlanmıştır. Sırası ile kum, uçucu kül, aktivatör ve karışımda var ise su, karıştırıcıya koyulmuştur. Karıştırıcı 90 saniye düşük hızda çalıştırdıktan sonra durdurulmuş, kabın çeperine yapışan malzemeler bir spatula yardımı ile sıyrılmış ve mikser 90 saniye daha, düşük hızda çalıştırılmıştır. Harç karışımları oluşturulduktan sonra TS EN 459-2 [18] Standartı'na uygun olarak yayılma çapları tespit edilmiştir. Harçlar iki tabakada, her tabaka 10 defa tokmakla sıkıştırılarak kesik koniye yerleştirilmiş, sonrasında koni çekilerek 15 saniyede 15 düşüş yapılmıştır. Birbirine dik iki doğrultudan yayılma çapları ölçülmüş ve ortalamaları rapor edilmiştir. Karışımlar, 50 mm ayrıtlı küp kalıplara 2 tabakada yerleştirilmiş, her tabaka 25 defa sarsma tablasından düşürülmüş, devamında numunelerin yüzeyleri bir spatula ile düzeltilmiştir. Hazırlanan numuneler etüv veya ortam kürlenmesine tabi tutulmuştur. Laboratuvar ortamında (~25°C, ~%50 bağıl nem) kürlenmiş numuneler dökümden sonra 1 gün ortam koşullarında bekletilmiş, devamında kalıplarından çıkartılarak 4 veya 179 gün daha ortam şartlarında kürlenmiştir. Etüvde kürlenmiş numuneler ise dökümden sonra herhangi bir süre bekletilmeksizin kalıpları ile birlikte laboratuvar tipi hava dolaşimli etüvde 45°C veya 60°C'de, 3 veya 5 gün kürlenmiştir. Kür süresi sonunda numuneler etüvden alınarak laboratuvar ortamında bekletilmiş, ortam sıcaklığına soğuyan numuneler kalıplarından çıkartıldıktan hemen sonra basınç dayanımı



boyunca kürlenmiştir. Beton karışımlarına ait malzeme miktarları, teorik birim hacim ağırlık (BHA) ve çökme değerleri Çizelge 4'te, gerçek karışım miktarları ve ölçülen BHA değerleri ise Çizelge 5'te gösterilmiştir. Karışımlar agrega türüne göre K (kireçtaşı agregası içeren), D (dere agregası içeren), B (bazalt agregası içeren) ve C (cüruf agregası içeren) olarak gösterilmiştir. Betonların BHA'ları TS EN 12350-6 [19], çökme değerleri ise TS EN 12350-2 [20] standartı baz alınarak tespit edilmiştir.

### 2.2.3. Deneyler (Tests)

#### 2.2.3.1. Basınç dayanımı deneyleri (Compressive strength tests)

Harç ve beton numunelerin basınç dayanımı deneyleri, 200 ton kapasiteli beton presinde gerçekleştirilmiştir. Harç numunelerin kırılmasında yükleme hızı 0.9 kN/s, beton numunelerin kırılmasında ise yükleme hızı 3.0 kN/s olarak alınmıştır.

#### 2.2.3.2. Yüksek sıcaklık deneyleri (High temperature tests)

YS deneyleri 1175°C'ye ulaşabilen fırında gerçekleştirilmiştir. Fırının sıcaklık artış hızı 20°C/dk., hedef sıcaklıklar 600 ve 900°C ve hedef sıcaklıkta bekletme süresi, uzun süreli yakma etkisinin incelenbilmesi amacıyla 7.5 saat olarak seçilmiştir. 7.5 saatlik yakma süresinden sonra numunelerin oda sıcaklığına soğumaları beklenmiştir. Bu süreçte fırın kapağı kapalı tutulmuştur. Numuneler, oda sıcaklığına soğuduktan sonra fırının kapağı açılmış ve numuneler 24 saat daha bekletilmiştir. Devamında basınç dayanımı deneyi yapılmıştır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

### 3.1. Geopolimer Harçların Basınç Dayanımları

(Compressive Strengths of Geopolymer Mortars)

Ortam koşullarında kürlenmiş harç karışımlarına ait basınç dayanımları Şekil 3'te gösterilmiştir. Tüm Ms oranları ve Na<sub>2</sub>O yüzdeleri ile hazırlanan karışımlarda, beklendiği gibi, 5 günlük ortam kürlenmesinde düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Kür süresinin 180 güne çıkması ile basınç dayanımlarında da yükselme görülmüştür. Ortam kürlenmesinde hem 5 hem de 180 gün için en yüksek basınç dayanımları 1.25 Ms oranı ve %9 Na<sub>2</sub>O içeriğinde elde edilmiş, Ms oranının artması ile basınç dayanımlarında kademeli düşüşler görülmüştür. Aynı Ms oranında ise Na<sub>2</sub>O yüzdesinin 6'dan 9'a artması ile basınç dayanımları yükselmiş, 9'dan 12'ye artması ile ise dayanımlar azalmıştır.

Etüvde kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları Şekil 4 ve 5'te sunulmuştur. Görüldüğü üzere kür sıcaklığının artışı ile basınç dayanımlarında ciddi artışlar olmuştur. Genel eğilim, aynı Ms oranı ile hazırlanan numunelerde Na<sub>2</sub>O yüzdesinin artması ile basınç dayanımının artması şeklindedir. Aynı Na<sub>2</sub>O yüzdesinde ise Ms oranı arttıkça dayanımın da genelde azaldığı görülmüştür.

SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı, Ms oranı veya kullanılan sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının geopolimer beton/harç veya hamurların basınç dayanımı üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Cho vd., uçucu kül esaslı geopolimer hamurlar hakkındaki çalışmada, sabit Ms oranında Na<sub>2</sub>O yüzdesinin artışının basınç dayanımını arttırdığını tespit etmiştir. Bunun, Na<sub>2</sub>O miktarının yükselmesi ile uçucu külün çözünürlüğünün artmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. Araştırmacılar

Çizelge 4. Betonların teorik karışım oranları ve bazı özellikleri / Theoretical mix proportions and some properties of concrete mixtures

Karışım kodu	Malzeme miktarı (kg/m <sup>3</sup> )						Teorik BHA kg/m <sup>3</sup>	Çökme (cm)
	Uçucu Kül	Sodyum Silikat	Sodyum Hidroksit	İnce Agregat DYK	İri agregat DYK	İlave Su		
K	344.9	183.5	26.7	830.2	993.9	9.1	2388.3	17.2
C	332.7	177.1	25.7	1375.5	1014.8	6.8	2932.7	16.7
B	361.4	192.4	27.9	820.9	1036.4	9.5	2448.5	17.1
D	355.9	189.4	27.5	834.7	976.6	9.4	2393.5	17.3

Çizelge 5. Betonların düzeltilmiş karışım oranları / Corrected mix proportions of concrete mixtures

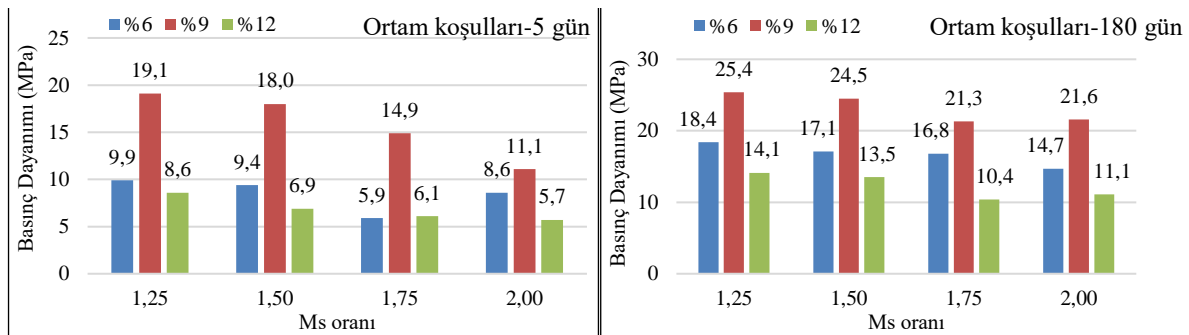
Karışım kodu	Malzeme miktarı (kg/m <sup>3</sup> )						Taze BHA kg/m <sup>3</sup>	Çökme (cm)
	Uçucu Kül	Sodyum Silikat	Sodyum Hidroksit	İnce Agregat DYK	İri agregat DYK	İlave Su		
K	337.2	179.4	26.1	811.7	971.7	8.9	2335	17.2
C	327.1	174.1	25.3	1352.2	997.6	6.6	2883	16.7
B	346.3	184.3	26.8	786.5	993.0	9.1	2346	17.1
D	354.6	188.8	27.4	831.8	973.1	9.4	2385	17.3

sabit Na<sub>2</sub>O yüzdesinde Ms oranının 0.8'den 1.4 ve 2.0'ye yükselmesi ile basınç dayanımının önce arttığını, sonra azaldığını gözlemlemiştir [21]. Bocullo vd., SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranındaki artış ile basınç dayanımında artış yaşandığını, ancak optimum bir değerden sonra dayanımın azaldığını belirtmiştir [22]. Morsy vd., ağırlıkça 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 sodyum silikat/sodyum hidroksit oranlarına sahip aktivatörler kullanarak hazırladığı uçucu kül esaslı geopolimer harçlarda, bu oranın artışı ile dayanımın önce arttığını optimum değerden sonra ise düşüşe geçtiğini, optimum oranın ise 1 olduğunu raporlamıştır. Araştırmacılar, aktivatör çözeltisinde bulunan SiO<sub>2</sub> miktarındaki artışın, suyun buharlaşmasını ve geopolimer yapısının oluşmasını zorlaştırdığını da belirtmiştir [7]. Şekil 4 ve Şekil 5 incelendiğinde bu çalışmalara benzer şekilde Ms oranı arttıkça (SiO<sub>2</sub> oranı yükseldikçe) dayanımın azaldığı görülmektedir. Saloma vd., 2.50, 2.75, 3.00, 3.25; Doğan-Sağlamtimur vd. ise 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 sodyum silikat/sodyum hidroksit oranları ile ürettikleri geopolimer harçlarda, basınç dayanımlarının optimum bir sodyum silikat/sodyum hidroksit oranına kadar arttığını, bu değerden sonra ise düşüşe geçtiğini gözlemlemiştir [23, 24]. Saloma vd., optimum değer 2.75, Doğan-Sağlamtimur vd. ise 2 olduğunu belirtmiştir. Bu araştırmaların tamamının farklı kimyasal, fiziksel, morfolojik özellikteki alüminosilikatlar, farklı niteliklerdeki aktivatörler ve farklı kürleme şartlarında yapıldığı dikkate alındığında, her çalışmada farklı optimum oranların bulunmasının şaşırtıcı olmadığı anlaşılmaktadır. Ancak bu

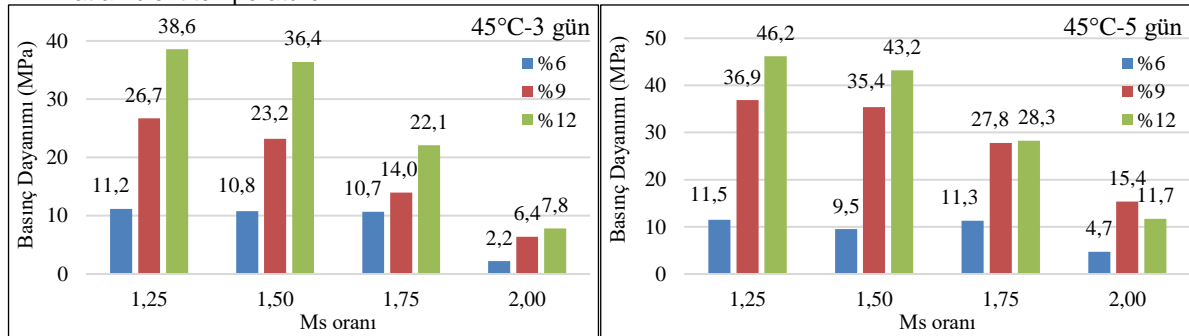
farklılıkların arasında, genel eğilimlerin benzer olduğu görülmektedir. Sunulan bu çalışmada da etüv kürlemesi ile üretilen harçlarda aynı Na<sub>2</sub>O yüzdesinde Ms oranı arttıkça genel eğilim basınç dayanımlarının azalması şeklindeyken, aynı Ms oranında Na<sub>2</sub>O yüzdesi arttıkça basınç dayanımları genelde yükselmiştir. En yüksek basınç dayanımları tüm etüv rejimlerinde, 1.25 Ms oranı ve %12 Na<sub>2</sub>O miktarında elde edilmiştir. Beton deneyleri için bu sebeple 1.25 Ms oranı - %12 Na<sub>2</sub>O miktarı ile 60°C-3 gün kürleme seçenekleri seçilmiştir.

### 3.2. Geopolimer Betonların Yüksek Sıcaklık Direnci (High Temperature Resistance of Geopolymer Concretes)

Kontrol betonları ile yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer betonların basınç dayanımları Şekil 6'da, bağıl basınç dayanımları ise Şekil 7'de gösterilmiştir. 600 ve 900°C YS etkisi ile beklendiği üzere basınç dayanımlarında azalışlar görülmüştür. Sıcaklığın 600°C'ye yükselmesi ile kireçtaşı, dere, bazalt ve cüruf ile hazırlanan betonlar sırası ile %56.9, %31.1, %54.1 ve %37.4 oranlarında dayanım kaybetmiştir. Sıcaklığın 900°C'ye yükselmesi, dere ve bazalt agregası ile hazırlanan betonların dayanımlarında ciddi bir değişiklik yaratmazken, sıcaklığın yükselmesiyle cüruf agregası kullanılarak üretilen betonun dayanımı %25.8 oranında azalmıştır. Kireçtaşı ile hazırlanan beton ise Şekil 8'de gösterildiği üzere soğuduktan sonra etüv içerisinde parçalanmış ve basınç dayanımı deneyi yapılamamıştır. Bunun muhtemel nedeninin kireçtaşının



Şekil 3. Ortam sıcaklığında kürlenen numunelerin basınç dayanımları / Compressive strength of specimens cured at ambient temperature



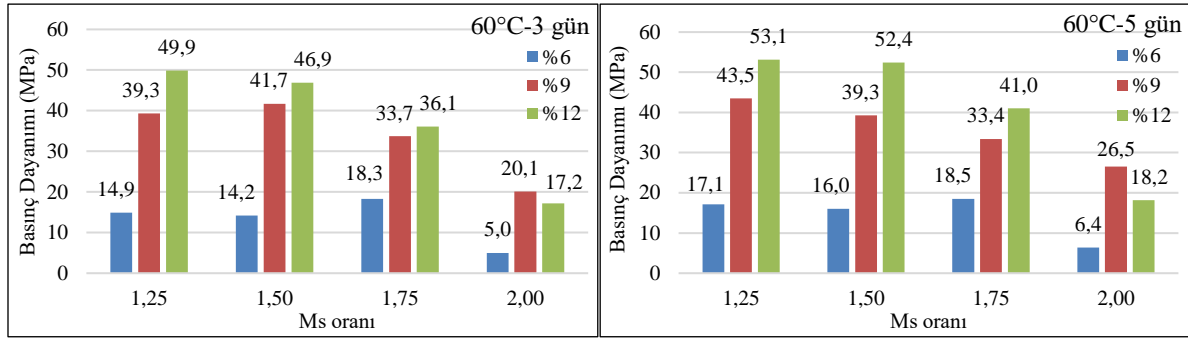
Şekil 4. 45°C'de etüvde kürlenen harç numunelerin basınç dayanımları / Compressive strength of mortar specimens oven-cured at 45°C



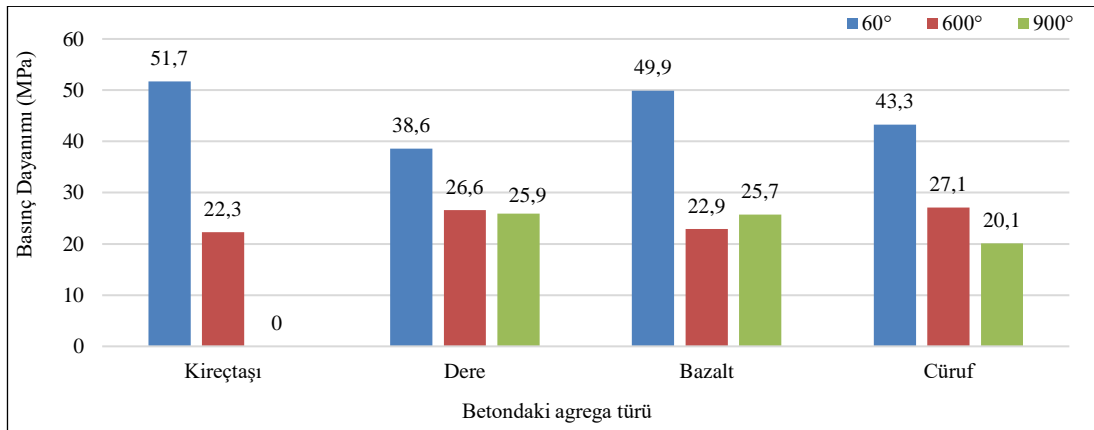
dekarbonizasyonu ve sonrasında bekletilme aşamasında kalsiyum oksit, kalsiyum hidroksit dönüşmesi sonucu ortaya çıkan genleşme olduğu düşünülmektedir. 900°C sıcaklık etkisinde, basınç dayanımı bakımından en olumlu performansı dere agregası göstermiştir. Dere agregası ile üretilen beton, 900°C sıcaklık etkisi ile basınç dayanımının %32.9'unu kaybederken bu değerler bazalt ve cüruf agregası ile üretilen betonlarda %48.5 ve %53.6 olmuştur.

Abdelalim vd. [25], iri agrega türünün geleneksel ve kendiliğinden yerleşen betonun YS direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında en büyük tane boyutu 20 mm olan dere, dolomit ve bazalt agregası kullanılmıştır. 800°C'de 2 saat maruziyet sonrasındaki basınç dayanımları incelendiğinde, değerlerin yakın olduğu ancak en iyi sonucun dolomit agregası, en düşük dayanımın ise dere agregası ile hazırlanan betonlarda elde edildiği görülmüştür. Yapılan bu çalışmada, Abdelalim vd.'nin çalışmasından farklı olarak dere

agregası ile üretilen geopolimer betonların YS direncinin diğer agregalar ile üretilen betonlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun, farklı bölgelerden temin edilen dere agregalarının fiziksel ve minerolojik özelliklerindeki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Neter vd. [26], geleneksel betonda dolomit ve iki farklı çelik cürufu agregasının YS direncine etkisini incelemiştir. İnce agrega olarak dolomit, iri agrega olarak ise dolomit veya cüruf kullanılmıştır. Sonuçta, 800°C'de 1 saat maruziyet sonrasında dolomit agregası ile üretilen beton, basınç dayanımının %56'sını kaybederken bu değerler iki cüruf agregasında %71 ve %73 olarak tespit edilmiştir. Cüruf betonda iyi bir YS direnci elde edilememesinin, cürufun termal genleşme katsayısının yüksek olmasından ve bu sebeple de agrega-hamur arayüzünün yüksek sıcaklık etkisi ile zarar görmesinden kaynaklandığı iddia edilmiştir. Sunulan bu çalışmada ise cüruf agregası, dere ve bazalt agregasından daha kötü bir YS direnci performansı sergilese de 900°C'deki kayıp sadece %53.6

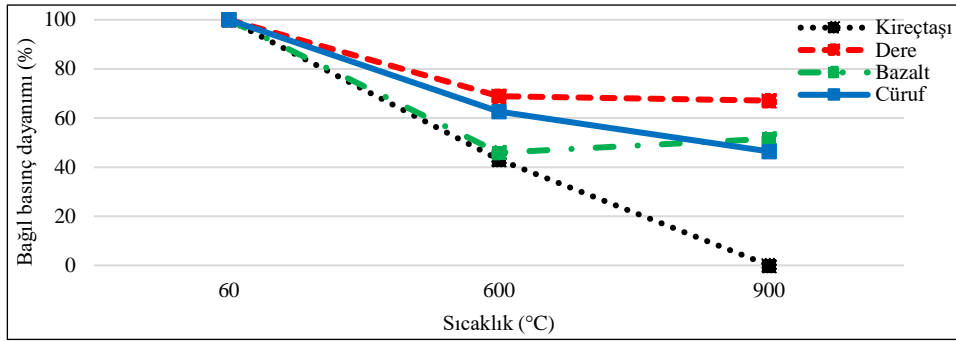


**Şekil 5.** 60°C'de etüvde kürlenmiş harç numunelerinin basınç dayanımları / Compressive strength of mortar specimens oven-cured at 60°C



**Şekil 6.** 600 ve 900°C sıcaklığa maruz kalan geopolimer betonların basınç dayanımı / Compressive strength of geopolimer concretes exposed to 600 and 900°C

mertebesindedir ve bu agrega ile üretilen geopolimer uygun Ms oranının 1.25, en uygun Na<sub>2</sub>O miktarının ise



Şekil 7. 600 ve 900°C sıcaklığa maruz kalan geopolimer betonların bağıl basınç dayanımları / Relative compressive strength of geopolimer concretes exposed to 600 and 900°C

beton hala ciddi bir dayanım göstermektedir.



Şekil 8. 900°C sıcaklık etkisinden sonra farklı agregalar ile hazırlanan numuneler (a: kireçtaşı, b: dere, c: bazalt, d: cüruf) / Specimens produced with different aggregates after exposure to 900°C (a: limestone, b: river, c: basalt, d: slag)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada kullanılan malzeme ve deney yöntemleri göz önüne alındığında;

- Ortam sıcaklığında kürlenmiş F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer harçların dayanım kazanma hızlarının etüv kürüne göre düşük olduğu, 180 günlük kür süresinde bile maksimum 25 MPa civarında bir dayanım kazanılabildiği,
- Etüv kürlenmesi yapılan geopolimer harçlarda, 60°C gibi nispeten düşük kür sıcaklıklarında ve 5 gün gibi kısa sayılabilecek bir kür süresinde (geleneksel çimento harcına kıyasla) 53.1 MPa gibi bir basınç dayanımının elde edilmesinin mümkün olduğu,
- Etüv kürü uygulanan numunelerde Ms oranının azalışı ve Na<sub>2</sub>O yüzdesinin artışı ile ulaşılabilecek basınç dayanımlarının arttığı, basınç dayanımı açısından en

%12 olduğu,

- Farklı türdeki agregaların benzer geopolimer beton karışımlarında bile basınç dayanımını ciddi oranda etkileyebildiği, kireçtaşı ve bazalt kullanılarak üretilen geopolimer betonların dayanımlarının dere agregası ve cüruf kullanılarak üretilenlerden daha yüksek olduğu,
- Kireçtaşı kullanılarak üretilen ve 900°C etkisine maruz kalan geopolimer betonların yüksek sıcaklık deneyinin tamamlanmasından sonra tamamen parçalandığı; bazalt, cüruf ve dere agregası kullanılarak üretilen geopolimer betonların ise hem 600°C hem de 900°C etkisinden sonra bile dayanımlarının önemli bölümünü korudukları,
- Geopolimer matrisin 900°C gibi yüksek bir sıcaklıkta bile stabilitesini koruduğu ve parçalanmadığı tespit edilmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Malzeme teminindeki yardımlarından ötürü Kılıçlar A.Ş.'ye teşekkürlerimizi sunarız.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZAR KATKILARININ BEYANI (STATEMENT OF AUTHOR CONTRIBUTIONS)

**Adil GÜLTEKİN:** Makale yazımı, karışım tasarımlarının yapılması, laboratuvar çalışmasının gerçekleştirilmesi.

**Hojjat HOSSEINNEZHAD:** Karışım tasarımlarının yapılması, laboratuvar çalışmasının gerçekleştirilmesi.

**Kambiz RAMYAR:** Makale yazımı, deney planlaması, karışım tasarımlarının yapılması.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- [1] Behforouz B., Balkanlou V.S., Naseri F., Kasehchi E., Mohseni E. and Ozbakkaloglu T., "Investigation of eco-friendly fiber-reinforced geopolymer composites incorporating recycled coarse aggregates", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17: 3251-3260, (2020).
- [2] Vikas G. and Rao T.D.G., "Setting time, workability and strength properties of alkali activated fly ash and slag based geopolymer concrete activated with high silica modulus water glass", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45: 1483-1492, (2021).
- [3] Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği, İstatistikler, <https://www.turkcimento.org.tr/tr/istatistikler/aylik-veriler>, (2021) Erişim tarihi: 15 Nisan 2021
- [4] International Energy Agency, Cement reports, <https://www.iea.org/reports/cement>, (2020). Erişim tarihi: 15 Mayıs 2021
- [5] Ng C., Alengaram U.J., Wong L.S., Mo K.H., Jumaat M.Z. and Ramesh S., "A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete", *Construction and Building Materials*, 186: 550-576, (2018).
- [6] Kumar M., Saxena S.K. and Singh N.B., "Influence of some additives on the properties of fly ash based geopolymer cement mortars", *SN Applied Sciences*, 1: 481, (2019).
- [7] Morsy M.S., Alsayed S.H., Al-Salloum Y. and Almusallam T., "Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39: 4333-4339, (2014).
- [8] Joseph B. and Mathew G., "Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete", *Scientia Iranica*, 19(5): 1188-1194, (2012).
- [9] Lloyd N.A. and Rangan B.V., "Geopolymer Concrete with Fly Ash", *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Ancona, Italy, (2010).
- [10] Kushnir A.R.L., Heap M. J., Griffiths L., Wadsworth F.B., Langella A., Baud P., Reuschle T., Kendrick J.E. and Utley J.E.P., "The fire resistance of high-strength concrete containing natural zeolites", *Cement and Concrete Composites*, 116: 103897, (2021).
- [11] Junaid M.T., Khennane A. and Kayal O. "Performance of fly ash based geopolymer concrete made using non-pelletized fly ash aggregates after exposure to high temperatures", *Materials and Structures*, 48: 3357-3365, (2015).
- [12] Sanket R., Aniruddha T., Bahurudeen A. and Appari S., "Performance of concrete during fire exposure-a Review", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 4(3): 1-8, (2016).
- [13] Metha P.K. and Monteiro P.J.M., "Concrete, Microstructure, Properties and Materials", Third edition, **McGraw-Hill Education**, New York, USA, (2006).
- [14] Neville A.M., "Properties of Concrete", Fifth edition, **Pearson**, India, (2013).
- [15] Broceta G., Malesev M., Radonjanni V., Slijepcevic M. and Zmic D., "The influence of aggregate types on the concrete fire resistance", *1st International Symposium Knowledge For Resilient Society K-FORCE 2017*, Novi Sad, Serbia, (2017).
- [16] Şahin F., Uysal M. and Canpolat O., "Systematic evaluation of the aggregate types and properties on metakaolin based geopolymer composites", *Construction and Building Materials*, 278: 122414, (2021).
- [17] Kong D.L.Y. and Sanjayan J.G., "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete", *Cement and Concrete Research*, 40: 334-339, (2010).
- [18] TS EN 459-2, "Yapı kireci - Bölüm 2: Deney metotları", (2012).
- [19] TS EN 12350-6, "Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 6: Birim hacim kütlesi", (2019).
- [20] TS EN 12350-2, "Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi", (2019).
- [21] Cho Y.K., Yoo S.W., Jung S.H., Lee K.M. and Kwon S.J., "Effect of Na<sub>2</sub>O content, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O molar ratio, and curing conditions on the compressive strength of FA-based geopolymer", *Construction and Building Materials*, 145: 253-260, (2017).
- [22] Bocullo V., Vitola L., Vaiciukyniene D., Kantautas A. and Bajare D., "The influence of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio on the low calcium alkali activated binder based on fly ash", *Materials Chemistry and Physics*, 258: 123846, (2021).
- [23] Saloma, Hanafiah, Elysandi D.O. and Meykan D. G., "Effect of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH on mechanical properties and microstructure of geopolymer mortar using fly ash and rice husk ash as precursor", *Proceedings of the 3rd International Conference on Construction and Building Engineering (ICONBUILD)*, Palembang, Indonesia, (2017).
- [24] Doğan-Sağlamtimur N., Öz H.Ö., Bilgil A., Vural T. and Süzgeç E., "The effect of alkali activation solutions with different water glass/NaOH solution ratios on geopolymer composite materials", *Materials Science and Engineering*, 660: 012003, (2019).
- [25] Abdelalim A.M.K., Abdel-Aziz G.E., El-Mohr M.A.K. and Salama G.A., "Effect of aggregate type on the fire resistance of normal and self-compacting concretes", *Engineering Research Journal*, 122: 47-62, (2009).
- [26] Netinger I., Bjegovic D. and Mladenovic A., "Fire Resistance of Steel Slag Aggregates Concrete", *High Temperature Materials and Processes*, 29: 77-87, (2010).