



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

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

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



# Tek bileşenli geopolimer betonun erken yaş basınç dayanımına farklı kür sıcaklıklarının etkisi

## *The effect of different curing temperatures on the early-age compressive strength of one-part geopolymer concrete*

Yazar(lar) (Author(s)): Tuğba ÖZDEMİR MAZLUM<sup>1</sup>, Nihat ATMACA<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-0895-8742

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-3355-7561

**To cite to this article:** Özdemir Mazlum T., and Atmaca N., “Tek Bileşenli Geopolimer Betonun Erken Yaş Basınç Dayanımına Farklı Kür Sıcaklıklarının Etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 29(3):290304:1-10 (2026).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Özdemir Mazlum T. ve Atmaca N., “Tek Bileşenli Geopolimer Betonun Erken Yaş Basınç Dayanımına Farklı Kür Sıcaklıklarının Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 29(3):290304:1-10 (2026).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.1638100

# Tek Bileşenli Geopolimer Betonun Erken Yaş Basınç Dayanımına Farklı Kür Sıcaklıklarının Etkisi

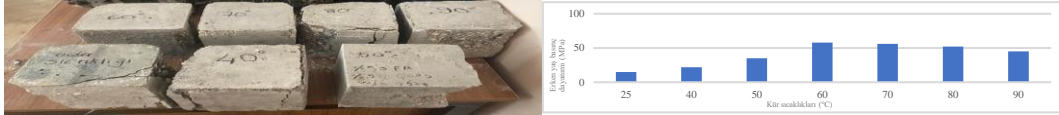
## The Effect of Different Curing Temperatures on the Early-Age Compressive Strength of One-Part Geopolymer Concrete

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Tek bileşenli geopolimer üretiminde alümina silika malzeme olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. / In the production of innovative one-part geopolymer, fly ash and ground granulated blast furnace slag were used as alumina silicate materials.
- ❖ Sıcaklık kürünün tek bileşenli geopolimer betonlarda erken yaş basınç dayanımını arttırdığı görülmektedir. / It has been observed that temperature curing enhances the early strength of one part geopolymer concretes.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada oda sıcaklığı (yaklaşık 25 °C), 40 °C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C sıcaklık kürlerine tabi tutulmuş %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu kullanılarak elde edilmiş tek bileşenli geopolimer betonların erken yaş basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. / In this study, the early age compressive strengths of one-part geopolymer concretes, produced using 50% fly ash and 50% ground granulated blast furnace slag and subjected to temperature curing at 25 °C, 40 °C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, and 90°C, were compared.



Şekil. Deney sonrasında numunelerin durumu ve erken yaş basınç dayanım test sonuçları/  
Figure. Specimens after experiment and early age compressive strength test results

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı, farklı sıcaklık kürlerine tabi tutulmuş uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı tek bileşenli geopolimer betonların erken yaş basınç dayanımlarının incelenmesidir. / The aim of this study is to investigate the early age compressive strengths of one part geopolymer concretes based on fly ash and ground granulated blast furnace slag subjected to different temperature curing conditions.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen tek bileşenli geopolimer betonlar oda sıcaklığı (yaklaşık 25 °C), 40 °C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C derecelerde 24 saat boyunca sıcaklık kürlerine tabi tutularak 7. gün basınç dayanımları ölçülmüştür. / The one part geopolymer concretes produced were subjected to temperature curing for 24 hours at ambient temperature (almost 25 °C), 40 °C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C and 90°C, and their compressive strengths were measured on the 7th day.

### Özgünlük (Originality)

Farklı sıcaklık kürlerine tabi tutulmuş, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kombinasyonları ile oluşturulmuş, özgün yöntemlerle hazırlanmış tek bileşenli geopolimer betonlarda sıcaklık kürünün betonun erken yaş basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır. / The effects of temperature curing on the early age compressive strength of one part geopolymer concretes subjected to different temperature curing conditions were investigated.

### Bulgular (Findings)

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen tek bileşenli geopolimer betonların erken yaş basınç dayanımları 60 °C'ye kadar artmıştır, 70 °C'den sonra düşüş gözlemlenmiştir. En yüksek erken yaş basınç dayanımı 60°C'de kürlenmiş numunede 58 MPa olarak ölçülürken, en düşük erken yaş basınç dayanımı oda sıcaklığında kürlenmiş numunede 15 MPa olarak ölçülmüştür. / The early age compressive strength of geopolymer concretes produced using fly ash and slag increased up to 60°C, after which a decline was observed beyond 70°C. The highest early-age compressive strength was measured as 58 MPa cured at 60°C, while the lowest value was recorded as 15 MPa cured at room temperature.

### Sonuç (Conclusion)

Sıcaklık kürünün tek bileşenli geopolimer betonlarda erken yaş basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği tespit edilmiştir. / It has been determined that temperature curing positively influences the early age compressive strength of one part geopolymer concretes.

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

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

# Tek Bileşenli Geopolimer Betonun Erken Yaş Basınç Dayanımına Farklı Kür Sıcaklıklarının Etkisi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Tuğba ÖZDEMİR MAZLUM<sup>1\*</sup>, Nihat ATMACA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Bölümü, Gaziantep Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Gaziantep Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.02.2025 ; Kabul/Accepted : 05.10.2025 ; Erken Görünüm/Early View :26.10.2025 )

## ÖZ

Bu çalışmanın amacı, farklı sıcaklık kür koşulları altında atık malzeme olarak bulunan %50 uçucu kül (UK) ve %50 yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılarak üretilen tek bileşenli geopolimer betonların erken yaş basınç dayanım gelişimini incelemektir. Tek bileşenli geopolimer beton, sıvı alkali kullanımını ortadan kaldırarak uygulama kolaylığı sunarken, daha güvenli olması ve endüstriyel atıkların kullanımıyla sürdürülebilirlik gibi önemli avantajlarının yanında ısıl kür koşullarında yüksek erken yaş basınç dayanımı sağlamaktadır. Geopolimer beton numunelerine, oda sıcaklığı (yaklaşık 25°C) ve 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C sıcaklıklarında ilk 24 saat boyunca kür uygulanmıştır. Kür işleminin ardından numunelere taze ve sertleşmiş geopolimer beton özelliklerini değerlendirmek amacıyla slump testi, geopolimer betonun yoğunluğu, ultrasonic pulse velocity (UPV) testi ve basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Bulgulara göre, geopolimer betonların çökme değeri yaklaşık 10 cm ölçülmüş, yoğunluk ortalama 2,10 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiş, ve UPV sonuçlarının ortalama 4463 m/s olduğu görülmüştür. Karışımda yüksek fırın cürufunun olması, aktivasyon hızının artmasına katkıda bulunarak daha fazla miktarda C-A-S-H jelinin oluşumuna yol açmıştır, böylelikle daha yoğun bir mikro yapının oluşumuyla beton boşluk oranının azalmasına ve bunun sonucunda da UPV değerinin yüksek çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca, tek bileşenli geopolimer betonların erken yaş basınç dayanımları 60 °C kür sıcaklığına kadar doğru orantılı olarak artarken, yüksek sıcaklıklarda uygulanan kür ile dayanımlar düşmüştür. Numuneler arasında en yüksek basınç dayanımı 60°C sıcaklık kürü uygulanan numunede 58 MPa olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, optimum sıcaklık kürünün geopolimer betonların erken yaş performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tek bileşenli geopolimer beton, erken yaş basınç dayanımı, kür sıcaklığının etkisi, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı beton, ısıl kür optimizasyonu.

## The Effect of Different Curing Temperatures on The Early-Age Compressive Strength of One-Part Geopolymer Concrete

### ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the early-age compressive strength development of one-part geopolymer concrete produced using 50% fly ash (FA) and 50% ground granulated blast furnace slag (GGBS), both utilized as industrial waste materials, under different curing temperature conditions. One-part geopolymer concrete eliminates the need for liquid alkali activators, offering ease of application, enhanced safety, and sustainability through the use of industrial by-products. Moreover, it provides high early-age strength when subjected to thermal curing. In this study, the geopolymer concrete specimens were cured for the first 24 hours at room temperature (approximately 25°C) and at elevated temperatures of 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, and 90°C. Following the curing process, slump test, density measurement, ultrasonic pulse velocity (UPV) test, and compressive strength test were conducted to evaluate the fresh and hardened properties of the geopolymer concrete specimens. According to the results, the slump value of the geopolymer concretes was measured to be approximately 10 cm, the density of each concrete sample was measured to be approximately 2.10 kg/m<sup>3</sup>, and the average UPV value was found to be around 4463 m/s. The presence of ground granulated blast furnace slag in the mixture contributed to an increased rate of activation, leading to the formation of a greater amount of C-A-S-H gel. Consequently, the formation of a denser microstructure reduced the porosity of the concrete, which in turn resulted in higher UPV values. Moreover, the early-age compressive strengths of one-part geopolymer concretes increased proportionally with curing temperatures up to 60 °C, while higher curing temperatures resulted in a reduction in strength. Among the specimens, the highest compressive strength was recorded as 58 MPa in the sample cured at 60 °C. These findings indicate that an optimum curing temperature significantly enhances the early-age performance of geopolymer concretes.

**Keywords:** One part geopolymer concrete, early-age compressive strength, curing temperature effect, fly ash and ground granulated blast furnace slag based concrete, thermal curing optimization.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Portland çimentosu bazlı betonun üretim süreci, önemli miktarlarda doğal kaynak kullanımı gerektirmektedir ve büyük ölçüde sera gazı emisyonlarına neden olmaktadır [1]. Bilim insanları ve araştırmacılar, çimento bazlı

betona kıyasla benzer ya da daha iyi performans sunan atık malzemelerin kullanım potansiyelini sürekli olarak araştırmaktadır [2]. Bu yaklaşım, atıkların geri dönüştürülmesini, CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaltılmasını ve doğal kaynakların korunmasını hedeflemektedir [3]. Son yirmi yılda, endüstriyel yan ürünler, örneğin yardımcı

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : ozdemir\_tuuba@hotmail.com

bağlayıcı malzemeler ya da dolgu maddeleri kullanılarak çevre dostu inşaat malzemeleri geliştirme konusunda büyük bir ilgi ortaya çıkmıştır. Bu malzemelerin üstün performansı, yardımcı bağlayıcı malzemelerin morfolojik özellikleri ve puzolanik özellikleri ile ilişkilidir. Bu üstün özellikler, çimento esaslı bağlayıcı sistemlerde hidrasyon ürünlerinin kalitesini ve miktarını artırarak, betonun mikro yapısının daha yoğun ve geçirimsiz hale gelmesini sağlamaktadır. Özellikle uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemeler, kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek ikincil C-S-H ya da C-A-S-H jellerinin oluşumuna katkıda bulunmakta, bu da mekanik dayanımın artmasına ve uzun vadeli dayanıklılığın iyileştirilmesine olanak tanımaktadır [4, 5]. Ayrıca, bu malzemelerin kullanımı, hem doğal kaynak tüketimini azaltmakta hem de sera gazı emisyonlarını düşürerek sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine önemli katkılar sunmaktadır [6]. Bu bağlamda, endüstriyel atıkların yeniden değerlendirilmesi, hem teknik hem de çevresel açıdan yüksek performanslı beton üretimi için stratejik bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikler ayrıca, geleneksel beton matrisinin yapısının iyileştirilmesinde de önemli rol oynamaktadır [7].

Geopolimer betonlar, Geleneksel Portland Çimentosu (OPC) bazlı betonun yerini alabilecek önemli bir yenilik olarak ortaya çıkmıştır. Doğru geopolimer karışımı kullanılarak, geleneksel çimentoya kıyasla CO<sub>2</sub> emisyonlarının %80'e kadar ve enerji tüketiminin %60'a kadar azaltılması mümkündür [8]. Bu nedenle, geopolimerler araştırmacılar arasında önemli bir ilgi ve tanınırlık kazanmıştır. "Geopolimer" terimi ilk kez 1979 yılında Davidovits tarafından tanımlanmıştır [9]. Geleneksel geopolimer formülasyonları, tipik olarak sıvı bir fazı (aktivatör) ve katı bir fazı (alüminosilikat malzemeler) içeren iki bileşenli bir sistemden oluşur. Geopolimer betonlar, çevre dostu olmaları, yüksek işlenebilirlik sunmaları ve yüksek basınç dayanımı sağlamaları gibi birçok avantajlar sunmaktadır [10]. Ancak, geopolimerizasyon süreci karmaşık olup birleştirilmesi zordur [11]. Ayrıca, alkali çözeltilerin taşınması, depolanması ve uygulama zorlukları gibi, geopolimer beton malzemeleri ile ilgili bazı sorunlar da sunmaktadır. Bu çözeltiler, viskoz, taşınması zor ve büyük miktarlarda depolanması güç malzemelerdir [12]. Dolayısıyla, geopolimer betonların daha fazla geliştirilmesine ve iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

"Yalnızca su ekle" sistemleri olarak da adlandırılan tek bileşenli geopolimerler, geleneksel iki bileşenli sistemlere kıyasla kullanım kolaylığı, taşınabilirlik ve güvenlik gibi avantajları nedeniyle son yıllarda büyük ilgi görmektedir [13]. Geleneksel geopolimer sistemlerinde, alkali aktivatör çözeltisi ile alüminosilikat esaslı bağlayıcı ayrı ayrı hazırlanırken; tek bileşenli sistemlerde katı alüminosilikat bağlayıcılar ve katı aktivatörler kuru karışım halinde hazırlanarak sadece su ile aktive edilmektedir [14]. Tek bileşenli geopolimer beton karışımlarının geleneksel geopolimer beton

karışımlarından farkı, alkali aktivatör olarak kullanılan malzemenin geleneksel geopolimer beton karışımındaki gibi çözelti şeklinde değil, katı halde bulunmasıdır. Bu yaklaşım saha uygulamaları açısından süreci basitleştirmekte ve daha güvenli bir yaklaşım sunmaktadır [15].

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi endüstriyel atıkların tek bileşenli geopolimer sistemlerde başarıyla kullanıldığı çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir [16]. Tek bileşenli geopolimerlerin basınç dayanımı, birbirine bağlı birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler arasında şunlar yer almaktadır:

- Alüminosilikat tipi ve inceliği: Uçucu kül veya cüruf gibi alüminosilikat kaynaklarının reaktivitesi kritik rol oynamaktadır [17].

- Aktivatör bileşimi ve dozajı: Katı alkali aktivatörlerin (katı sodyum hidroksit, katı sodyum silikat gibi) türü ve miktarı çözünme sürecini ve jel oluşumunu doğrudan etkilemektedir [18].

- Su/katı oranı: Düşük oranlar mekanik dayanımı artırırken işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir [19].

- Kür koşulları: Tek bileşenli geopolimer sistemlerde ortam koşullarında kür mümkün olmakla birlikte, termal kür uygulamaları erken dayanım gelişimini hızlandırmaktadır [20].

- Agregat boyutu ve özellikleri: İri agregaların, küçük olanlara kıyasla üstün termal stabilite sağladığı gösterilmiştir [21].

Başlangıçta bazı araştırmacılar, tek bileşenli geopolimer betonlarda düşük basınç dayanımı tespit etmişlerdir [22]. Bu tür betonların yük taşıma kapasitesi başlangıçta yetersiz bulunmuş ve uygulandığında çatlama veya kırılma riski daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca araştırmacılar tek bileşenli geopolimer betonlarda başlangıçta çekme, eğilme veya elastikiyet gibi mekanik davranışların da yetersiz olduğunu çalışmalarında belirtmiştir [23]. Bu nedenle tek bileşenli geopolimer betonlarda yetersiz basınç dayanımlarının iyileştirilmesi literatürde sıklıkla çalışılmıştır.

Tek bileşenli geopolimer betonlarda katı sodyum metasilikatın oldukça etkili bir toz aktivatör olduğu bazı çalışmalarda yer almıştır [24]. Hai-Yan Zhang çalışmasında, susuz sodyum metasilikatın, metakaolin ve uçucu kül karışımında, sıvı sodyum metasilikat ve sodyum hidroksit kombinasyonundan daha etkili bir katı aktivatör olduğunu tespit etmiştir [25]. Lao ve diğerlerinin araştırması ise, hibrit sodyum metasilikat ve sodyum karbonat içeren geopolimer betonun, mekanik performans, enerji tüketimi, çevresel etki ve ekonomik potansiyel göz önünde bulundurulduğunda en iyi genel performansı sergilediğini ortaya koymuştur [26]. Yapılan tüm çalışmalar, optimum sıcaklıklarda geopolimer betonların basınç dayanımlarının artırılmasıyla sonuçlanmış ve bu betonları, iki bileşenli geopolimer betonlarla rekabet edebilir hale getirmiştir.

Tüm faktörler arasında kür sıcaklığının önemli bir etkiye sahip olduğu yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir. Abdollahnejad ve arkadaşları çalışmalarında yüksek sıcaklıklarda uygulanan kürün jeopolimerleşme sürecini

hızlandırarak erken yaş dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. [27]. Ancak, aşırı sıcaklık uygulamalarının suyun hızla buharlaşmasına ve büzölmeye bağılı olarak mikroskobik çatlaklara yol açabileceği ise Siciliano ve arkadaşlarının çalışmaları ile kanıtlanmıştır [28]. Nath ve Sarker ise çalışmalarında, özellikle düşük kalsiyumlu sistemlerde ısı kürünün uçucu kül bazlı tek bileşenli geopolimerlerin basınç dayanımını artırdığını bildirmiştir [29]. Benzer şekilde, Kljajević ve arkadaşları ısı ve alkali konsantrasyonunun birlikte jeopolimer matris yapısını olumlu etkilediğini vurgulayan çalışmalar yapmışlardır [30]. Literatür çalışmaları esas alındığında, geopolimer betonlarda kür sıcaklığı oluşan bağlayıcı matrisin mikroyapısı ve nihai mekanik performans özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Literatürde basınç dayanımına kür sıcaklığının etkisinin özellikle uçucu kül ve cüruf bazlı sistemlerde jeopolimerleşme reaksiyonlarını hızlandırdığı ve daha yoğun bir jeopolimer jel oluşumuna olanak sağladığı belirtilmiştir [31]. Nath ve Sarker çalışmalarında, uçucu kül bazlı tek bileşenli geopolimerlerde ısı kürünün özellikle ilk 7 günlük basınç dayanımı üzerinde belirgin bir artış sağladığını, ancak daha yüksek sıcaklıklarda mikroskobik çatlak oluşumundan dolayı dayanımın sınırlandığı belirtilmiştir [32]. Benzer şekilde, Olivia ve Nikraz çalışmalarında, düşük kalsiyum içeriğine sahip sistemlerde ısı kürünün, ortam sıcaklığında kürlenmiş numunelere kıyasla %60'a varan oranlarda daha yüksek basınç dayanımı sağladığını rapor etmiştir [33]. Ayrıca, Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, cüruf oranı yüksek karışımlarda ortam sıcaklığında kürün yeterli dayanım sağladığı, ancak uçucu kül oranı arttıkça termal kürün gerekliliğinin ön plana çıktığı vurgulanmıştır [34]. Öte yandan, Duxson ve arkadaşları çalışmalarında, yüksek sıcaklıklarda erken yaş dayanımı artsa da, uzun vadeli dayanım gelişiminin yeterli nem kontrolü sağlanmazsa olumsuz etkilebileceğini bildirmiştir [35]. Literatürdeki bulgular, geopolimer betonlarda kür sıcaklığının hem erken yaş dayanımı hem de nihai mikroyapı kalitesi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Kür sıcaklığıyla birlikte, kullanılan bağlayıcı türü (uçucu kül, cüruf, metakaolin vb.) ve aktivatör bileşiminin de basınç dayanım performansında etkili olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, kullanılan bağlayıcı malzemelerin türü ve özellikleri, kür sıcaklığı ile birlikte geopolimer betonun performansı üzerinde doğrudan belirleyici rol oynamaktadır [36]. Uçucu kül, yüksek reaktif silika ve alümina içeriği sayesinde alkali aktivatörlerle güçlü kimyasal bağlar oluşturarak yoğun bir matris oluşumuna katkı sağlar; bu da sülfat ve asit saldırılarına karşı direnci artırır, geçirgenliği azaltır ve uzun vadeli dayanıklılığı destekler [37], [38]. Ayrıca işlenebilirliği artırarak uygulama kolaylığı sunar ve yavaş reaksiyon kinetiği ile zamanla daha yüksek basınç dayanımı sağlar [39]. Yüksek fırın cürufu ise yüksek kalsiyum içeriği sayesinde bağlayıcı faz oluşumunu destekler, hem erken hem de uzun vadeli dayanımı geliştirir [40]. Aynı zamanda düşük geçirgenlik ve yüksek kimyasal direnç

özellikleriyle zorlu çevresel koşullara uygunluk sağlar [41]. Her iki bağlayıcı da Portland çimentosu ihtiyacını azaltarak karbon salımını düşürmekte, endüstriyel atıkların yeniden kullanımını mümkün kılarak sürdürülebilir yapı üretimine katkı sunmaktadır [42]. Bu çalışma, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı tek bileşenli geopolimer betonların erken yaş fiziksel ve mekanik performansını etkileyen kür sıcaklıklarının etkisini incelemeyi amaçlamaktadır. Literatürde tek bileşenli geopolimer sistemler üzerine artan ilgiye rağmen, farklı bağlayıcı kombinasyonlarının kür sıcaklığıyla etkileşimi ve bunun erken yaş basınç dayanımı gelişimi üzerindeki etkileri henüz kapsamlı bir şekilde ele alınmamıştır. Bu bağlamda, çalışmanın özgün katkısı, sürdürülebilir bağlayıcı malzemelerin çevresel avantajları ile birlikte, ısı kür koşulları altında optimum performans gösterebilecek tek bileşenli geopolimer beton sistemlerini ortaya koymasındadır. Böylece, hem çevresel etkilerin azaltılmasına hem de dayanıklı altyapı sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlanması hedeflenmektedir.

## 2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

### 2.1 Malzemeler ve Özellikleri (Materials and Properties)

Bu çalışma oda sıcaklığı (yaklaşık 25°C), 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C sıcaklıklarında 24 saat boyunca sıcaklık kürüne tabi tutulmuş %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilmiş geopolimer betonların erken yaş basınç dayanımlarını analiz etmeyi ve karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Tek bileşenli geopolimer beton karışımında; alümina silika malzeme olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, aktivatör olarak katı sodyum metasilikat, iri ve ince agrega olarak kırma taş ve nehir kumu kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada alümina-silika malzeme yerine kullanılan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu Kar Mineral Madencilik AŞ'den temin edilmiştir. X-ışını floresans (XRF) testlerine göre; uçucu kül %52,4 SiO<sub>2</sub>, %25,8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %8,4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ile F sınıfı olarak belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu ise %39,8 CaO, %35,6 SiO<sub>2</sub> ve %11,7 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermektedir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Aktivatör olarak, Songen Biyoteknoloji ve Laboratuvar Malzemeleri Ltd. Şti.' den temin edilen ve Çizelge 2'de gösterilen kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip katı sodyum metasilikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) kullanılmıştır. Şekil 1'de gösterilen katı sodyum metasilikat, granül formda olup, bileşenlerinin reaktif doğası nedeniyle, özellikle

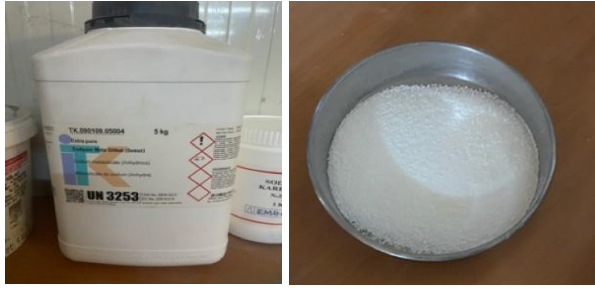
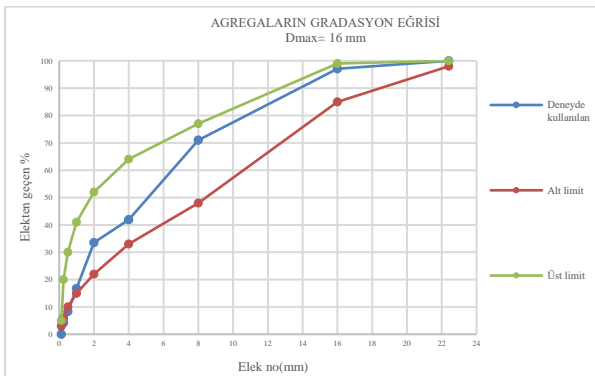
**Çizelge 1.** Uçucu kül ve yüksek fırın cürufuna ait fiziksel özellikler (Physical properties of fly ash and ground granulated blast furnace slag)

Malzeme Özellikleri	Uçucu Kül	Yüksek Fırın Cürufu
45 µm elek üzerinde kalan	%23,12	%5- %10
Hacim genişmesi	1 mm	0-1mm
Serbest kireç	%0,08	%0,5
Özgül ağırlık	2,18	2,85
Dayanım aktivite indeksi	%76,0	%75
Kızdırma kaybı	%5,8	%0,5

**Çizelge 2.** Aktivatör olarak kullanılan katı sodyum metasilikatın ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kimyasal ve fiziksel özellikleri (Chemical and physical properties of sodium metasilicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) as an activator)

Malzeme Özellikleri	Değer
Moleküler yapı	Sodyum (Na), Silisyum (Si), ve Oksijen (O) atomlarından oluşur
Fiziksel form	Beyaz granül
Yoğunluk (katı)	2,5 g/cm <sup>3</sup>
Çözünürlük	Suda kolayca çözünür; çözünme sonucu $\text{Na}^+$ ve $\text{SiO}_3^{2-}$ iyonlarına ayrışır
pH çözeltisi	pH 12
Termal stabilite	1088 °C

dayanıklı ve sürdürülebilir geopolimer beton üretiminde kritik bir rol oynamaktadır.

**Şekil 1.** Deneyde aktivatör olarak kullanılan katı sodyum metasilikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) (Solid sodium metasilicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) used as the activator in the experiment)**Şekil 2.** Deneyde kullanılan agregaların gradasyon eğrisi (Gradation curve of aggregates used in the experiment)

Çalışmada kullanılan agregalar Türkiye'deki KÇS Çimento'dan temin edilmiştir ve ASTM C33 [43] standardına uygundur. İri ve ince agregalar olacak şekilde iki kategoriye ayrılmıştır. Birinci kategori, Dmax=16 mm olan iri agregaları içermektedir. İkinci

kategori ise incelik modülü 4.37 olan ince agregalardan oluşmaktadır. Deneyde kullanılan agregaların kuru özgül ağırlığı 2,56 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiş, doymun yüzeyi kuru özgül ağırlık ise 2,66 g/cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Ayrıca agregaların su emme oranı %1,1 olarak tespit edilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan agregaların tane boyutları, ASTM C33 standartına göre [43] Şekil 2'de belirtilen sınırlar içinde yer almaktadır.

## 2.2 Karışım Tasarımı ve Yöntem (Materials Mix Design and Methodology)

Deney kapsamında kullanılacak malzemelerin karışım miktarları ve deneyin yöntemi aşağıda verilmiştir.

### 2.2.1 Karışım tasarımı (Mix design)

Bu çalışmada, su, agregalar (iri ve ince) ve bağlayıcı malzemeler (hammadde ve bir aktivatör içeren geopolimer karışım) kullanılarak tek bileşenli karışım geopolimer betonu oluşturulmuştur. Ana hammaddeler olarak %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu, aktivatör olarak ise sodyum metasilikat kullanılmıştır. Geleneksel beton ile tek bileşenli geopolimer beton arasındaki benzerlikler göz önüne alındığında, karışım yöntemi Gunasekara ve arkadaşlarının çalışmaları dikkate alınarak belirlenmiştir [44]. Tek bileşenli geopolimer beton deneyinde kullanılan karışım miktarları Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Geopolimer beton karışımında, betondaki toplam agrega oranı kütlece %70 olarak belirlenmiş ve iri ve ince agregaların toplam agregadaki oranları sırasıyla %60 ve %40 olarak uygulanmıştır. Katı aktivatörlerin uçucu kül ve cüruf toplamına oranı 0,12; su/bağlayıcı oranı ise 0,47 olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 3.** Tek bileşenli geopolimer beton deneyinde kullanılan karışım miktarları (Mix design used in the one-part geopolimer concrete experiment)

Malzeme	Miktar
İri agrega (kg/m <sup>3</sup> )	961
İnce agrega (kg/m <sup>3</sup> )	693
Uçucu kül (kg/m <sup>3</sup> )	199,4
Fırın cürufu (kg/m <sup>3</sup> )	199,4
Aktivatör (kg/m <sup>3</sup> )	63,8
Su / bağlayıcı	0,47
Aktivatör / bağlayıcı	0,12

### 2.2.2 Yöntem (Method)

Bu deneysel çalışmada, %50 uçucu kül ve %50 yüksek fırın cürufu içeren tek bileşenli geopolimer betonların taze (slump) ve sertleşmiş beton (yoğunluk, UPV) özellikleri; farklı kür sıcaklıklarında (25 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C ve 90 °C) 24 saat boyunca kürlenerek, 7. gün basınç dayanımları ölçülmek suretiyle değerlendirilmiş ve kür sıcaklığının mekanik performans üzerindeki etkileri sistematik olarak ortaya konmuştur. İlk olarak hem iri hem de ince boyutlardaki agregalar (doğru yüzey kuru durumda) karıştırılarak pan miksere konulmuştur. Daha sonra, geopolimer beton karışımına uçucu kül ve yüksek fırın cürufu eklenmiş ve karıştırma işlemi 2 dakika daha devam ettirilmiştir. Granül halde bulunan katı aktivatör, daha homojen bir karışım elde etmek için su içinde çözülerek, Şekil 3'de gösterildiği gibi, karıştırma sırasında karışıma yavaş yavaş eklenmiş ve 2 dakika daha karıştırılmıştır. Son olarak, aktivatörün diğer tüm malzemeler ile karışım boyunca homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için malzemeler 5 dakika daha karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.



**Şekil 3.** Deneyde kullanılan granül haldeki katı sodyum metasilikat ve su içinde çözülmesi (The granule form solid sodium metasilicate and mixed with water)

Geopolimer betonun tüm bileşenleri standart prosedürlere uygun olarak karıştırılmış ve homojen bir yapı elde edilmiştir. Nihai karışım, topaklanma veya ayrışma olmaksızın bütünlük göstermekte olup, taze geopolimer betonun işlenebilirlik ve kıvam açısından uygun bir görünüm sunduğunu Şekil 4'de gösterildiği gibi ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.** Tek bileşenli taze geopolimer beton karışımının son hali/ Final state of the one-part fresh geopolimer concrete mixture

### 2.3 Deneylemler (Experiments)

İlk olarak, elde edilen karışımın işlenebilirliğini ve kıvamını değerlendirmek amacıyla taze beton testlerinden biri olan çökme (slump) testi yapılmıştır. EN 12350-2 [45] standartına göre, 30 cm yüksekliğinde, üst çapı 10 cm ve alt çapı 20 cm olan metal slump konisine üç eşit katman halinde geopolimer beton doldurulmuş, her katman, sıkıştırma çubuğu ile 25 kez sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Koni, beton çökmesine izin verecek şekilde dikkatlice ve dik bir şekilde yukarı doğru çekilerek çökme miktarı hesaplanmıştır. Çökme değerine bakıldıktan sonra karışımlar, tek bileşenli geopolimer betonun yoğunluk, UPV ve basınç deneyine tabi tutulması için, 15x15x15 cm ayrıtlı küp kalıplara, kalıplar yağlandıktan sonra iki tabakada yerleştirilmiştir. Yerleştirme işleminden sonra kalıplardaki numuneler sarsma tablası yardımıyla sıkıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler, kalıpları ile birlikte streç folyo ile sarılarak (kür sıcaklığı uygulanırken betonun içindeki suyun buharlaşmaması için) her biri 24 saat boyunca farklı kür sıcaklığına tabi olacak şekilde deney fırınlarına yerleştirilmiştir. 24 saat sonra fırından çıkarılan numuneler soğuduktan sonra yine kalıpları ile birlikte bir poşet içinde 7.gün dayanımına bakılmak üzere oda sıcaklığında bekletilmiştir. Süresini tamamlayan numuneler yoğunluk, UPV testi ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmak üzere kalıptan çıkarılmıştır. Çökme testi sonrasında, kür işlemi tamamlandıktan sonra çıkarılan beton numunelerinin ağırlıkları ölçülerek yoğunlukları hesaplanmıştır. Sertleşmiş betonun yoğunluğu, EN 12390-7 standardına [46] uygun olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, numunelerin kütlesi hassas terazide ölçülmüş ve hacimleri, standart yöntemlerle belirlenerek aşağıdaki denklem yardımıyla yoğunlukları hesaplanmıştır.

$Yoğunluk = \frac{Kütle}{Hacim}$

Ölçülen yoğunluk değerleri, numunelerin iç yapısındaki boşluk oranı, dayanım potansiyeli ve homojenlik düzeyi hakkında dolaylı bilgi sağlamıştır [4]. Böylece, betonun kalitesi ve performansı üzerine önemli veriler elde edilmiştir.

Betonun içyapı kalitesini ve homojenliğini değerlendirmek amacıyla ultrasonik darbe hızı (UPV) testleri uygulanmıştır. Testler, EN 12504-4 standardı [47] doğrultusunda Şekil 5'de görüldüğü gibi UTC-3050 Pundit Lab+Ultrasonik Dalga Hızı Test Cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, bir ultrasonik dalga kaynağından gönderilen sinyalin beton

numunesi içerisinde geçiş süresi ölçülerek darbe hızı hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, betonun yoğunluk durumu, iç yapısal bütünlüğü ve olası kusurlar (boşluklar, çatlaklar, segregasyon) hakkında önemli bilgiler sunmuştur. UPV sonuçları, betonun dayanım özellikleriyle ilişkilendirilerek genel performans etkilerine katkı sağlamıştır. Numunelerin ultrasonik darbe hızı, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

Ultrasonik darbe hızı= Darbenin katettiği mesafe/ darbenin bu mesafeyi kat etme süresi



**Şekil 5.** UPV test cihazı ve tek bileşenli geopolimer beton numunelerinin UPV testine tabi tutulması (UPV apparatus and UPV test results of one-part mixing geopolymer concrete samples)

Betonun mekanik performansının değerlendirilmesi için 15×15×15 cm boyutlarındaki küp numunelere basınç dayanım testi uygulanmıştır. Testler, EN 12390-3 standardına [48] uygun olarak uygulanmış, her numunenin üzerine düşey doğrultuda eşit hızda artan yük uygulanarak kırılma anındaki maksimum yük kaydedilmiştir. Elde edilen değerler kullanılarak numunelerin basınç dayanımları hesaplanmıştır. Her yaş ve sıcaklık koşulu için üç numunenin ortalaması alınarak sonuçlar raporlanmıştır. Geopolimer betonların basınç dayanımı deneyleri, 3000 kN kapasiteli beton presinde gerçekleştirilmiştir. Geopolimer beton numunelerinin kırılmasında yüklenme hızı 0.6 kN/s alınmıştır.

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

#### 3.1 Çökme Değeri (Slump Value)

Slump deneyi, taze betonun işlenebilirliğini belirlemek için en bilinen ve en yaygın kullanılan test yöntemidir. Yapılan deneyler sonucunda, dökülen yedi adet geopolimer beton numunesinin çökme değerleri yaklaşık olarak ortalama 10 cm olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değer, betonun orta derecede işlenebilir bir kıvama sahip olduğunu ve yerleştirme ile sıkıştırma işlemleri sırasında yeterli akışkanlık sağladığını göstermektedir; bu durum, taze betonun reolojik davranışları ile çökme değeri arasındaki ilişkiye işaret eden çalışmalarda da vurgulanmıştır [4]. Taze geopolimer betonun çökme değerleri, betonun yerleşim performansı ve segregasyon eğilimi üzerinde doğrudan etkili parametreler arasında yer almaktadır [49]. Buna göre, deney sonucunda elde edilen çökme değeri betonda segregasyon ve ayrışma riskinin kontrol altında tutulduğunu göstermektedir. Elde edilen bulgular, karışım tasarımının taze geopolimer

beton performansı açısından uygun bir kıvam dengesi sunduğunu doğrulamaktadır. Bir diğer dikkat çekici husus da, yüksek fırın cürufunun, uçucu küle kıyasla daha yüksek reaktiviteye sahip bir bağlayıcı malzeme olmasıdır [50]. Yüksek fırın cürufunun, alkali aktivasyon sürecinde C-S-H ve N-A-S-H jel fazlarının hızlı bir şekilde oluşumunu teşvik ettiği ve böylece karışımın reolojik davranışını iyileştirerek erken yaş mekanik performansını artırdığı literatürde belirtilmiştir [51]. Bu nedenle, karışıma yüksek fırın cürufunun %50'den daha fazla oranda eklenmesi, alkali aktivasyon sürecini hızlandırarak karışımın priz süresinin önemli ölçüde kısalmasına neden olmaktadır. Bu durum, karışımın daha sert bir yapıya dönüşmesine yol açarak, işlenebilirliğin azalmasına ve slump değerinin düşmesine sebep olacaktır. Dolayısıyla, yüksek fırın cürufunun optimum miktarda maksimum %50 olacak şekilde kullanımı beton karışımının hem taze beton özelliklerini hem de işlenebilirliğini kontrol etmek açısından kritik bir öneme sahiptir.

#### 3.2 Betonun Yoğunluğu (Density)

Yapılan ölçümler neticesinde, bu çalışmada incelenen yedi adet sertleşmiş geopolimer beton numunelerinin ağırlıklarını ve yoğunluklarını gösteren değerler, Çizelge 4'de gösterilmiştir.

Farklı kür sıcaklıklarında bekletilen yedi adet sertleşmiş geopolimer beton numunesi üzerinde gerçekleştirilen ağırlık ölçümleri sonucunda, sıcaklık artışıyla birlikte numunelerin ağırlıklarında küçük çaplı azalmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklık etkisiyle serbest suyun buharlaşması sonucu numune kütlelerinde kayıp yaşanmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, bu ağırlık kayıpları sınırlı düzeyde gerçekleşmiş ve yoğunluk değerlerinde kayda değer bir farklılık oluşmamıştır. Yüksek sıcaklık kür uygulamaları, geopolimer betonlarda su kaybına bağlı olarak kütle kaybına yol açabilmekte, ancak bu değişim genellikle betonun hacimsel kararlılığı üzerinde sınırlı bir etki oluşturmaktadır [52]. Ayrıca, yoğunluk değerlerinin birbirine yakın olması, karışımın homojenliğini ve iç yapısal bütünlüğünü koruduğunu göstermesi açısından önemli bir bulgu olarak değerlendirilmektedir. Literatürde de belirtildiği gibi, betonun yoğunluğu, karışımdaki malzemelerin homojen dağılımı ve betonun boşluksuz iç yapısı hakkında dolaylı bilgi sağlamaktadır [4].

#### 3.3 UPV Testi (UPV Test)

Ölçümler sonucunda, farklı kür sıcaklıklarında hazırlanmış yedi adet sertleşmiş geopolimer beton numunelerinin UPV değerleri Çizelge 5'de gösterilmiştir. Karışımda yüksek fırın cürufunun kullanılması, alkali aktivasyon sürecini hızlandırarak daha fazla C-A-S-H jel yapısının oluşumuna katkı sağlamış ve böylece betonun mikro yapısal yoğunluğunu artırmıştır [53]. Bu gelişmiş iç yapı, betonun boşluk oranının azalmasını ve dolayısıyla UPV değerlerinin yüksek çıkmasını sağlamıştır. Yoğun ve homojen iç yapıya sahip betonlar daha yüksek UPV değerleri

sergilemektedir, bu da betonun dayanıklılık ve mukavemet potansiyelinin önemli bir göstergesi olarak kabul edilmektedir [54]. Sonuç olarak, farklı kür sıcaklıklarında bekletilmesine rağmen numunelerde yüksek UPV değerlerinin korunmuş olması, geopolimer betonların iç yapısal dayanıklılığının ve homojenliğinin yüksek seviyede olduğunu ortaya koymaktadır.

daha yoğun ve dayanıklı bir mikro yapının erken yaşta gelişmesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, 60°C kür sıcaklığında numunelerin 58 MPa ile en yüksek erken yaş basınç dayanım değerine ulaştığını ortaya koymuştur. Bu kür sıcaklık değeri, geopolimer betonun erken yaş geopolimerleşme reaksiyonlarının etkin bir şekilde gerçekleşmesi için optimum sıcaklık değeri olarak

**Çizelge 4.** Sertleşmiş tek bileşenli geopolimer beton numunelerine ait ağırlık ve yoğunluk değerleri (Weight and density values of the hardened one part geopolimer concrete specimens)

Numune no	Kür sıcaklığı (°C)	Ağırlık (g)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )
Numune 1	25	7158,1	2,12
Numune 2	40	7100	2,11
Numune 3	50	7008,7	2,10
Numune 4	60	7000	2,10
Numune 5	70	6950	2,09
Numune 6	80	6944,8	2,08
Numune 7	90	6900	2,07

**Çizelge 5.** Farklı kür sıcaklıklarında hazırlanmış sertleşmiş tek bileşenli geopolimer beton numunelerine ait UPV değerleri (UPV values of hardened one part geopolimer concrete specimens prepared under different curing temperatures)

Numune no	Kür sıcaklığı (°C)	UPV (m/s)
Numune 1	25	4550
Numune 2	40	4520
Numune 3	50	4470
Numune 4	60	4450
Numune 5	70	4420
Numune 6	80	4430
Numune 7	90	4400

### 3.4 Basınç Dayanımı (Compressive Strength Test)

Farklı kür sıcaklıklarında (25°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C ve 90°C) ilk 24 saat boyunca kür uygulanan ve ardından 7. günde erken yaş basınç dayanımı testine tabi tutulan tek bileşenli geopolimer beton numunelerinin deney sonrası görüntüleri Şekil 6'da gösterilmektedir.



**Şekil 6.** Farklı sıcaklıklarda 24 saat boyunca kürlenmiş ve 7. gün (erken yaş basınç dayanımı) basınç dayanımına tabi tutulan geopolimer beton numunelerinin deney sonrası durumu (Geopolymer concrete samples cured at different temperatures for 24 hours and subjected to compressive strength testing on the 7th day (early strength))

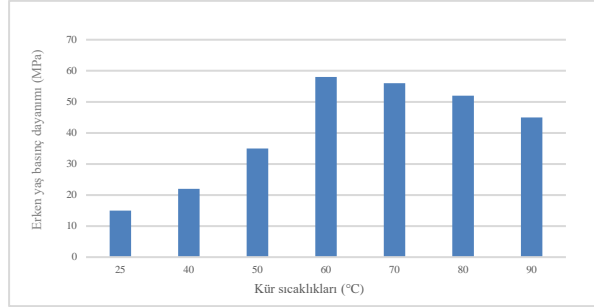
Basınç dayanım testine tabi tutulan farklı sıcaklıklarda kürlenmiş numunelerin kür sıcaklığı -erken yaş basınç dayanımı grafiği Şekil 7'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, kür sıcaklığının 60°C seviyelerine kadar artırılmasıyla birlikte erken yaş basınç dayanımında belirgin bir artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, literatürde de belirtildiği gibi, geopolimerleşme reaksiyonlarının daha yüksek sıcaklıklarda hızlanmasıyla açıklanmaktadır [55], [35]. Yükselen sıcaklıklar, aktivasyon sürecini ve jel fazı oluşumunu hızlandırarak,

değerlendirilmiştir.

Grafik incelendiğinde, 60°C'nin üzerindeki kür sıcaklıklarında erken yaş basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmektedir. Nitekim, 90°C kür sıcaklık değerinde ölçülen erken yaş basınç dayanımı değeri 45 MPa olup, 60°C'de elde edilen maksimum dayanım değerine kıyasla belirgin bir düşüş göstermektedir. Bu durum, literatürde de ifade edildiği üzere, yüksek sıcaklıkların geopolimerleşme reaksiyon sürecini olumsuz etkileyebileceğini ve özellikle su kaybına bağlı olarak betonun iç yapısında mikro-yapısal bozulmalara yol açabileceğini göstermektedir [54], [56]. Bu nedenle, optimum dayanım gelişimi için kür sıcaklığının belirli bir aralıkta tutulması gerekmektedir.

Bununla birlikte, kür uygulanmayan numunelerden elde edilen 15 MPa erken yaş basınç dayanımı ile 60°C'de kür uygulanan numunelerden elde edilen 58 MPa'lık erken yaş basınç dayanımı arasındaki fark, geopolimerleşme sürecinin sıcaklık etkisiyle hızlanması ile ilgili olup, geopolimer betonlarda kür sıcaklığının artırılması, alkali aktivasyon tepkimelerini hızlandırmaktadır [56], [35]. Böylece, sıcaklık etkisi geopolimer betonda daha yoğun ve bağlayıcı özellikte C-A-S-H ve/veya N-A-S-H jel fazlarının daha kısa sürede ve daha yüksek oranda oluşmasını sağlamaktadır [55], [57]. Yüksek sıcaklık koşullarında, çözünen alüminosilikatların polimerleşme kinetiği artmakta ve bu da daha güçlü bir mikro yapının gelişmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, kür uygulanmayan numunelerde düşük sıcaklık nedeniyle sınırlı seviyede ilerleyen geopolimerleşme reaksiyonları,

60°C’de gerçekleştirilen kür işlemiyle hızlandırılarak, daha yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesine imkan sağlamıştır.



**Şekil 7.** Geopolimer beton numunelerinin kür sıcaklığına bağlı erken yaş basınç dayanımı değerlerini gösteren grafik (Graph showing the early strength values of geopolymer concrete samples depending on the curing temperature)

#### 4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND EVALUATION)

Bu çalışmada farklı kür sıcaklıklarının tek bileşenli geopolimer betonların erken yaş performansı üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Taze geopolimer betonun işlenebilirlik özelliklerini değerlendirmek amacıyla yapılan çökme (slump) deneyinde, geopolimer numunelerin çökme değeri ortalama 10 cm olarak ölçülmüş ve bu sonuç, karışımın orta derecede işlenebilirliğe sahip olduğunu ortaya koymuştur.
- Farklı kür sıcaklıklarında bekletilen sertleşmiş geopolimer beton numunelerin ağırlık ölçümleri sonucunda, sıcaklık artışıyla birlikte ağırlıklarda küçük çaplı azalmalar meydana gelmiş, ancak bu değişimler yoğunluk değerlerini anlamlı düzeyde etkilememiştir. Tek bileşenli geopolimer betonlarda ortalama 2.10 kg/m<sup>3</sup> değerinde bir yoğunluk elde edilmiş ve farklı kür sıcaklıklarının uygulanmasına rağmen yoğunlukta kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir.
- Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) testlerinde, geopolimer numunelerin iç yapısal homojenlik ve dayanıklılık düzeyleri değerlendirilmiş ve UPV ölçümleri yapılan geopolimer numunelerin UPV değerlerinin ortalama 4463 m/s civarında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, karışımda kullanılan yüksek fırın cürufunun geopolimer betonun mikro yapısal yoğunluğunu artırdığını doğrulamaktadır. [58].
- Erken yaş basınç dayanımı test sonuçları, kür sıcaklığının geopolimerleşme reaksiyonlarının ilerleme hızında belirleyici bir rol oynadığını göstermiştir. Kür sıcaklığının 60°C'ye kadar artırılması ile 58 MPa maksimum basınç dayanım değerine ulaşılmıştır.
- 60°C'nin üzerindeki kür sıcaklıklarında dayanım değerlerinde düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Bu bulgu, yüksek sıcaklıkların geopolimerleşme sürecini olumsuz etkileyeceğini, suyun hızlı buharlaşmasının

mikro çatlakların oluşmasına neden olduğu için numunelerin iç yapısında bozulmalara yol açabileceğini göstermiştir.

- Optimum erken yaş basınç dayanımı ve mikro yapı bütünlüğü sağlamak için tek bileşenli geopolimer betonlarda kür sıcaklığının 60°C'de olması önerilmektedir. Bu bulgular, geopolimer beton üretiminde kürlenme sıcaklıklarının dikkatle kontrol edilmesinin ve optimum aralıkta tutulmasının, dayanım açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı malzeme kombinasyonları ve kür süreleri ile bu optimum aralığın daha da geliştirilmesine odaklanabilir.
- Çalışma, sıcaklık kürlenmesinin geopolimer betonların erken gelişim performansını artırmadaki önemli rolünü veriler ile göstererek hızlı dayanım kazanımı gerektiren uygulamalar için geopolimer beton tasarımına yönelik değerli bilgiler sunmaktadır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu araştırmanın başarıyla yürütülmesine olanak sağlayan ve araştırmacıları destekleyen Gaziantep Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Programı'nın (Proje No: MF.HZP.24.13) ve YÖK 100/2000 Doktora Bursu'nun mali desteği içtenlikle takdir edilmektedir.

#### 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.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Tuğba ÖZDEMİR MAZLUM:** Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş, yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

**Nihat ATMACA:** Deney sonuçlarını analiz etmiş, yazım işlemini tamamlamıştır.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] El-Mir, A., Hwalla, J., El-Hassan, H., Assaad, J. J., El-Dieb, A., and Shehab, E., "Valorization of waste perlite powder in geopolymer composites", *Construction and Building Materials*, 368, 130491, (2023).
- [2] Guo, S., Ma, C., Long, G., and Xie, Y., "Cleaner one-part geopolymer prepared by introducing fly ash sinking spherical beads: properties and geopolymerization mechanism", *Journal of cleaner production*, 219, 686-697, (2019).
- [3] Sumesh, M., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mo, K. H., and Alnahhal, M. F., "Incorporation of nano-materials in cement composite and geopolymer based paste and mortar—A review", *Construction and Building Materials*, 148, 62-84, (2017).

- [4] Neville, A. M., "Properties of concrete", *Pearson Education India*, (1963).
- [5] Thomas, M., "Supplementary cementing materials in concrete", *CRC press*, (2013).
- [6] Xu, G., and Shi, X., "Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review. *Resources, conservation and recycling*, 136, 95-109, (2018).
- [7] Meng, Y., Ling, T. C., and Mo, K. H., "Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview", *Resources, conservation and recycling*, 138, 298-312, (2018).
- [8] Oderji, S. Y., Chen, B., Ahmad, M. R., and Shah, S. F. A., "Fresh and hardened properties of one-part fly ash-based geopolymer binders cured at room temperature: Effect of slag and alkali activators", *Journal of Cleaner Production*, 225, 1-10, (2019).
- [9] Pacheco-Torgal, F., "Introduction to handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes", *In Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*, (pp. 1-16), Woodhead Publishing, (2015).
- [10] Zhang, Y. J., Wang, Y. C., and Li, S., "Mechanical performance and hydration mechanism of geopolymer composite reinforced by resin", *Materials Science and Engineering*, 527(24-25), 6574-6580, (2010).
- [11] Kong, D. L., and Sanjayan, J. G., "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete", *Cement and concrete research*, 40(2), 334-339, (2010).
- [12] Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., and Illikainen, M., "Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar", *Journal of cleaner production*, 187, 171-179, (2018).
- [13] Bernal, S. A., San Nicolas, R., Provis, J. L., Mejía de Gutiérrez, R., and Van Deventer, J. S. "Natural carbonation of aged alkali-activated slag concretes", *Materials and structures*, 47, 693-707, (2014).
- [14] Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., and Illikainen, M., "One-part alkali-activated materials: A review", *Cement and Concrete Research*, 103, 21-34, (2018).
- [15] Provis, J. L. "Alkali-activated materials", *Cement and concrete research*, 114, 40-48, (2018).
- [16] Sunarsih, E. S., As'ad, S., Sam, A. M., and Kristiawan, S. A. "Transport properties of fly ash-slag-based geopolymer concrete with 2M sodium hydroxide combined with variations in slag percentage, Al/Bi ratio, and SS/SH ratio", *Materiales de Construcción*, 74(354), e343-e343, (2024).
- [17] Qu, F., Li, W., Wang, K., Zhang, S., and Sheng, D., "Performance deterioration of fly ash/slag-based geopolymer composites subjected to coupled cyclic preloading and sulfuric acid attack", *Journal of Cleaner Production*, 321, 128942, (2021).
- [18] Yip, C. K., and Van Deventer, J. S. J., "Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder", *Journal of Materials Science*, 38, 3851-3860, (2003).
- [19] Dong, T., Sun, T., Xu, F., Ouyang, G., Wang, H., Yang, F., and Wang, Z., "Effect of solid sodium silicate on workability, hydration and strength of alkali-activated GGBS/fly ash paste", *Coatings*, 13(4), 696, (2023).
- [20] Rabie, M., Irshidat, M. R., and Al-Nuaimi, N., "Ambient and heat-cured geopolymer composites: Mix design optimization and life cycle assessment", *Sustainability*, 14(9), 4942, (2022).
- [21] Zhang, H. Y., Qiu, G. H., Kodur, V., and Yuan, Z. S., "Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure", *Cement and Concrete Composites*, 106, 103483, (2020).
- [22] Koloušek, D., Brus, J., Urbanova, M., Andertova, J., Hulinsky, V., and Vorel, J., "Preparation, structure and hydrothermal stability of alternative (sodium silicate-free) geopolymers", *Journal of Materials Science*, 42, 9267-9275, (2007).
- [23] Peng, M. X., Wang, Z. H., Shen, S. H., and Xiao, Q. G., "Synthesis, characterization and mechanisms of one-part geopolymeric cement by calcining low-quality kaolin with alkali", *Materials and Structures*, 48, 699-708, (2015).
- [24] Ma, C., Long, G., Shi, Y., and Xie, Y., "Preparation of cleaner one-part geopolymer by investigating different types of commercial sodium metasilicate in China", *Journal of Cleaner Production*, 201, 636-647, (2018).
- [25] Zhang, H. Y., Kodur, V., Cao, L., and Qi, S. L., "Fiber reinforced geopolymers for fire resistance applications", *Procedia engineering*, 71, 153-158, (2014).
- [26] Lao, J. C., Xu, L. Y., Huang, B. T., Zhu, J. X., Khan, M., and Dai, J. G., "Utilization of sodium carbonate activator in strain-hardening ultra-high-performance geopolymer concrete", *Frontiers in Materials*, 10, 1142237, (2023).
- [27] Abdollahnejad, Z., Luukkonen, T., Mastali, M., Kinnunen, P., and Illikainen, M., "Development of one-part alkali-activated ceramic/slag binders containing recycled ceramic aggregates", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 04018386, (2019).
- [28] Siciliano, U. C., Zhao, J., Trindade, A. C. C., Liebscher, M., Mechtcherine, V., and de Andrade Silva, F., "Influence of curing temperature and pressure on the mechanical and microstructural development of metakaolin-based geopolymers", *Construction and Building Materials*, 424, 135852, (2024).
- [29] Nath, P., and Sarker, P. K., "Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition", *Construction and Building materials*, 66, 163-171, (2014).
- [30] Kljajević, L., Nenadović, M., Ivanović, M., Bučevac, D., Mirković, M., Mladenović Nikolić, N., and Nenadović, S., "Heat treatment of geopolymer samples obtained by varying concentration of sodium hydroxide as constituent of alkali activator", *Gels*, 8(6), 333, (2022).
- [31] Temuujin, J., Van Riessen, A., and Williams, R., "Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes", *Journal of hazardous materials*, 167(1-3), 82-88, (2009).
- [32] Nath, P., and Sarker, P. K., "Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition", *Construction and Building materials*, 66, 163-171, (2014).

- [33] Olivia, M., and Nikraz, H., "Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method", *Materials & Design* (1980-2015), 36, 191-198, (2012).
- [34] Zhang, H. Y., Qiu, G. H., Kodur, V., and Yuan, Z. S., "Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure", *Cement and Concrete Composites*, 106, 103483, (2020).
- [35] Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., and van Deventer, J. S. "Geopolymer technology: the current state of the art", *Journal of materials science*, 42, 2917-2933, (2007).
- [36] Zhao, J., Wang, K., Wang, S., Wang, Z., Yang, Z., Shumuye, E. D., and Gong, X., "Effect of elevated temperature on mechanical properties of high-volume fly ash-based geopolymer concrete, mortar and paste cured at room temperature", *Polymers*, 13(9), 1473, (2021).
- [37] Davidovits, J., "Geopolymer chemistry and applications", *Geopolymer Institute*, (2008).
- [38] Nath, P., and Sarker, P. K., "Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition", *Construction and Building materials*, 66, 163-171, (2014).
- [39] Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., and Rangan, B. V., "Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete", *Australian Journal of Structural Engineering*, 6(1), 77-86, (2005).
- [40] Fernández-Jiménez, A., and Palomo, A., "Characterisation of fly ashes", Potential reactivity as alkaline cements, *Fuel*, 82(18), 2259-2265, (2003).
- [41] Zawrah, M. F., Gado, R. A., Feltin, N., Ducourtieux, S., and Devoille, L. J. P. S., "Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks with granulated blast-furnace slag for geopolymer production", *Process Safety and Environmental Protection*, 103, 237-251, (2016).
- [42] Van Deventer, J. S. J., and Provis, J. L., "Alkali-activated materials: state-of-the-art report", *RILEM TC*, (2014).
- [43] ASTM International, "Standard specification for concrete aggregates", *ASTM C33/C33M-03*, (2003).
- [44] Gunasekara, C., Dirgantara, R., Law, D. W., and Setunge, S., "Effect of curing conditions on microstructure and pore-structure of brown coal fly ash geopolymers", *Applied Sciences*, 9(15), 3138, (2019).
- [45] European Committee for Standardization (CEN), EN 12350-2: *Testing fresh concrete – Part 2: Slump test*. Brussels: CEN, (2019).
- [46] European Committee for Standardization (CEN), EN 12390-7: *Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete*. Brussels: CEN, (2019).
- [47] European Committee for Standardization (CEN), EN 12504-4: *Testing concrete – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*. Brussels: CEN, (2021).
- [48] European Committee for Standardization (CEN), EN 12390-3: *Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens*. Brussels: CEN, (2019).
- [49] Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., and Rangan, B. V., "Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete", *Australian Journal of Structural Engineering*, 6(1), 77-86, (2005).
- [50] Shi, C., Roy, D., and Krivenko, P., "Alkali-activated cements and concretes", *CRC press*, (2003).
- [51] Provis, J. L., and Van Deventer, J. S. J. (Eds.), "Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications", *Elsevier*, (2009).
- [52] Mindess, S., Young, F., and Darwin, D., "Concrete 2nd edition", *Technical Documents*, 585, (2003).
- [53] Shi, C., Roy, D., and Krivenko, P., "Alkali-activated cements and concretes", *CRC press*, (2003).
- [54] Kong, D. L., and Sanjayan, J. G., "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete", *Cement and concrete research*, 40(2), 334-339, (2010).
- [55] Provis, J. L., and Van Deventer, J. S. J. (Eds.), "Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications", Elsevier, (2009).
- [56] Al Bakria, A. M., Kamarudin, H., BinHussain, M., Nizar, I. K., Zarina, Y., and Rafiza, A. R. "The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers", *Physics Procedia*, 22, 286-291, (2011).
- [57] Sajan, P., Jiang, T., Lau, C., Tan, G., and Ng, K. "Combined effect of curing temperature, curing period and alkaline concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer", *Cleaner Materials*, 1, 100002, (2021).
- [58] Temuujin, J., Williams, R. P., and Van Riessen, A., "Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature", *Journal of materials processing technology*, 209(12-13), 5276-5280, (2009).