

Atf İçin: Yazıcı N, Karagöl F, 2022. Uçucu Kül Esaslı ve Cüruf Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(3): 1592 - 1606.

To Cite: Yazıcı N, Karagöl F, 2022. Examination of Mechanical and Durability Properties of Fly Ash Based and Slag Added Geopolymer Concretes. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(3): 1592 - 1606.

Uçucu Kül Esaslı ve Cüruf Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması

Nisa YAZICI¹, Fatma KARAGÖL^{1*}

ÖZET: Bu çalışmada, uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufunun (YFC) geopolimer betonların basınç dayanımı ve durabilite özellikleri üzerindeki sinerjik etkisini araştırmak için alümino-silikat kaynağı olarak UK ve YFC ve aktivatör olarak NaOH ve Na₂SiO₃ seçilmiştir. Bağlayıcı olarak %100-0, %80-20, %70-30, %60-40 ve %50-50 oranlarında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak 5 geopolimer farklı beton grubu üretilmiştir. Yapılan ön deneyler neticesinde, geopolimer beton numunelere 90°C'de 72 saat ısı kürü uygulanmıştır. Üretilen numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları tespit edilmiştir. Durabilite deneyleri kapsamında 28 günlük numuneler 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C olmak üzere 4 farklı yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklıktan sonra numunelerin basınç dayanımı, kılcal su emme katsayıları, ağırlık değişimleri ve ultrasonik ses hızları tespit edilmiştir. İyapı analizi kapsamında yüksek sıcaklık etkisinden sonra SEM analizi yapılmıştır. Sonuç olarak uçucu kül esaslı geopolimer üretiminde cüruf eklenmesi ile betonun mekanik ve durabilite özellikleri gelişmiş ve daha yoğun bir mikroyapı elde edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra tüm karışımlar içinde en yüksek basınç dayanım sonuçları %50 cüruf içeren karışıma aittir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, yüksek sıcaklık, kılcal su emme, UPV, SEM

Examination of Mechanical and Durability Properties of Fly Ash Based and Slag Added Geopolymer Concretes

ABSTRACT: In this study, a mixture of fly ash (UK) and blast furnace slag (YFC) as an aluminosilicate source and NaOH and Na₂SiO₃ as the activators were chosen to investigate the synergistic effects of the UK and YFC on the mechanical and durability properties of geopolymer concrete. 5 different geopolymer concrete groups were produced using fly ash and blast furnace slag at the rates of 100-0, 80-20%, 70-30%, 60-40%, and 50-50% as binders. As a result of the preliminary experiments, the produced geopolymer samples were cured at 90°C for 72 hours. The compressive strengths of 3, 7, 28, and 90 days of produced samples were determined. Within the scope of durability tests, 28 day's samples were exposed to 4 different high-temperature effects such as 200°C, 400°C, 600°C, and 800°C. The compressive strengths, capillary water absorption coefficients, weight changes, and UPV values of the samples were determined after high temperatures. As the internal structure analysis, scanning electron microscopy (SEM) analysis was performed after the high-temperature effect. As a result, with the addition of slag in the production of fly ash-based geopolymer, the mechanical and durability properties of the concrete improved and it was obtained a denser microstructure. After the effect of high temperature, among all mixtures, the highest compressive strength results belong to the mixture containing 50% slag.

Keywords: Geopolymer, fly ash, blast furnace slag, elevated temperature, capillary water absorption, UPV, SEM

¹ Nisa YAZICI ([Orcid ID: 0000-0001-6249-7110](https://orcid.org/0000-0001-6249-7110)), Fatma KARAGÖL ([Orcid ID: 0000-0003-1760-1972](https://orcid.org/0000-0003-1760-1972)), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Fatma KARAGÖL, e-mail: fatma.karagol@atauni.edu.tr

Bu çalışma Nisa YAZICI'nın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

GİRİŞ

Yapısal açıdan ve kullanım kolaylığı ve ekonomik yönünden inşaat sektöründe en yaygın kullanılan malzemelerden birisi çimentodur. Normal Portland çimentosunun üretimi için hammadde olarak kalker ve kil gereklidir ve üretim sıcaklığı 1450-1500°C'ye kadar çıkmaktadır (Lu ve ark., 2022b).

Çimento üretimindeki bu hammaddelerin elde edilmesi, pişirilmesi ve öğütülmesi esnasında başta CO₂ olmak üzere (her bir ton çimento için yaklaşık 810-1000 kg) farklı sera gazlarının salınımı, her bir ton çimento için 10 kg atık toz salınımı ve yoğun enerji tüketimi nedeniyle son yıllarda çimento yerine kullanılabilir alternatif malzeme arayışı ve bu malzemelere olan talep giderek önem kazanmaktadır (Hendriks ve ark., 1999; Duxson ve ark., 2006; Stafford ve ark., 2016; Lu ve ark., 2022a, 2022b).

Geopolimerler üzerine yapılan ilk çalışmalar 1970'lere kadar dayanmaktadır ve 1972 yılında Davidovits tarafından kaolinik killerin dönüşümüne dayanan bir yöntem geliştirilmiştir. Daha sonra ise 1975 yılında Davidovits kendi kurduğu laboratuvarında metakaolin ve çözünebilir alkali silikat esaslı geopolimerik bir likit bağlayıcı üretmeyi başarmıştır. Davidovits karışım esnasında oluşan reaksiyonların ekzotermik olduğunu ve ısı kütü uygulandığında reaksiyonların çok daha hızlı oluştuğunu ve 120°C'de yaklaşık 2 dk'da üretilen bağlayıcının sertleştiğini ifade etmiştir. Kür işlemi farklı sıcaklıklarda ve farklı ortamlarda uygulanabilmektedir (Davidovits, 1991). Öyle ki sıcaklıklar genellikle 60-90°C arasında değişirken laboratuvar ortam şartlarında da sertleşerek dayanım kazanabilen betonların üretilmesi mümkündür (Mo ve ark., 2014; Hassan et al., 2019; Sharma et al., 2021). Ancak sıcaklık ekzotermik reaksiyonları hızlandırdığı için istenen özellikler çok daha kısa sürelerde elde edilebilmektedir. Yüksek sıcaklığın pozitif yönde etki ettiği bu geopolimerizasyon sürecinde, bağlayıcı malzemedeki silika ve alümina esaslı oksitler ile alkali çözeltiler –Si-O-Al-bağlarını oluşturmak için reaksiyona girmektedir. (Duxson ve ark., 2006; Perera ve ark., 2007; Ng ve ark., 2018; Sarfaraz Ali ve Sachan, 2021). Reaksiyonlar neticesinde genel olarak ilk oluşan yapılar ise (Poly-sialate) (–Si–O–Al–O), (Poly-sialate-siloxo) (–Si–O–Al–O–Si–O–) ve (Poly-sialate-disiloxo) (–Si–O–Al–O–Si–O–Si–O–)'dur ve bu yapıların içinde en kararlı yapı olarak (Poly-sialate-siloxo) (Si/Al=2:1) kabul edilmektedir (Lu ve ark., 2022b).

Geopolimerizasyon yöntemi ile üretilen betonlarda aynı yapılar oluşmaktadır ve bu üç boyutlu uzun polimerik zincir yapısı sayesinde 100 MPa gibi yüksek basınç dayanımları, yüksek termal direnç ve yüksek durabilite özelliklerinin (donma-çözülme, asit, yangın ve sülfat direnci) elde edilmesi mümkündür (Neupane, 2016). Geopolimer betonların basınç dayanımları alkali çözeltili tipi, CaO içeriği, NaOH konsantrasyonu, Na₂SiO₃/NaOH oranı, Si/Al oranı ve kür koşulları gibi birçok parametreden etkilenmektedir.

Volkanik kül, metakaolin, pirinç kabuğu külü, volkanik kayalar gibi doğal puzolanik malzemeler veya uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi SiO₂ ve Al₂O₃ içeren yapay puzolanik malzemeler geopolimer üretiminde kullanılmaktadır (Nawaz et al., 2020). Geopolimerler alüminosilikat esaslı bu yapay veya doğal puzolanik malzemelerin NaOH, Na₂SiO₃, KOH, K₂SiO₃ vb. alkali aktivatörler ile sentezlenmesiyle elde edilmektedir (Neupane, 2016; Özcan ve Güngör, 2019; Al-Mashhadani, 2021; Ekinci ve Türkmen, 2021; İsa Atabey ve Ay, 2021). Puzolanik malzemenin kimyasal bileşimi, polimerizasyon işlemi yoluyla mekanik olarak sağlam bir bağlayıcının üretilmesinde önemli bir faktördür (Lloyd ve Rangan, 2010; Sharma ve ark., 2021). Endüstriyel atık ürünleri olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi malzemelerin geopolimer üretiminde kullanılması bu malzemelerin depolama sorununu ortadan kaldırarak atık bertarafına katkı sağlamaktadır (Das ve

ark., 2021; Chithambar Ganesh ve ark., 2021). Ayrıca uçucu küldeki yüksek SiO_2 ve Al_2O_3 içeriği sayesinde geopolimer betonda yüksek bağ kuvveti oluşmaktadır. Literatürde yüksek sıcaklıkta kürden sonra uçucu kül esaslı geopolimer betonların yüksek mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip olduğu ifade edilmektedir. (Deb ve ark., 2014).

Uçucu kül, cüruf, palm yağı külü ve cam parlatma tozu gibi farklı yapılarıdaki puzolanik malzemelerin birlikte kullanımı alkali aktivasyonundan kaynaklanan karışım sisteminin etkisiyle bağlanma yapısı daha yüksek jeller oluşmasına katkı sağlamaktadır. Örneğin mekanik performans ve üstün dayanıklılığın geliştirilmesi için bu karışım yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemle üretilmiş geopolimer betonların normal Portland çimentosu ile üretilmiş betonlara kıyasla çok daha yüksek durabilite özelliklerinin olduğu görülmektedir (Li ve Liu, 2007; Lloyd ve Rangan, 2010; Gustavo ve ark., 2016; de Azevedo ve ark., 2020; Tayeh ve ark., 2021a; Bellum ve ark., 2021; Agustini ve ark., 2021; Kwek ve Awang, 2021; Rashad ve Gharieb, 2021; Wongkvanklom ve ark., 2021). Özellikle yüksek fırın cürufunun uçucu kül esaslı geopolimer beton karışımına dâhil edilmesinin, kalsiyum açısından zengin bir atık malzeme olduğu için dayanım ve dayanıklılık açısından önemli olduğu ifade edilmiş ve bu durumun bir başlangıç ısı kaynağı sağlayarak polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmaya yardımcı olduğu literatürde ifade edilmiştir (Roy, 1999; Davidovits, 2020; Sharma ve ark., 2021).

Çimento kullanımının minimize edildiği veya tamamen bertaraf edildiği geopolimerizasyon ile üretilen betonlarda birçok özellik bağlayıcı tipi ve dozajı, aktivatör tipi ve dozajı, kür sıcaklığı ve süresi gibi kür koşulları, gerek bağlayıcı malzemenin gerekse aktivatörün Si/Na oranı ve malzemelerin birlikte kullanımından doğan sinerjik etkilerinden dolayı değişmektedir. Bu bağlamda ilgili literatür incelendiğinde UK ve YFC'nin özellikle yangın sonrasında kılcal su emme katsayısı ve diğer mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki sinerjik etkisine dair araştırmalar çok sınırlıdır. Bu sebeple günümüzde kullanılan pek çok yapay veya doğal puzolanların ve aktivatörlerin birlikte farklı karışım oranlarıyla kullanımının üretilen betonların mekanik ve durabilite özelliklerine etkisinin araştırılması gereklidir. Dolayısıyla bu çalışmada, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi iki farklı yapay puzolanik malzeme ve sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı alkali aktivatör kullanılarak üretilen betonların dört farklı yüksek sıcaklıktan (200°C , 400°C , 600°C ve 800°C olmak üzere) önce ve sonra basınç dayanımı, ağırlık değişimi, UPV ve kılcal su emme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisinden sonra SEM ile içyapıları incelenmiştir.

MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada geopolimer beton üretmek için alüminosilikat kaynağı olarak UK ve YFC kullanılmış ve bu malzemelerin kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilmiştir. UK ve YFC'nin özgül ağırlıkları sırasıyla 2.18 ve 2.88 g cm^{-3} 'tür.

Çizelge 1. UK ve YFC'nin kimyasal bileşimleri

Bileşim (%)	Uçucu Kül	Yüksek Fırın Cürufu
SiO_2	59.75	37.4
Al_2O_3	22.20	10.38
Fe_2O_3	7.654	1.30
CaO	3.364	30.93
MgO	1.851	7.21
SO_3	0.129	0.77
Na_2O	1.771	0.39
K_2O	1.356	0.69
Cl	0.077	0.048

Alkali aktivatör olarak, sodyum hidroksit NaOH ve sodyum silikat Na_2SiO_3 kullanılmış olup kimyasal özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. 10 M sodyum hidroksit çözeltisi hazırlanırken karışım

suyu olarak, Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi şebeke suyu kullanılmıştır. Bütün karışımlarda, CHRYSO-KAT Katkı Malzemeleri San. ve Tic. A.Ş. den temin edilen Chryso Delta UGS-2S isimli naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

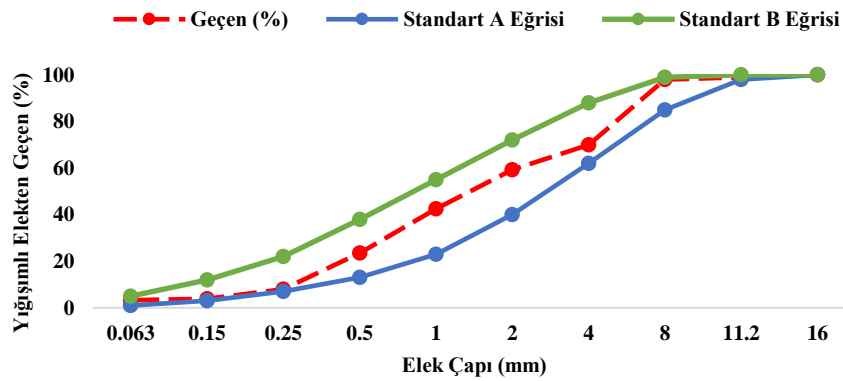
Çizelge 2. NaOH ve Na₂SiO₃'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Özellikler	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Molekül Kütlesi (g mol ⁻¹)	40	122.6
Renk	Beyaz	Renksiz
pH	13-14	11-11.25
Yoğunluk (g cm ⁻³)	2.13	1.37-1.41
Fiziksel hali	Katı	Sıvı
Na ₂ O içeriği (%)	-	11-12.5
SiO ₂ içeriği (%)	-	21.5-24.5
H ₂ O içeriği (%)	-	63-67.5

Bütün karışımlarda 0-4 mm ve 4-8 mm olmak üzere iki sınıfa ayrılmış dere agregası kullanılmıştır. Maksimum agrega tane çapı ise 8 mm olarak alınmıştır. Dere agregasının tane büyüklüğü dağılımı TS EN 933-1'e göre ve özgül ağırlık ve su emme oranı tayinleri ise TS EN 1097-6'ya göre yapılmış (Çizelge 3) ve doymun kuru yüzey haliyle kullanılmıştır (TS EN 1097-6, 2013; TS EN 933-1, 2012). İri ve ince agrega tane sınıfları %75-%25 oranlarında kullanılmıştır ve granülometri eğrisi Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. Agregaların özellikleri

Özellikler	0-4 mm	4-8 mm
Kuru özgül ağırlık (gr cm ⁻³)	2.55	2.59
Doymun kuru yüzey özgül ağırlık (gr cm ⁻³)	2.65	2.66
Su emme oranı (%)	1.1	1.1



Şekil 1. Agreganın granülometri eğrisi

Yöntem

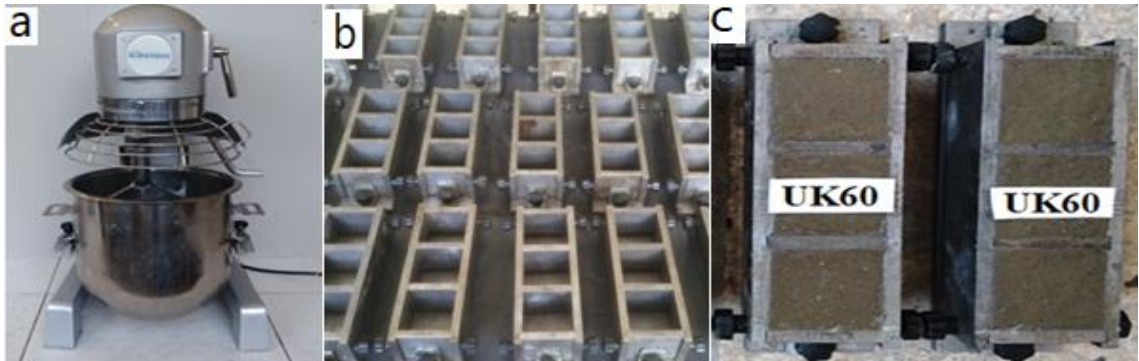
Geopolimer beton üretiminde esas bağlayıcı malzeme UK olup %0, 20, 30, 40 ve %50 oranlarında YFC eklenerek 5 farklı grup oluşturulmuş ve bütün gruplar için toplam bağlayıcı dozajı 500 kg m⁻³ olarak belirlenmiştir. Genel olarak, yüksek bir alkali çözelti konsantrasyonu basınç dayanımını artırır ve birçok araştırmacı tarafından NaOH çözeltisi için 10 M ile 16 M arasında değişen konsantrasyonlar ideal olarak ifade edilmektedir (Zhang ve ark., 2020; Sharma ve ark., 2021). Bu nedenle literatür ışığında yapılan ön deneyler neticesinde alkali aktivatör olarak 2 modül Na₂SiO₃ ve 10 M NaOH karışımının 2/1 oranında kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca bütün gruplar için çözelti/bağlayıcı oranı ise işlenebilirlik, kıvam ve basınç dayanımları açısından 0.43 olarak belirlenmiştir. Uygun ve yeterli kıvam için ek su yerine bağlayıcı ağırlığının %2'si oranında naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmış ve karışım oranları Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Karışım oranları (kg m^{-3})

Karışım Kodları	Ç/B Oranı	Dozaj	UK	YFC	Na_2SiO_3	NaOH	0-4 mm	4-8 mm
U100			500	-			1097	366
U80			400	100			1118	373
U70	0.43	500	350	150	143.33	71.67	1129	376
U60			300	200			1140	380
U50			250	250			1151	384

Karışımlarda kullanılan 10 M NaOH çözeltisi hazırlanırken oluşan reaksiyonlar ekzotermik olduğu için beton dökümünden 24 saat önce hazırlanmıştır. Geopolimer betonların üretiminde ilk olarak bağlayıcı ve NaOH çözeltisi 10 dm^3 kapasiteli 3 kademeli 280 dev dk^{-1} karıştırma hızına sahip karıştırıcıda 2 dk karıştırılmıştır. Daha sonra Na_2SiO_3 eklenerek 2 dk daha karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. En son ise akışkanlaştırıcı katkı ve agrega eklenerek karışım 2 dk daha karıştırılmıştır. Hazırlanan geopolimer beton karışımları $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 'lük çelik küp kalıplara yerleştirilmiş ve sarsma tablasıyla sıkıştırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 2).

Geopolimer beton numuneler hazırlanıp kalıplara yerleştirildikten sonra nem kaybının önlenmesi için kalıplarıyla birlikte yanmaz poşetlere yerleştirilerek 90°C 'lik ısı kürüne maruz bırakılmışlardır. İlk 24 saat sonunda numunelerin kalıpları sökülmüş ve daha sonra numuneler tekrar poşetlenerek ek 48 saat süreyle etüve yerleştirilmiştir (Şekil 3). 72 saatin sonunda ısı küründen çıkarılan numuneler poşetlerinden de çıkarılarak deney gününe kadar (3, 7, 28 ve 90 gün) laboratuvar ortamında bekletilmiştir.



Şekil 2. a) Karıştırıcı b) Numune kalıpları ve c) Hazırlanmış numuneler

Şekil 3. 90°C 'lik ısı kürüne yerleştirilmiş poşetli numuneler

Geopolimer beton numuneler 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra TS EN 12390-3'ye göre basınç dayanımları tespit edilmiştir (TS EN 12390-3, 2019). Ayrıca 28 günlük kür

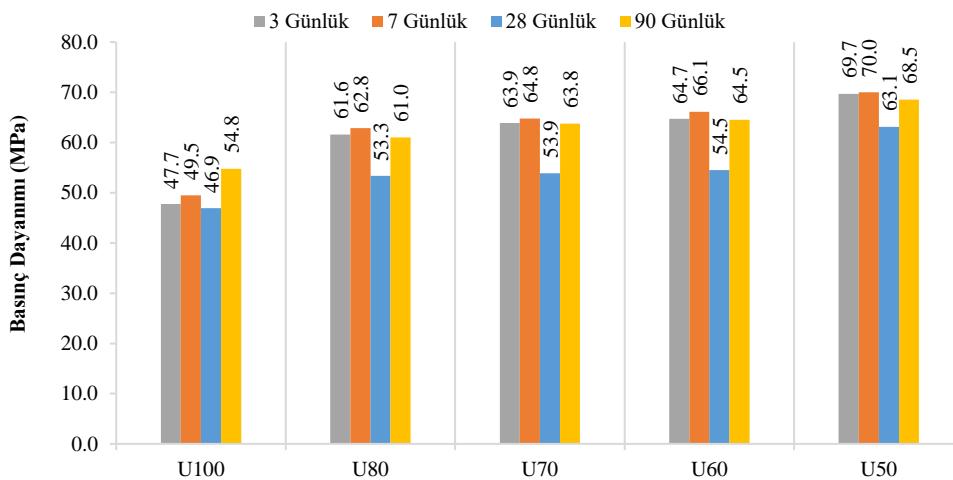
süresi sonunda, üretilen her karışımdan 3'er adet numune 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de 2 saat süreyle yüksek sıcaklığa maruz bırakılıp bu numuneler üzerinde ASTM C 597'ye göre UPV, TS EN 13057'ye göre kılcal su emme, ağırlık değişimi ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır (ASTM C 597-16, 2016; TS EN 13057, 2004). İyapı analizi kapsamında ise üretilen karışımlardan U100, U70 ve U50 gruplarının SEM ile içyapıları incelenmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Basınç Dayanımı

Alkali ile aktive edilmiş veya geopolimer sistemler iki farklı gruptan oluşmaktadır. Birinci grupta alümina ve silika açısından zengin, CaO içermeyen veya çok düşük miktarda içeren F sınıfı uçucu kül veya metakaolin gibi malzemeler kullanılırken, ikinci grupta zengin CaO içeriğine sahip olup Al₂O₃ içermeyen veya düşük miktarda içeren yüksek fırın cürufu gibi bağlayıcı malzemeler kullanılmaktadır. Düşük CaO içeriğinde oluşan jel yapısı N-A-S-H iken zengin CaO içeriğine sahip karışımlarda oluşan jel yapısı C-A-S-H olarak karşımıza çıkmaktadır. Her iki sistemin kombinasyon halinde kullanıldığı sistemlerde (örneğin cüruf ve uçucu külün birlikte kullanımı vb.) her iki jel yapısının karmaşık bir kombinasyonunu görmek mümkün olabilmektedir (Ismail ve ark., 2018; Ghosh ve ark., 2018; Marvila de Azevedo, ve ark., 2021; Tayeh ve ark., 2021).

Dolayısıyla bu çalışma kapsamında kombinasyon halinde kullanılan bağlayıcı sistemle üretilen geopolimer beton numunelerinin 3, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra basınç dayanımları tespit edilmiştir (Şekil 4). Sonuçlar incelendiğinde uçucu kül ve cürufun birlikte kullanıldığı tüm gruplarda cüruf miktarı arttıkça oluşan yapılar da bağlı olarak basınç dayanım değerlerinin arttığı ve 28. günde meydana gelen düşüşe rağmen 90 günün sonunda dayanımlarda tekrar artışların olduğu görülmektedir. Ayrıca erken yaş dayanımları incelendiğinde U100 karışımının 3 günde 90 günlük basınç dayanımının %87'sine ulaştığı görülmektedir. Haddad ve Alshbual doğal puzolanın hammadde olarak kullanıldığı bir çalışmada üretilen geopolimer betonların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmış ve numunelerin 3 günlük kür süresinde ulaşacağı erken dayanımın, nihai dayanımlarının % 70'ini aştığı ifade edilmiştir (Haddad ve Alshbuol, 2016). Bununla birlikte cüruf içeren bütün karışımlarda ise 3 günlük dayanımların 90 günlük dayanımlarla çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Geopolimer betonların basınç dayanımları

Geopolimer betonlarda laboratuvar ortamında havadaki nem ve CO₂ etkisiyle oluşan çiçeklenmeden dolayı 28. günde dayanım düşüşleri olsa dahi ilerleyen süreçte devam eden puzolanik

reaksiyonların etkisiyle beton dayanımlarının arttığı düşünülmektedir. Benzer şekilde Wu ve ark. tarafından yapılan çalışmada kalsine kil esaslı geopolimer betonlarda çiçeklenme etkisinden dolayı basınç dayanımlarının yaklaşık %26.8 oranında düştüğü görülmektedir (Zhang ve ark., 2014; Wu ve ark., 2022). Ayrıca Akbulut ve ark. tarafından yapılan çalışmada perlit esaslı geopolimer betonda dayanım düşüşlerinin olduğu ancak sonradan ilerleyen süreçte tekrardan dayanımların arttığı görülmektedir (Akbulut ve ark., 2021). Dolayısıyla bu betonların mekanik veya durabilite özelliklerinin tespit edilmesi ve nihai bir karara varmak için daha uzun süreli testlerin yapılması elzemdir. 7. günden 28. güne kadar basınç dayanımlarındaki düşüşler incelendiğinde U100, U80, U70, U60 ve U50 grupları için sırasıyla %5.25, %15.12, %16.82, %17.53 ve %9.82 olduğu gözlemlenirken, 28. günden sonraki basınç dayanım artış oranlarının aynı gruplar için sırasıyla %16.82, %14.37 %18.34, %18.36 ve %8.56 olduğu görülmektedir. Ancak nihai dayanımlar incelendiğinde en yüksek sonucun U50 grubuna ait olduğu görülmektedir. Sonuç olarak cürufun uçucu kül esaslı geopolimer beton karışımlarına eklenmesi basınç dayanımları üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir ve dayanım kazanma hızını artırmıştır. Deb ve ark. yaptıkları çalışmalarında uçucu kül esaslı karışıma %10 ve %20 oranında cüruf ekleyerek ürettikleri geopolimer betonların basınç dayanımlarının yaklaşık %17 arttığını belirtmişlerdir (Deb ve ark., 2014).

Ayrıca yapılan bir başka araştırmada yüksek CaO içeriğine ek olarak YFC'nin yüksek amorf yapısı ve reaktivitesinin sadece geopolimerizasyon hızını arttırmakla kalmadığı, aynı zamanda daha fazla C-S-H jel potansiyeli oluşturduğu ifade edilmiştir. Böylece mikro yapının iyileştirilmesi ile önemli bir dayanım kazanımı elde edilmiştir (Oh ve ark., 2010; Nath ve Sarker, 2014; Negahban ve ark., 2021).

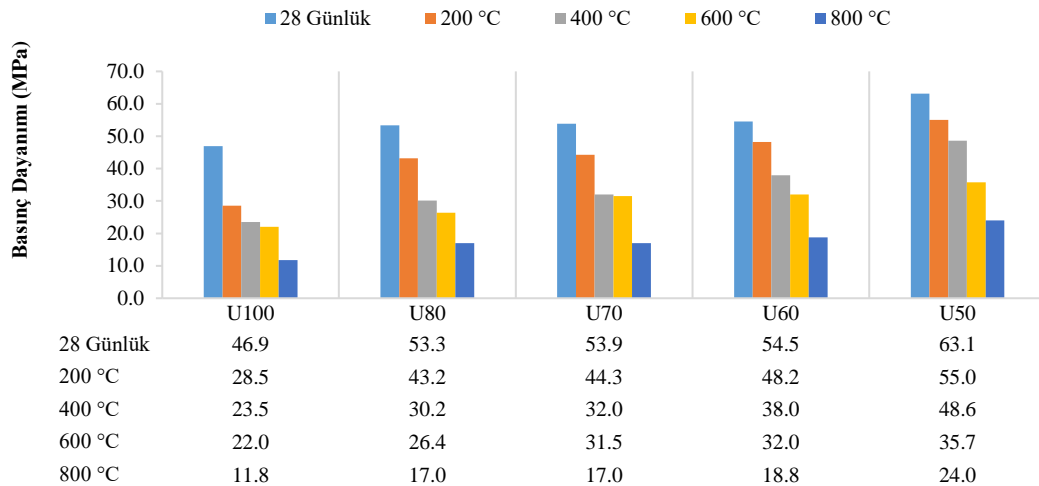
Yüksek sıcaklık etkisi

Basınç dayanımı değişimi

Geopolimer beton numunelerinin 28 günlük ve 4 farklı yüksek sıcaklık etkisinden sonraki basınç dayanım sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, yüksek sıcaklık etkisinden sonra geopolimer betonların basınç dayanımlarında düşüş olduğu ve sıcaklık arttıkça basınç dayanımlarındaki düşüşlerin arttığı gözlemlenmektedir.

U100, U80, U70, U60, U50 karışımlarının 28 günlük basınç dayanımlara göre düşüş oranları 200°C için sırasıyla %39.16, %19, %17.76, %11.63, %12.8 olarak elde edilmiştir. Karışımların basınç dayanımlarındaki düşüşler incelendiğinde genellikle cüruf oranı arttıkça dayanım düşüşlerinin azaldığı ve betonların daha durabil olduğu görülmektedir. Örneğin 400°C için U100, U80, U70, U60, U50 karışımlarının 28 günlük basınç dayanımlarına göre düşüş oranları %43.44, %40.52, %30.26 ve %23 olarak elde edilmiştir. Özellikle 400°C'den sonra daha fazla dayanım düşüşleri elde edilmiş ancak en fazla düşüş 800°C için tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra beton bünyesindeki suyun bir kısmını 200°C civarında kaybetmekte ve sonuçta büzülme ve çatlaklar oluşmaktadır. Bu büzülme ve çatlaklar sonucunda dayanım kayıpları oluşmaktadır. Luo ve ark. yaptıkları çalışmada %5 cüruf katkılı ve uçucu kül esaslı geopolimer betonu 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C yüksek sıcaklığa maruz bıraktıktan sonra 100°C'ye kadar dayanımın arttığını ancak 200-600°C arasında kademeli olarak dayanımın düştüğünü ifade etmişlerdir (Luo ve ark., 2022).

Ayrıca 800°C'de geopolimer betonlar bünyelerindeki suyu kaybetmeler dahi 1000°C gibi çok yüksek sıcaklıklarda dayanım düşüşleri ile beraber stabiliteyi koruyabilmektedir (Barbosa ve MacKenzie, 2003; Akbulut ve ark., 2021; Karagöl ve ark., 2021; Turhan ve ark., 2021).



Şekil 5. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra geopolimer betonların basınç dayanımları

Bütün gruplar içinde en fazla dayanım kaybı 800°C’de U100 grubu için elde edilmiş olup %68.56’dır. Aynı sıcaklık derecesinde en düşük basınç dayanım kaybı ise %61.95 olup yine U50 grubu için elde edilmiştir. Ayrıca üretilen betonların görsel incelemesinde 600°C’ye kadar çatlaklar olmakla birlikte parçalanmadığı ancak 800°C’den sonra içyapılarının değişimi ve sinterleşme gibi reaksiyonlar neticesinde var olan çatlakların ilerlediği, ufalanmaların ve renk değişimlerinin olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Kuranlı ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada geopolimer betonun 600°C ve 900°C’de sırasıyla yaklaşık olarak %54 ve %93’lere varan basınç dayanım kayıplarının olduğunu ifade etmişlerdir (Kuranlı ve ark., 2022).

Ağırlık değişimi

Üretilen her gruptan en az 3’er adet numunenin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında ağırlıkları tespit edilerek, elde edilen sonuçlar yüzde olarak Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 51. Yüksek sıcaklık sonrası ağırlık değişimi

Karışımlar	Ağırlık Değişimi (%)			
	200°C	400°C	600°C	800°C
U100	0.97	1.81	3.48	7.19
U80	0.33	2.14	3.27	6.22
U70	0.37	2.19	3.47	6.70
U60	0.40	2.18	3.61	6.88
U50	0.65	2.24	4.28	6.00

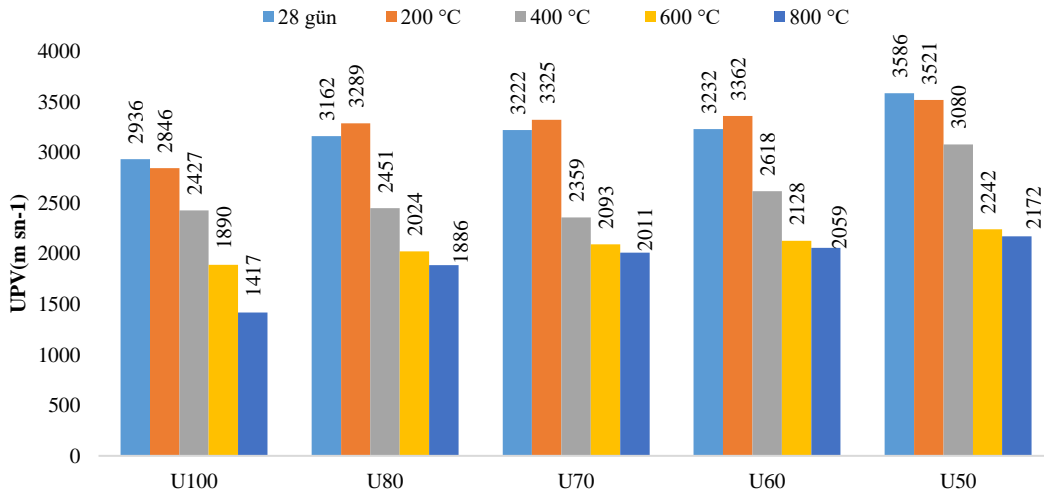
Numunelerin bünyelerindeki suyun yüksek sıcaklık etkisiyle azalmasından dolayı ağırlık değişimleri kaçınılmazdır. Geopolimer beton numunelerinin 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C’lik yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki ağırlık değişimi sonuçları incelendiğinde bütün gruplarda sıcaklık artışı ile kayıp oranlarının yükseldiği görülmektedir. 800°C yüksek sıcaklıktan sonra %100 uçucu kül içeren karışımda ağırlık kaybının tüm gruplar içinde maksimum olduğu gözlenmektedir. Ayrıca bütün gruplar içerisinde ve tüm sıcaklıklar için en düşük ağırlık kayıpları U80 grubuna aittir. Diğer karışımlarda cüruf oranı arttıkça ağırlık değişim yüzdeleri artmaktadır. Sıcaklık artışı ile matraste dehidrasyon oluşur, su yüzeye doğru hareket ederek numuneyi terk eder. Bu durum mikro yapıya zarar vermekte ve geopolimer numunelerde ağırlık kaybına neden olmaktadır (Kong ve ark., 2007). Kuranlı ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada yüksek sıcaklık etkisinden sonra geopolimer beton numunelerinin ağırlık değişimleri incelenmiş ve 300°C, 600°C ve 900°C’de yaklaşık olarak sırasıyla %4.65, %6.13 ve %10.8’lik bir kayıp olduğu ifade edilmiştir (Kuranlı ve ark., 2022).

UPV

UPV deney metodu beton numuneler üzerinde uygulanan ve en çok tercih edilen tahribatsız deney yöntemlerinden birisidir. Bu çalışmada da yüksek sıcaklık etkisinden önce (28 günlük) ve 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'lik yüksek sıcaklık etkisinden sonra karışımların UPV değerlerinin basınç dayanımları ile paralel olacak şekilde azaldığı görülmektedir (Şekil 6). Karışımlar incelendiğinde hem 28 günlük en yüksek sonucun hem de yüksek sıcaklık etkisinden sonra bütün sıcaklık değerleri için elde edilen en yüksek sonuçların U50 karışımına ait olduğu gözlenmektedir. Bu durum bağlayıcı malzeme olarak karışımlara YFC eklenmesine atfedilebilir. Çünkü eklenen YFC ile beraber karışımların yüksek reaktivitesi geopolimer betonda reaksiyonların hızlanmasına ve daha fazla Al içeriğine sahip olan C-A-S-H jel yapısının oluşumuna neden olarak daha güçlü bir yapıya yol açmıştır. Bu yapının oluşumu ile basınç dayanımına benzer şekilde UPV değerlerinin de artmasını açıklanabilir (Negahban ve ark., 2021).

Sıcaklık artışıyla azalan UPV değerleri yangın etkisinden sonra mikro yapıda meydana gelen çatlaklar ve boşluklar ile ve nem durumunun da değişmesiyle açıklanabilir. Deneysel sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, başlangıç aşamalarında daha fazla polimerizasyon meydana gelirken mikroyapıdaki boşluklar hızlı bir şekilde dolmakta ve betonun mekanik ve fiziksel özellikleri gelişmektedir. Ancak yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte karışımdaki mevcut nem geopolimer öncü çerçevesinden dışarı çıkmaktadır. Bu nem kaybı, yapıyı gözenekli ve zayıf hale getirmektedir (Elvery ve Ibrahim, 1976; Ghosh ve ark., 2018).

YFC oranı attıkça içyapının geliştiği ve daha yoğun bir mikro yapının oluşumuyla beton boşluk oranının azaldığı ve UPV değerlerinin basınç dayanımlarında olduğu gibi geliştiği görülmektedir. Ayrıca SEM görüntülerinden de elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklık etkisinden sonra U50 grubunun çok daha yoğun bir mikro yapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır.



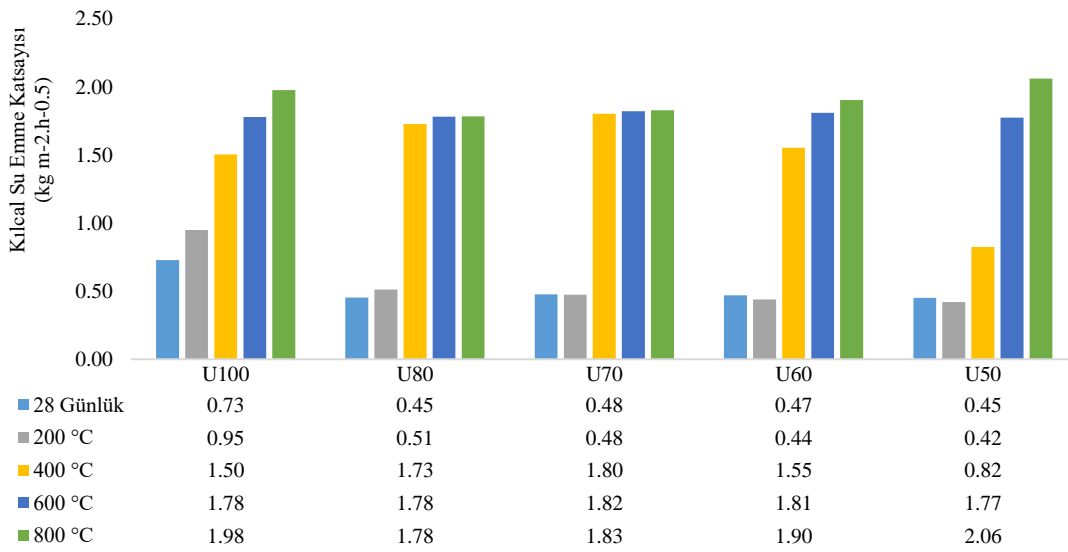
Şekil 6. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra geopolimer betonların UPV değerleri

Kılcal su emme

Betonların kılcal su emme değeri betonun boşluk yapısı ile ilişkili olup özellikle durabilite açısından değerlendirilmesi gereken önemli özelliklerden birisidir. Bütün karışımların 28 günlük ve 4 farklı yüksek sıcaklıktan sonra elde edilen kılcal su emme değerleri Şekil 7'de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde sıcaklık arttıkça özellikle 400°C ve sonrasında bütün karışımların kılcal su emme değerlerinin hızla arttığı gözlenmiştir. Genel olarak U50 grubunun 400°C'ye kadar diğer gruplara göre kılcal su emme değerlerinin oldukça düşük olduğu ve 600°C'den sonra ise bütün grupların kılcal su

emme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca karışımlardaki YFC oranı arttıkça hem 28 günlük numuneler için hem de 200°C, 400°C ve 600°C yüksek sıcaklık etkisinden sonra kılcal su emme değerlerinin düştüğü gözlenmektedir. Karışımlardaki YFC oranı arttıkça bağlayıcı malzemedeki CaO artmakta ve geopolimerizasyon reaksiyonları sonucunda oluşan N-A-S-H jellerinin dışında ek olarak C-A-S-H jel yapısının da oluşması boşlukların daha fazla dolmasını sağlarken betonun permeabilitesi azalmaktadır. (Negahban ve ark., 2021).

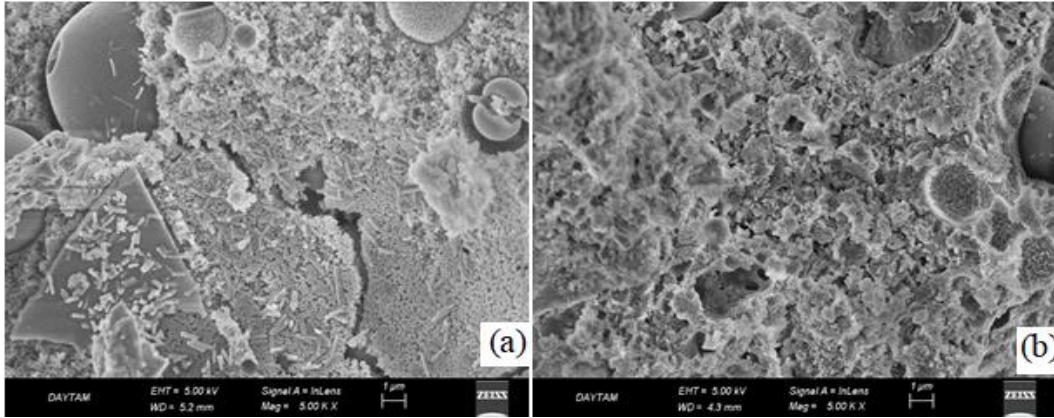
Ancak 800°C'den sonra U80 karışımının kılcal su emme katsayısı 1.78 kg m⁻².h^{-0.5} iken U50 karışımının kılcal su emme katsayısı ise 2.06 kg m⁻².h^{-0.5} olarak elde edilmiştir. Bu değerler aynı sıcaklık için en yüksek ve en düşük değerlerdir. Normal betonla kıyaslandığında ise yangın etkisinden sonra dahi geopolimer beton numunelerinin kılcal su emme değerlerinin normal betonun kılcal su emme değerinden çok daha düşük olduğu gözlenmektedir.



Şekil 7. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra geopolimer betonların kılcal su emme katsayıları

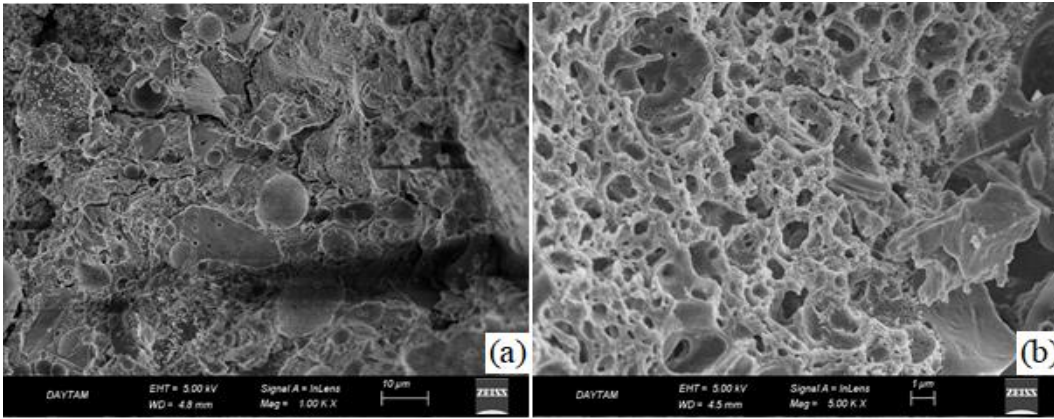
SEM

Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra içyapılarında meydana gelen değişimleri incelemek amacıyla basınç dayanımı, UPV ve kılcal su emme deney sonuçlarına göre seçilen U100 ve U50 karışımlarının 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'deki SEM görüntüleri Şekil 8-11'de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde 200°C ve 400°C'de bazı mikro çatlaklar olmakla birlikte mikroyapının daha stabil olduğu ancak 600°C ve 800°C'de dehidrasyonun ilerlemesi neticesinde daha boşluklu bir yapının oluştuğu ve var olan çatlakların büyüdüğü gözlenmektedir. Özellikle U100 karışımı için 200°C'de boşluk ve derin çatlaklar fark edilmekte ve iğnemsî formda veya kümelenmiş halde jel yapısının oluştuğu görülmektedir. Buna karşın YFC içeren U50 karışımının 200°C'de yine iğnemsî formda veya kümelenmiş halde jel yapısı ile beraber çok daha yoğun ve boşluksuz bir matris yapısına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 8. U100 karışımının 200°C (a) ve 400°C (b) için SEM görüntüleri

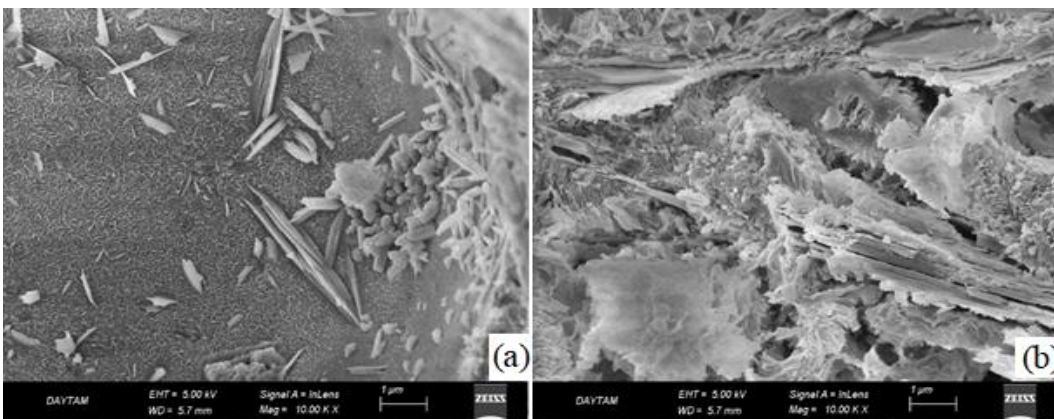
400°C için her iki karışımın mikro yapıları benzerlik göstermekle beraber U50 karışımında kümelenmiş yapılar daha çok dikkat çekmektedir. 600°C’de ise numunelerin içerisindeki serbest suyun buharlaşması ve hidroksil gruplarının kademeli olarak salınması ve numuneyi terk etmesi nedeniyle U100 ve U50 karışımlarının her ikisi içinde boşluklar ve çatlaklar daha fazla göze çarpmaktadır.



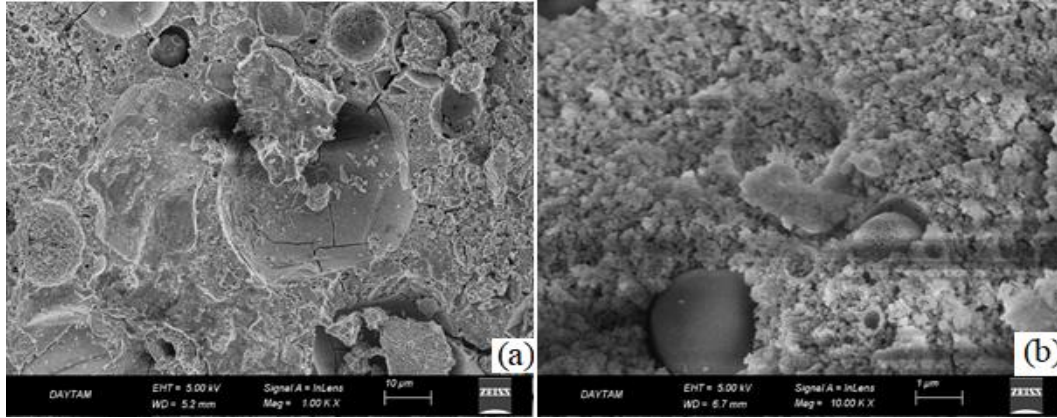
Şekil 9. U100 karışımının 600°C (a) ve 800°C (b) için SEM görüntüleri

U100 karışımı 800°C’de oldukça boşluklu bir yapıya sahipken, U50 karışımının genel olarak daha yoğun bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Sonuçta numuneler daha gözenekli hale gelmekte ve bu yüzden daha kusurlu ve çatlaklı bir yapı oluşmaktadır. Bu kusurlar ve çatlaklar mekanik özelliklerde dikkate değer bir düşüşe neden olmuştur (Song ve ark., 2018; Wang ve ark., 2022).

Literatürde yapılan benzer çalışmalar incelendiğinde 800°C’den daha yüksek olan sıcaklıklarda geopolimer betonların içyapılarında tahribat oranının arttığı ve çatlak ve boşlukların büyüdüğü ve mikroyapının bozulduğu görülmektedir (Kuranlı ve ark., 2022).



Şekil 10. U50 karışımının 200°C (a) ve 400°C (b) için SEM görüntüleri



Şekil 11. U50 karışımının 600°C (a) ve 800°C (b) için SEM görüntüleri

SONUÇ

Uçucu kül esaslı ve cüruf katkılı geopolimer beton üretiminde, 90°C ve 72 saat ısı küründe NaOH ve Na₂SiO₃ alkali aktivatörlerin birlikte kullanımının erken yaş dayanımına pozitif yönde etki ettiği görülmektedir. Erken yaş dayanımındaki artışa cürufun etkisi dikkate değerdir. Laboratuvar şartlarında bırakılan numunelerde 28. güne kadar olan dayanım düşüşlerinin mevcut ortamdaki CO₂ ve olası nem varlığında oluşabilecek çiçeklenme nedeniyle meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir. Fakat 28. günden 90. güne kadar olan süreçte devam ettiği düşünülen puzolanik reaksiyonlar nedeniyle dayanım artışları meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden sonra bütün sıcaklıklar için karışımların basınç dayanımlarında düşüşler olmakta fakat cüruf oranı arttıkça dayanım düşüşlerinin azaldığı ve betonların daha durabil olduğu görülmektedir. Örneğin 200 ve 400°C’de yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra en düşük dayanım kaybı oranları U50 grubuna ait olup sırasıyla %12.8 ve %23’tür. Özellikle 400°C’den sonra daha yüksek dayanım düşüşleri elde edilmiş ancak en fazla düşüş 800°C için tespit edilmiştir. Bütün gruplar içinde 800°C’deki en fazla dayanım kaybı U100 grubu için %68.56 olarak elde edilmiştir ve yine bu karışımın aynı sıcaklıktaki ağırlık kaybı maksimum değere sahiptir. Sıcaklık derecesi arttıkça tüm gruplarda ağırlık kayıpları artmıştır. En düşük ağırlık kayıpları ise U80 grubuna aittir. Basınç dayanım ve UPV deney sonuçları karşılaştırıldığında en yüksek sonuçların U50 grubuna ait olduğu görülmektedir. Kılcal su emme katsayıları incelendiğinde ise özellikle 800°C için en düşük katsayının U80 grubuna en yüksek kılcal su emme katsayısının ise U50 grubuna ait olduğu görülmektedir. Üretilen geopolimer betonların normal Portland çimentosu ile üretilen betona göre özellikle kılcal su emme ve ağırlık değişimleri açısından çok daha iyi performans sergilediği görülmektedir. SEM analizleri neticesinde karışımların yüksek sıcaklık etkisinden sonra içyapıları incelendiğinde cüruf katkılı karışımların özellikle 400°C altında iğnemsî formda veya kümelenmiş halde jel yapısı ile beraber çok daha yoğun ve boşluksuz bir matris yapısına sahip olduğu görülmektedir. U100 grubunda daha fazla çatlak oluşumu görülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Programı tarafından desteklenen “Yüksek Sıcaklıktan Sonra Asit, Sülfat ve Tuz Etkisine Maruz Kalan Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması” isimli FYL-2021-9650 kodlu yüksek lisans tez araştırma projesi ile desteklenmiştir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Akbulut F, Polat R, Karagöl F, 2021. Erzurum Pasinler Bölgesi Perlitinin Geopolimer Üretiminde Kullanımının Araştırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10 (1): 37–45.
- Al-Mashhadani M, 2021. Strength Behavior of Geopolymer Based SIFCON with Different Fibers. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28 (28): 1342–1347.
- ASTM C 597-16, 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. 4.
- Barbosa VFF, MacKenzie KJD, 2003. Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Materials Research Bulletin*, 38 (2): 319–331.
- Brough AR, Atkinson A, 2002. Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and Concrete Research*, 32 (6): 865–879.
- Das S, Saha P, Prajna Jena S, Panda P, 2021. Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission – A review. *Materials Today: Proceedings*, 2214-7853: 1-10.
- Davidovits J, 1991. Geopolymers-Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37 (8): 1633–1656.
- Davidovits J, 2020. *Geopolymer Chemistry and Applications*. 5-th edition, A. 680. Institute Geopolymere–Saint-Quentin. France.
- Deb PS, Nath P, Sarker PK, 2014. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design*, 62: 32–39.
- Duxson P, Fernández-Jiménez A, Provis JL, Lukey GC, Palomo A, Van Deventer JSJ, 2006. Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42 (9): 2917–2933.
- Ekinci E, Türkmen İ, 2021. Farklı Aktivatör Ve Ham Madde Değişkenlerinin Geopolimer Hamurun Basınç Dayanımına Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24 (24): 169–175.
- Elvery RH, İbrahim LAM, 1976. Ultrasonic Assessment Of Concrete Strength At Early Ages. *Undefined*, 28 (97): 181–190.
- Ghosh R, Sagar SP, Kumar A, Gupta SK, Kumar S, 2018. Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser. *Journal of Building Engineering*, 16: 39–44.
- Gustavo W, Saavedra V, Daniela Angulo E, Mejía De Gutiérrez R, 2016. Fly Ash Slag Geopolymer Concrete: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (12): 1-8.
- Haddad RH, Alshbuol O, 2016. Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Construction and Building Materials*, 114: 699–707.
- Hendriks CA, Worrell E, Price L, Martin N, Ozawa Meida L, de Jager D, Riemer P, 1999. Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. *Greenhouse Gas Control Technologies*, 4: 939–944.
- İsa Atabey İ, Ay C, 2021. Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Farklı Kür Koşullarında Atık Cam Tozu Esaslı Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24 (24): 184–189.

- Ismail N, El-Hassan H, Asce M, 2018. Development and Characterization of Fly Ash–Slag Blended Geopolymer Mortar and Lightweight Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30 (4): 1-10.
- Kong DLY, Sanjayan JG, Sagoe-Crentsil K, 2007. Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 37 (12): 1583–1589.
- Kuranlı ÖF, Uysal M, Abbas MT, Cosgun T, Niş A, Aygörmez Y, Canpolat O, Al-mashhadani MM, 2022. Evaluation of slag/fly ash based geopolymer concrete with steel, polypropylene and polyamide fibers. *Construction and Building Materials*, 325: 126747.
- Li Z, Liu S, 2007. Influence of Slag as Additive on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (6): 470–474.
- Lloyd NA, Rangan BV, 2010. Geopolymer Concrete with Fly Ash. *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2010, pp:1493–1504.
- Lu C, Wang Q, Liu Y, Xue T, Yu Q, Chen S, 2022a. Influence of new organic alkali activators on microstructure and strength of fly ash geopolymer. *Ceramics International*, 48 (9): 1-8.
- Lu C, Wang Q, Liu Y, Xue T, Yu Q, Chen S, 2022b. Influence of new organic alkali activators on microstructure and strength of fly ash geopolymer. *Ceramics International*, 48 (9): 1-7.
- Luo Y, Li SH, Klima KM, Brouwers HJH, Yu Q, 2022. Degradation mechanism of hybrid fly ash/slag based geopolymers exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 151: 106649.
- Marvila MT, de Azevedo ARG, de Vieira CMF, 2021. Reaction mechanisms of alkali-activated materials. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 14 (3): 1-19.
- Marvila MT, de Azevedo ARG, de Matos PR, Monteiro SN, Vieira CMF, 2021. Rheological and the Fresh State Properties of Alkali-Activated Mortars by Blast Furnace Slag. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14 (8): 1-17.
- Nath P, Sarker PK, 2014. 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.
- Nawaz M, Heitor A, Sivakumar M, 2020. Geopolymers in construction - recent developments. *Construction and Building Materials*, 260: 120472.
- Negahban E, Bagheri A, Sanjayan J, 2021. Pore gradation effect on Portland cement and geopolymer concretes. *Cement and Concrete Composites*, 122: 104141.
- Neupane K, 2016. Fly ash and GGBFS based powder-activated geopolymer binders: A viable sustainable alternative of portland cement in concrete industry. *Mechanics of Materials*, 103: 110–122.
- Oh JE, Monteiro PJM, Jun SS, Choi S, Clark SM, 2010. The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 40 (2): 189–196.
- Özcan U, Güngör S, 2019. Sürdürülebilir Bir Yöntem / Betonda Puzolan Kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15: 176–182.
- Roy DM, 1999. Alkali-activated cements: Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29 (2): 249–254.
- Sharma A, Basumatary N, Singh P, Kapoor K, Singh SP, 2021. Potential of geopolymer concrete as substitution for conventional concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2214-7853: 1-7.

- Song H, Wei L, Ji Y, Cao L, Cheng F, 2018. Heavy metal fixing and heat resistance abilities of coal fly ash-waste glass based geopolymers by hydrothermal hot pressing. *Advanced Powder Technology*, 29 (6): 1487–1492.
- Stafford FN, Raupp-Pereira F, Labrincha JA, Hotza D, 2016. Life cycle assessment of the production of cement: A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, 137: 1293–1299.
- Tayeh BA, Zeyad AM, Agwa IS, Amin M, 2021a. Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15: 1-6.
- Tayeh BA, Zeyad AM, Agwa IS, Amin M, 2021b. Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15: 1-7.
- TS EN 1097-6, 2013. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 12390-3, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 13057, 2004. Beton yapılar, Koruma ve tamir için mamul ve sistemler, Deney metotları, Kılcal su emmeye direncin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS EN 933-1, 2012. Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Turhan D, Karagöl F, Polat R, 2021. Investigation of the Properties of Perlite-Based Geopolymer Concrete with Red Mud. *PACE-2021 International Congress on the Phenomenological Aspects of Civil Engineering*, 2021, pp:1–7.
- Wang J, Zheng C, Mo L, GangaRao H, Liang R, 2022. Assessment of recycling use of GFRP powder as replacement of fly ash in geopolymer paste and concrete at ambient and high temperatures. *Ceramics International*, 2-14.
- Wu B, Ma X, Deng H, Li Y, Xiang Y, Zhu Y, 2022. An efficient approach for mitigation of efflorescence in fly ash-based geopolymer mortars under high-low humidity cycles. *Construction and Building Materials*, 317: 1-10.
- Yip CK, Lukey GC, Van Deventer JSJ, 2005. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, 35 (9): 1688–1697.
- Zhang P, Gao Z, Wang J, Guo J, Hu S, Ling Y, 2020. Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 270: 1-10.
- Zhang Z, Provis JL, Reid A, Wang H, 2014. Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement and Concrete Research*, 64: 30–41.