

Araştırma Makalesi

## Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Alkali Aktivasyonlu Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Performanslarının Araştırılması

Servet YILDIZ<sup>1</sup> , Mehmet EMİROĞLU<sup>2</sup> , Edip Furkan ÖZSOY<sup>3,\*</sup> 

Gönderim: 19.07.2024

Kabul: 07.11.2024

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Malzemeleri Bölümü, Elazığ, Türkiye, [syildiz@firat.edu.tr](mailto:syildiz@firat.edu.tr)

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, [mehmetemiroglu@sakarya.edu.tr](mailto:mehmetemiroglu@sakarya.edu.tr)

<sup>3</sup> Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, [edipfurkan1470@gmail.com](mailto:edipfurkan1470@gmail.com)

\*Sorumlu yazar

**Özet:** Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve F sınıfı uçucu kül (UK) kullanılarak alkali aktivasyonlu kompozitlerin yüksek sıcaklık altındaki davranışları bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışmada, alkali aktivatör olarak  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solüsyonu ile 14 mol konsantrasyonlu NaOH kullanılmıştır. Tüm karışımlarda aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40 olarak belirlenmiş ve üretilen numuneler 90°C aktivasyon sıcaklığına tabi tutulacak şekilde ve ağırlıkça %0 UK-%100 YFC, %75 UK-%25 YFC, %50 UK-%50 YFC, %75 YFC-%25 UK ve %100 UK-%0 YFC kullanılarak seriler hazırlanmıştır. Hazırlanan taze harç numuneleri üzerinde yayılma çapı ve priz süreleri belirlenmiştir. Kalıptan çıkartılan numuneler laboratuvar ortamında 7 ve 28 gün süresince bekletildikten sonra 20°C (laboratuvar sıcaklığı), 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C yüksek sıcaklık altındaki performansları incelenmiştir. Yüksek sıcaklık uygulaması sonrasında numunelerin basınç ve eğilme dayanımları belirlenerek referans numuneyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklık öncesi ve sonrasında numunelerin mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak sıcaklık artışına bağlı olarak hazırlanan kompozit numunelerin dayanımlarında düşüşler gözlemlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve aşınma direnci %50 UK-%50 YFC içeren 20°C'de 28 gün bekletilen referans numunelerinde elde edilmiştir. En düşük değerler ise %75 YFC-%25 UK içeren 800°C'de 28 gün bekletilen numunelerde elde edilmiştir. Karışımlarda yüksek UK kullanımı ile (%75 ve %100) 800°C sıcaklık uygulaması sonrasında dayanım kaybı %30-%50 seviyelerinde kalırken YFC kullanımının yüksek olduğu serilerde yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kayıpları %60-%80 gibi yüksek değerler almıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Alkali aktivasyonlu kompozitler; yüksek sıcaklık; yüksek fırın cürufu; alkali aktivatör; uçucu kül

## Investigation of High Temperature Performance of Fly Ash and Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Composites

**Abstract:** In this study, alkali activated composite specimens were prepared using ground granulated blast furnace slag (YFC) and F class fly ash (UK). NaOH with 14 mol concentration and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  solutions were used as alkaline activators. The activator/binder ratio was set as 0.40 in all mixtures and series were prepared by using 0% UK-100% YFC, 75% UK-25% YFC, 50% UK-50% YFC, 75% YFC-25% UK and

100% UK-0% YFC by weight. The produced samples were subjected to 90°C activation temperature. The demolded specimens were kept in the laboratory for 7 and 28 days and their performances under high temperatures of 20 °C (laboratory temperature), 200°C, 400°C, 600°C and 800°C were investigated. The, compressive strength, flexural strength, tests were performed after determined curing period compared with the reference specimens. In addition, SEM method was used for microstructure analysis of the samples before and after high temperature. As a result, decreases in the strength of the composite specimens prepared due to temperature increase were observed. The highest compressive strength and flexural strength were obtained in the reference specimens containing 50% UK-50% YFC kept at 20°C for 28 days. The lowest values were obtained in specimens containing 75% YFC-25% UK kept at 800°C for 28 days.

**Keywords:** Alkali activated composites; high temperature; blast furnace slag; alkaline activator; fly ash

---

## 1. Giriş

Ekonomi ve sanayi alanında meydana gelen gelişmeler, beraberinde enerji ihtiyacını artırmakta ve neticesinde artan enerji tüketimine karşı alternatif çözümler gerektirmektedir. Bu çözümlerden birisi de sanayisi gelişmiş bölgelerde bulunan fabrikalardan çıkan atıkların değerlendirilip farklı alanlarda kullanılmasıdır. Fiziksel ve mekanik açıdan ön plana çıkan performansları ve çevre dostu olmaları nedeniyle, uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) esaslı alkali aktivasyonlu kompozitler, Portland çimentosuna alternatif olarak büyük potansiyele sahip olmaya adaydırlar. Literatürde alkali aktivasyonlu kompozitler veya başka bir ifadeyle geopolimerler geleneksel Portland çimentosuna alternatif yeni bağlayıcılar olarak ifade edilmekte ve genellikle seramik benzeri özellikleri nedeniyle üstün yangın dayanımı özellikleri sağladıklarına inanılmaktadır [1]. Alkali aktivasyonlu kompozit üretiminde, silis ve alümin içeren yapay ya da doğal puzolanik malzemeler (UK, YFC, silis dumanı, volkanik kül, meta-kaolin, pirinç kabuğu külü, volkanik kayaçlar) veya doğal puzolanik malzemeler vb.) alkali aktivatörlerle sentezlenerek alüminosilikat esaslı bir bağlayıcı elde edilir. Bu yolla hem yeterli dayanım ve dayanıklılığın sağlandığı kompozitlerin üretimi hem de endüstriyel atıkların (UK, YFC gibi) yönetimine katkı sağlayarak çevresel kazanımlar elde edilir [2-5]. Üretiminde hammaddelerin yüksek sıcaklıkta kalsinasyonuna veya sinterlenmesine ihtiyaç olmaması, sadece bazı kısımlarının göreceli olarak düşük sıcaklıkta fırınlanması veya ön işlemden geçirilmesine gerek duyulması, jelleşme işleminin oda sıcaklığından 150 °C'ye kadar düşük sıcaklıkta tamamlanabilir olması yanında üretim sürecinde neredeyse hiç NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> ve CO üretimi olmaması ve CO<sub>2</sub> emisyonların da çok düşük olması nedenleriyle alkali ile aktive edilmiş kompozitler, iklim değişikliği sorunları için gerekli acil çözümlere alternatif oluşturmaktadır [6-7]. 1940'lu yıllardan beri alkali-aktivasyonlu cüruf esaslı kompozitler araştırılmaktadır ve o zamandan beri bu kompozitlerin özellikleriyle ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar genel olarak incelendiğinde, hidrasyon mekanizmaları ve dayanım gelişimi, alkali aktivatör seçimini, mikro yapıyı incelemesi, büzülme ve işlenebilirlik vb. konuları içermektedir [1]. Yapılan araştırmalar alkali aktivasyonlu kompozitlerde UK kullanımı ile yüksek sıcaklıkta küremeye ihtiyaç duyulduğu ve genellikle ortam sıcaklığında alkali aktivatörlerle aktive edilemediği raporlanmıştır. Bu durum, reaksiyon sürecinde tam olarak reaksiyona girmemiş jellerle dolu yapıların oluşmasına ve polimerizasyonun tamamlanamamasına neden olmasına dayandırılmaktadır. Ancak, YFC'nin özellikle CaO içermesi nedeniyle, UK esaslı alkali aktivasyonlu kompozitlerin ortam sıcaklığında dahi dayanım kazanmasına neden olabileceği keşfedilmiştir. Bu sayede enerji tasarrufu sağlanarak, daha da azaltılmış CO<sub>2</sub> emis-

yonları ve atık geri dönüşüme katkı gibi faydalar elde edilebilmektedir. UK-YFC esaslı alkali aktivasyonlu kompozitlerin mükemmel mekanik özellikler, donma-çözülme direnci, korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı ve iyileştirilmiş arayüzey bağ özellikleri gibi benzersiz özelliklere sahip olduğunu belirten çalışmalar literatürde yer almaktadır [7-16]. Günümüze kadar UK veya YFC esaslı alkali aktivasyonlu kompozitlerle ilgili, kür koşulları, durabilite özellikleri, iç yapı özellikleri, farklı puzolanların veya alkalilerin kullanımını gibi çok sayıda çalışma yapıldığı bilinmekle birlikte araştırmacılar bu kompozitlerin karakterizasyonu için çalışmaya devam etmektedirler [17-22]. Yapı malzemelerinin dayanım özellikleri yanında durabiliteleri de her zaman önemli bir kriter olarak ele alınmaktadır. Yapı malzemelerinin çevresel koşullara karşı direncini ifade eden durabilite performansı birçok parametre ile karakterize edilmektedir. Yüksek sıcaklığa karşı direnç bu özelliklerin önemlilerinden biridir. Yüksek sıcaklıkta çimento hidratasyon ürünlerinin dehidrate olmasına benzer şekilde alkali aktivasyon bağları da bozunabilmekte ve ilgili kompozitin fiziksel ve mekanik performansı da dahil olmak üzere durabilitesi azalmaktadır. Bu kapsamda, UK-YFC esaslı alkali aktivasyonlu kompozitlerin yüksek sıcaklık performanslarının araştırılması yönündeki çalışmaların kısıtlı olması nedeniyle bu çalışmada üretilen alkali aktivasyonlu kompozitlerin yüksek sıcaklık (20°C, 200°C, 400 °C, 600°C ve 800°C) altındaki dirençleri incelenmiştir. Bu yönüyle, çimentoya kıyasla daha çevreci yapı malzemelerinin kullanılmasına katkıda bulunmak ve atık malzemelerin alkali aktivasyonlu kompozitler gibi sürdürülebilir yapı malzemelerinin üretimlerinde kullanımının yaygınlaştırılmasına katkıda bulunmak amacıyla yüksek sıcaklık performansları araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Puzolanik Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan YFC öğütülmüş olarak Zonguldak Ereğli Oyak Beton tesisinden, F sınıfı UK ise İskenderun Sugözü Termik Santralinden tedarik edilmiştir. Çalışmada YFC ve UK 125 µm olan elekten elenerek kullanılmıştır. Kullanılan YFC'nin yoğunluğu 2.80 g/cm<sup>3</sup> tür. Tablo 1'de YFC ve UK'nın kimyasal analizi verilmiştir.

**Tablo 1.** Çalışmada kullanılan YFC ve UK'nın kimyasal analizi

Oksit(%)	YFC	UK
SiO <sub>2</sub>	41.00	54.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.32	26.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.11	4.80
SO <sub>3</sub>	0.11	1.70
MgO	7.29	2.50
Na <sub>2</sub> O	0.44	0.40
K <sub>2</sub> O	0.96	0.60
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.76	-
TiO <sub>2</sub>	0.87	1.50
CaO	34.17	3.5

### 2.1.1. Agrega

Yapılan çalışmada Elazığ yöresinden elde edilen maksimum tane çapı 8 mm olan agrega kullanılmıştır.

#### Alkaliler

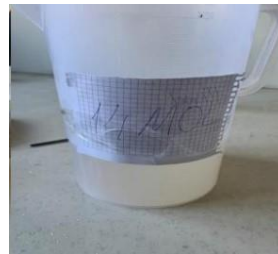
Çalışmada aktivasyon malzemesi olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) kullanılmıştır. Temin edilen NaOH ve sulu çözelti halinde bulunan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'e ait görseller Şekil 1'de, bazı teknik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Çalışmada kullanılan alkali aktivatörlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellik	Sodyum Hidroksit	Sodyum Silikat
Formül	NaOH	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
Renk	Beyaz	Sarımsı
pH	13.5	12.5
Bağıl Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2.12	1.38
1 mol/g	39.996	122.0632
SiO <sub>2</sub>		%23
NaO <sub>2</sub>		%11



a) Sodyum hidroksit



b) Sodyum silikat

**Şekil 1.** Sodyum hidroksit ve sodyum silikat

### Alkali Aktive Edilmiş Kompozitlerin Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Üretilen UK-YFC esaslı alkali aktivasyonlu kompozitlerde aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40, aktivasyon sıcaklığı 90°C, aktivasyon süresi 24 saat, NaOH molaritesi 14M ve NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oranı 1/2 olacak şekilde hem ön denemeler hem de literatür bilgisi dikkate alınarak seçilmiştir. Ayrıca tüm karışımlarsa YFC-UK miktarları ağırlıkça %0-%100, %75-%25, %50-%50, %75-%25 ve %100-%0 olacak şekilde 5 farklı oranda olacak şekilde tasarlanmıştır (Tablo 3).

**Tablo 3.** Alkali aktive edilmiş kompozitlerin karışım oranları (kg/m<sup>3</sup>)

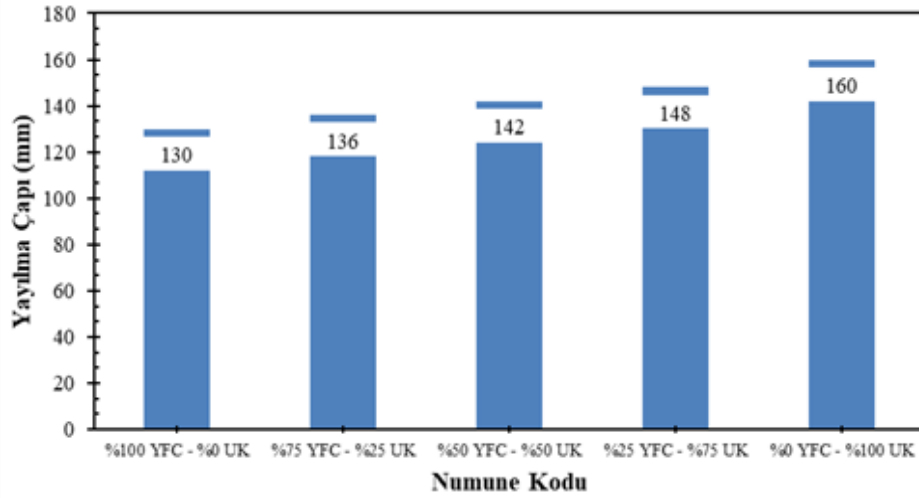
Numunenin Adı	YFC (kg)	UK (kg)	Agrega (kg)	Aktivatör		Akt./Bağ. Oranı
				NaOH (kg)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	
%100UK-%0YFC (Referans)	0	875	1750	116.62	233.37	0.40
%75UK-%25YFC	218.75	656.25	1750	116.62	233.37	0.40
%50UK-%50YFC	437.5	437.5	1750	116.62	233.37	0.40
%25UK-%75YFC	656.25	218.75	1750	116.62	233.37	0.40
%0UK-%100YFC	875	0	1750	116.62	233.37	0.40

### Alkali Aktive Edilmiş Kompozitlerin Hazırlanması

Karışıma önce aktivatörün hazırlanmasından başlanılmıştır. Aktivatör soğumaya bırakıldığında malzemeler hassas terazide tartılarak kap içerisinde homojen hale getirilmiştir. Agregası, UK ve YFC kuru karışımı 1 dakika düşük devirde mikser içerisinde karıştırıldıktan sonra kademeli olarak alkali solüsyon karışıma eklenerek 2 dakika düşük devirde ve 1 dakika yüksek devirde karıştırılarak numune hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Hazırlanan karışım hızlıca kalıp yağıyla yağlanan kalıplara yerleştirilmiştir. Deneylerde 5x5x5 cm küp (basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve birim ağırlık deneylerinde) ve 4x4x16 cm'lik (eğilme dayanımı deneylerinde) prizmatik çelik kalıplar kullanılmıştır. Kalıplara yerleştirilen numuneler hızlıca şişlenerek üzeri mala yardımıyla düzeltilmiş daha sonra 24 saat 90°C sıcaklıktaki etüve yerleştirilmiştir. Etüvden çıkartılan numuneler 7 ve 28 gün süresince laboratuvar ortamında bekletilmiştir. İlgili sürelerde bekletilen numuneler 20°C (laboratuvar sıcaklığı), 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklarına 1 saat süreyle maruz bırakılıp belirlenen deneyler numuneler üzerinde yürütülmüştür.

### Yayılma Çapı Deney Sonuçları

Üretilen numunelerin taze harç özelliklerinden biri olan yayılma çapı deney sonuçları Şekil 2’de verilmiştir.

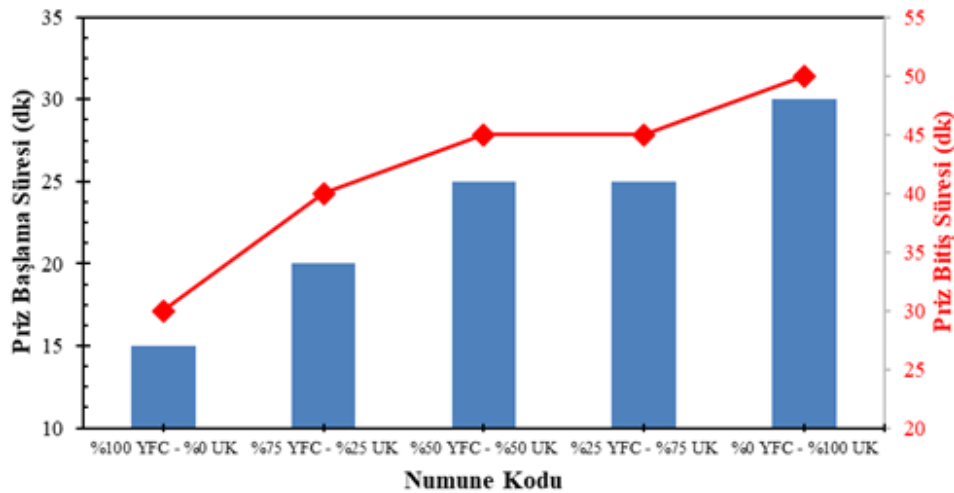


Şekil 2. Yayılma çapı deney sonuçları

Şekil 2 incelendiğinde, UK miktarındaki artışla birlikte yayılma çapı değerlerinde artış ve YFC artışıyla yayılma çapı değerlerinde azalma gözlemlendiği görülmektedir. Tüm karışımların yayılma çapı değeri 130 ile 160 mm arasında değişmekte olup işlenebilir bir kıvamda oldukları söylenebilir. Daha kohezif harç karışımları genellikle düşük yayılma çaplarına sahipken, küresel taneli UK'nin kullanımı taneler arasındaki sürtünmeyi azaltarak daha yüksek yayılma çaplarına yol açmaktadır. Su/bağlayıcı oranı ve silis dumanı oranının artmasıyla parçacıkların dağılması ve sürtünmenin azalması, literatürde yayılma çapı değerlerinin artmasına neden olabileceği belirtilmektedir [23]. Benzer durumun bu çalışmada elde edilen yayılma çapı değerleri için söz konusu olduğu söylenebilir.

### Priz Süresi Deneyleri

Çalışmada elde edilen priz başlangıç ve priz sona erme süreleri Şekil 3’te sunulmuştur.



Şekil 3. Priz başlama ve priz sona erme süreleri

Şekil 3 incelendiğinde, priz başlama sürelerinin 15 ile 30 dakika arasında ve priz sona erme sürelerinin 30 ile 50 dakika arasında değişimler gözlemlendiği anlaşılmaktadır. Bu değerler, üretilen kompozitlerin çok hızlı priz sürelerine sahip olduğunu göstermekte olup, bu kompozitlerin üretiminde priz sürelerinin daha uygun bir çalışma süresi için farklı yöntemlerle düzenlenmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. Şekil 3'ten anlaşıldığı üzere, UK miktarındaki artış priz başlama ve sona erme sürelerinde bir artışa neden olmakla birlikte, YFC'nin bünyesindeki CaO sayesinde kendi başına bağlayıcı özellik göstermesinden dolayı karışımlarda YFC oranının azalmasıyla priz başlangıç ve sona erme sürelerinin kısaldığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, alkali aktivasyonlu kompozitlerde YFC kullanımıyla ilgili olası kıvam ve prizle ilgili sorunların üstesinden gelmek için UK'nın bir alternatif olarak değerlendirilebileceği anlaşılmaktadır.

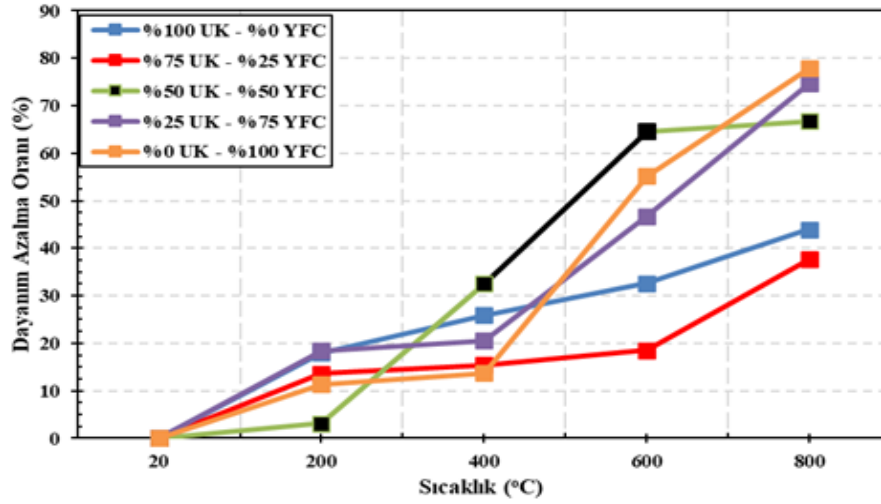
### Basınç Dayanımı Değerleri

7 ve 28 gün bekleme süresi ardından yüksek sıcaklık deneylerine maruz bırakılan serilere ait basınç dayanımı sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, yüksek sıcaklığa maruz bırakılan serilerde sıcaklık artışına bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinde beklendiği üzere azalmalar gözlemlenmiştir. Tablo 4'e göre en yüksek dayanımın 73.38 MPa ile 20°C sıcaklık altındaki %50 UK %50 YFC kodlu seriden elde edildiği gözlemlenirken en düşük basınç dayanımının ise 9.91 MPa ile 800°C sıcaklık altındaki 28 günlük numunelerde %75 YFC içeren serilerde elde edilmiştir. UK kullanılan serilerin dayanım azalma oranları yüksek sıcaklık altında YFC'nin yüksek kullanıldığı oranlara göre daha düşük seviyelerde kalmıştır. 800°C incelendiğinde UK'nın yüksek olarak kullanıldığı (%75 ve %100) serilerde dayanım azalma oranları %30-%50 seviyelerinde kalmıştır. YFC'nin yüksek oranda kullanıldığı (%50, %75 ve %100) serilerde ise dayanım azalma oranları %60-%80 aralığında meydana gelmiştir. YFC kullanımı ile 400°C sıcaklığa kadar UK kullanılan serilere benzer performanslar gözlemlense de daha yüksek sıcaklıklarda (600°C ve 800°C) YFC kullanımının yüksek sıcaklık performansını olumsuz etkilediği anlaşılmaktadır.

**Tablo 4.** 7 ve 28 günlük serilerin basınç dayanımı değerleri (MPa)

Sıcaklık (°C)	20	200		400		600		800	
Kür Günleri	28	7	28	7	28	7	28	7	28
%100UK- %0YFC (Referans)	38.97	27.22	31.95	22.09	28.88	20.35	26.27	19.25	21.83
%75UK- %25YFC	31.77	21.63	27.45	19.69	26.86	18.49	25.89	18.35	19.82
%50UK- %50YFC	73.38	60.04	71.08	40.02	49.51	23.36	25.99	19.24	24.40
%25UK- %75YFC	39.06	30.95	31.88	28.19	31.03	19.30	20.81	9.15	9.91
%0UK- %100YFC	71.09	61.88	63.04	57.22	61.37	30.89	31.89	15.59	15.78

28 günlük dayanım kazanan serilere ait dayanım azalma grafiği Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda serilere ait 28 günlük basınç dayanımı azalma miktarları

Şekil 4 incelendiğinde 200°C sıcaklıkta %50UK-%50 YFC hibrit karışımının en düşük dayanım azalması değerine sahip olduğu gözlemlenirken daha yüksek sıcaklıklarda (400°C, 600°C ve 800°C) bu seriye ait dayanım azalma değerleri kademeli bir artış göstermiştir. Diğer seriler incelendiğinde 400°C sıcaklığın kritik bir eşik olarak değerlendirilebileceği ve bu sıcaklığa kadar daha düşük seviyelerde bir dayanım azalması değeri gözlemlenirken 600°C ve 800°C sıcaklıklarda dayanım azalması değerlerinin artmış olduğu açıktır. Tüm seriler içerisinde yüksek sıcaklığa karşı en iyi performansın %100 UK - %0 YFC ile %75 UK - %25 YFC hibrit karışımlarından elde edildiği anlaşılmaktadır. Bu durum UK'nın alkalilerle oluşturduğu bağ yapılarının daha stabil olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Yalnızca YFC'nin değerlendirildiği %0 UK - %100 YFC serisinin 28 günlük basınç dayanımı en yüksek (71.09 MPa) değer olarak karışıma çıksa da 800°C sıcaklıkta bu serinin dayanım azalma oranının %70.68 ile en yüksek değerlere ulaştığı anlaşılmaktadır. Bu yönüyle YFC-UK hibrit karışımlarının yüksek dayanım ve yüksek sıcaklık performansının beklendiği uygulamalarda tercih edilebilir.

### Eğilme Dayanımı Değerleri

7 ve 28 gün bekleme süresi ardından yüksek sıcaklık deneylerine maruz bırakılan serilere ait eğilme dayanımı sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.



**Tablo 5.** 7 ve 28 günlük serilerin eğilme dayanımı verileri (MPa)

Sıcaklık (°C)	20	200		400		600		800	
Gün	28	7	28	7	28	7	28	7	28
%100 UK - %0 YFC	3.66	2.98	3.13	2.38	3.38	2.57	3.25	2.62	3.04
%75 UK - %25 YFC	2.57	2.24	2.90	2.23	2.40	2.22	2.75	2.52	2.86
%50 UK - %50 YFC	6.92	6.14	6.67	3.96	4.42	2.27	2.78	2.58	2.98
%25 UK - %75 YFC	3.46	3.11	3.62	2.92	3.14	2.43	2.65	1.45	1.53
%0 UK - %100 YFC	6.65	6.01	6.37	4.52	5.45	2.40	2.47	1.86	1.95

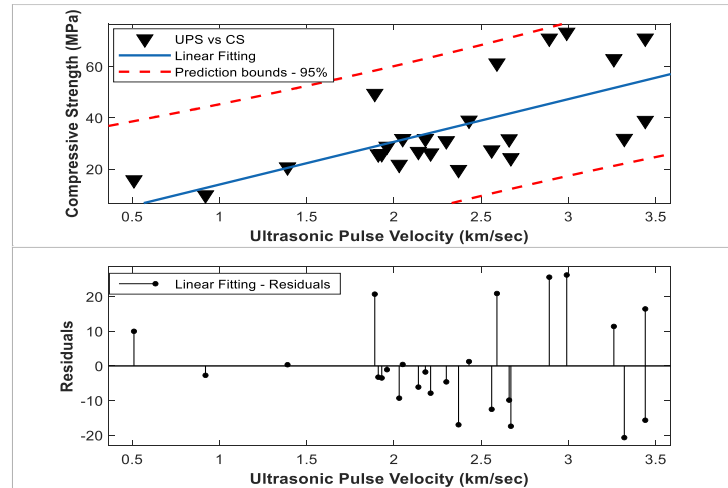
Tablo 5 incelendiğinde basınç dayanımı değerlerinde olduğu gibi eğilme dayanımı değerleri de sıcaklık artışına bağlı olarak azalma göstermiştir. 28 günlük eğilme dayanımı değeri en yüksek (6.92 MPa) olan seri 20°C %50 UK %50 YFC içeren hibrit seri olarak belirlenmiştir. En düşük eğilme değeri ise 800 °C sıcaklığa maruz bırakıla %75 YFC-%25 UK içeren seride gözlemlenirken 7 ve 28 günlük dayanımları sırasıyla 1.45 ve 1.53 MPa olarak hesaplanmıştır. Jel yapısındaki Ca. Si/Al oranı kadar C-A-S-H ve N-A-S-H alkali ile aktive edilen jellerin oluşumunda önemlidir ve Ca'nın mukavemet gelişimine olumlu katkısı bulunmaktadır [24-25].

### Ultras ses Geçiş Hızı Değerleri

Serilere ait ultras ses geçiş hızı değerlerini basınç dayanımı ile ilişkisini vurgulayan grafik Şekil 5'te verilmiştir.

Tablo 6'da regreasyon analizi sonuçlarından anlaşılacağı üzere tüm veriler üzerinde yapılan analizi sonucunda sıcaklığa bağlı olarak serilerin basınç dayanımı değerleri ile ultras ses geçiş hızı değerleri arasında düşük bir lineer ilişki olduğu belirlenmiştir ( $R^2=0.437$ ). Tüm sıcaklık değerleri için elde edilmiş olan regreasyon analizi sonucunda basınç dayanımını tahmin eden denklem Eşitlik 1'de ifade edilmiştir.

$$CS = -2.713 + 16.673 \times UPV \quad (1)$$



Şekil 5. CS ve UPV arasındaki ilişki

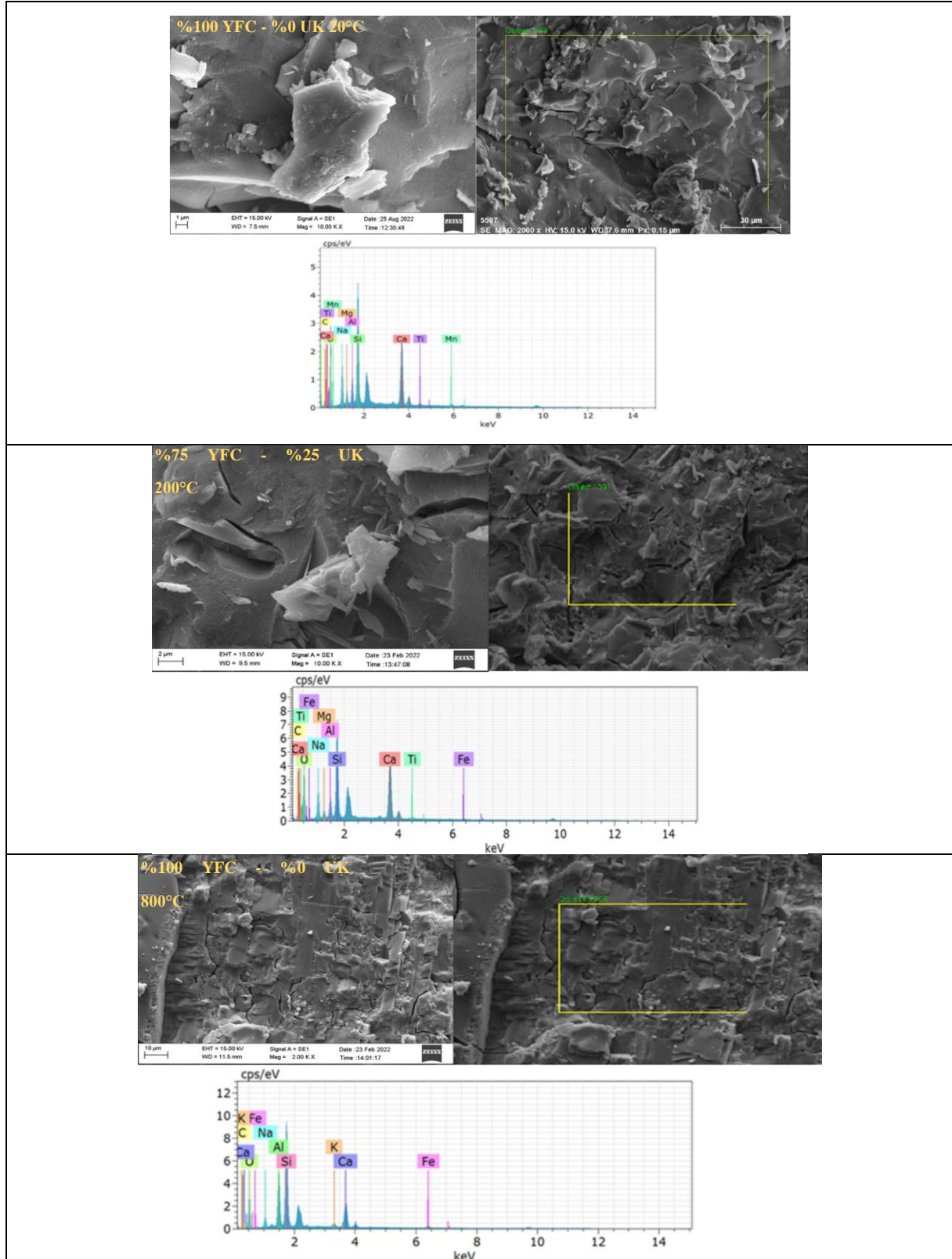
Tablo 6. Regreasyon analizi sonuçları

Regression Statistics								
R	0.661343							
R <sup>2</sup>	0.437375							
Adj. R <sup>2</sup>	0.412913							
Std. Err.	13.9448							
Obs.	25							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Signif. F			
Regression	1	3476.86	3476.86	17.879	0.000319			
Residual	23	4472.5	194.46					
Total	24	7949.4						
	Coeff.	Std. Err.	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	-2.713	9.5698	-0.2835	0.7794	-22.5094	17.08406	-22.5094	17.08406
UPV	16.673	3.9432	4.2285	0.0003	8.516403	24.83047	8.516403	24.83047

### Mikroyapı (SEM ve EDX) Değerlendirmesi

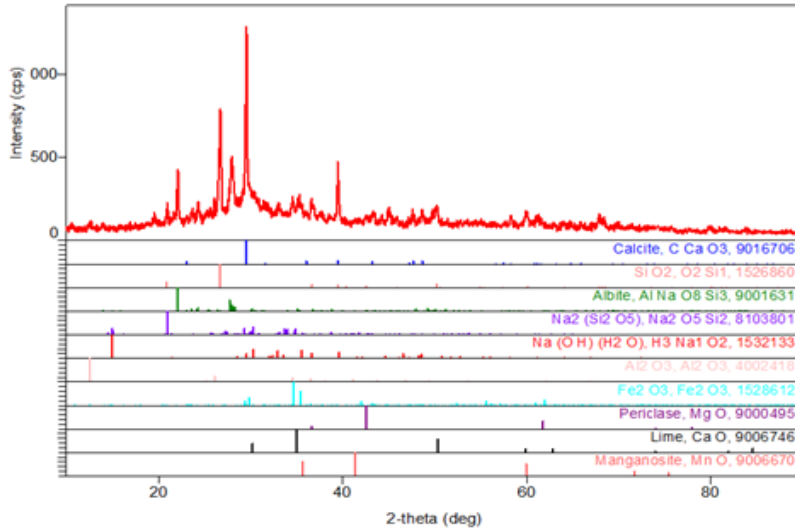
Çalışmada SEM ve EDX analizleri Fırat Üniversitesi Merkez Laboratuvarında yapılmış olup farklı sıcaklıklarda ve farklı serilerde olmak üzere deneyler gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizlerindeki numuneler basınç dayanımı deneyi uygulanan numuneler üzerinden alınmıştır. Mikroyapı analizlerine ait sonuçlar Tablo 7’de sunulmuştur. %100 YFC içeren serilere ait 20°C ve 800°C sıcaklıklar ardından analizler gerçekleştirilirken. %25UK-%75YFC içeren seride ise 200°C sıcaklık ardından analizler gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 7. SEM ve EDX analizleri**



Tablo 7 incelendiğinde 20°C sıcaklıktaki %100 YFC içeren serinin SEM görüntülerinin düzgün yapılı hidrate ürünlerden teşkil olduğu, yer yer tepkimeye girmeyen beyazımsı yapıların yer aldığı ve

EDX analizleri incelendiğinde ise beyazımsı renkte olan küçük parçacıkların kısmen tepkime vermeyen sodyum ve kalsiyum gibi parçalar olabileceği söylenebilir. XRD sonuçlarına göre (Şekil 6.) 20 °C yüksek sıcaklık altında %100 YFC içeren seride şu fazlar gözlemlenmiştir; i) triklinik kristal sisteme sahip olan Albite, ii)  $(\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8))$ , iii) Natrosilite ( $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ), iv) sodyum hidroksit monohidrat ve v) kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ).



Şekil 6. %100 YFC içeren 20 °C sıcaklıktaki numuneye ait XRD sonuçları

EDX analizi sonuçları incelendiğinde sodyum, kalsiyum ve silis elementlerine rastlanmış olması nedeniyle bağlı yapıların sodyum-silikat-hidrat ve kalsiyum-silikat-hidratlardan meydana geldiği şeklinde yorumlanmıştır. 800°C sıcaklıktaki %100 YFC içeren serinin mikro yapı analizleri ise, yüksek sıcaklık etkisiyle bağlı suyun dehidrate oluşu ardından gözenekli bir yapıya rastlanmaktadır. Zhang ve ark. (2022), yaptığı çalışmasında sodyum-alumina-silikat-hidrat (N-A-S-H) jelinin uzun zincirli ağ yapısının, özellikle 300 °C ve üzerinde sıcaklığa maruz numunelerin daha yüksek basınç dayanımına yol açtığını raporlanmaktadır. Yine de sıcaklık arttıkça, N-A-S-H jeli kristal bir faza dönüşerek numune mikro yapısını bozmakta olduğu belirtilmiştir [26]. Benzer bulgular bu çalışmada da elde edilmiştir. Bunun yanında Zhang ve ark. (2022) Ca iyon değişimi nedeniyle kalsiyum-alumina-silikat-hidratın (C-A-S-H) tabakaları arasındaki geniş boşluklar sonucunda, kimyasal olarak bağlı suyun düşük NaOH içerikli numunelerden kaçması için bir kanal sağladığı belirtilmiştir [26]. Bu durum yüksek sıcaklıkta ısıl etkilerden daha az etkilenmesinin nedenlerinden biri olabilir. Bu çalışmada özellikle NASH ve CASH fazları açısından daha zengin olan hibrit karışımlardaki yüksek sıcaklığa daha dirençli olma durumunun belirtilen bu fenomenden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca EDX analizi sonuçları incelendiğinde, silisyumun ve alüminyumun yüksek oranlarda ve kalsiyum ile sodyumun ise daha düşük oranlarda yer aldığı anlaşılmaktadır. Bu durum, yüksek sıcaklığın (800°C) sodyum-silikat-hidrat ve kalsiyum-silikat-hidratlar açısından olumsuz etkiye neden olduğu ve bağ yapılarını etkilediği şeklinde yorumlanmıştır. Bu çalışmada daha önce yorumlanan mekanik (basınç ve eğilme dayanımı) ile fiziksel (ultrases geçiş hızı, aşınma direnci vb.) özelliklerdeki azalmalar bu mikroyapı analizleriyle benzerlik göstermektedir. Tüm seriler içerisinde 200°C ve 800°C sıcaklıkta en yüksek dayanım azalması sergileyen %25UK-%75YFC serisinin mikro yapı analizleri dikkate alındığında, boşluklu ve çatlamış bir

yüzey morfolojisi yanında EDX sonuçları açısından kalsiyum, silisyum, sodyum, karbon ve alüminyumun açısından zengin bir yapı göze çarpmaktadır.

### **Sonuç ve Tartışma**

Bu çalışmada, YFC ile F sınıfı UK'nın farklı miktarlarda hibrit kullanılması yoluyla alkali aktivasyonlu kompozitler üretilerek yüksek sıcaklığa karşı davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Karışımlarda aktivatör/bağlayıcı oranı 0.40 olarak seçilmiş ve 14 mol NaOH konsantrasyona sahip karışımlar hazırlanmıştır. Tüm seriler kalıplandıktan hemen sonra 24 saat süresince 90°C aktivasyon sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde varılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı 20°C'de %50 UK - %50 YFC karışımında, en düşük basınç dayanımı ise 800°C'de %25 UK - %75 YFC karışımından elde edilmiştir. Eğilme dayanımı deney sonuçları basınç dayanımı deney sonuçlarıyla uyum içerisinde olup; yüksek basınç dayanımı olan karışımlar yüksek eğilme dayanımı sergilemiştir. Sıcaklık artışının özellikle yalnızca YFC'nin kullanıldığı %0 UK - %100 YFC karışımlarında dayanım kaybını artırdığı görülmekte olup; bu durum, UK'nın YFC'ye göre yüksek sıcaklıklarda daha stabil olduğuna işaret etmektedir. Mikroyapı analizleri, yüksek sıcaklıklarda çatlak oluşumu ve boşluklu yapıların arttığını göstermiştir. Mekanik özelliklerin yanında yüksek sıcaklıklara direncin de önemli olduğu uygulamalarda UK-YFC hibrit karışımların daha uygun olduğu belirlenmiştir. Ancak kullanılmadan önce bu karışımların donma-çözülme ve kimyasal dirençlerinin de test edilmesi önerilmektedir.

### **Teşekkür**

Bu çalışma kapsamında hammadde desteği sağlayan OYAK Çimento A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

### **Çıkar Çatışması**

Yazarlar bu makale ile ilgili herhangi bir çıkar çatışması bildirmemektedir.

### **Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı**

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan eder.

### **References**

- [1] Guerrieri, M. ve Sanjayan, J. G. (2010). Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures. *Fire and Materials: An International Journal*, 34(4), 163-175.
- [2] Yazıcı, N. ve Karagöl, F. (2022). Uçucu Kül Esaslı ve Cüruf Katkılı Geopolimer Betonların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(3), 1592-1606.
- [3] Nawaz, M., Heitor, A. ve Sivakumar, M. (2020). Geopolymers in construction-recent developments. *Construction and Building Materials*, 260, 120472.
- [4] Ekinci, E. ve Türkmen, İ. (2021). Farklı Aktivatör ve Ham Madde Değişkenlerinin Geopolimer Hamurun Basınç Dayanımına Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 169-175.
- [5] Sharma, A., Basumatary, N., Singh, P., Kapoor, K. ve Singh, S. P. (2022). Potential of geopolymer concrete as substitution for conventional concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1539-1545.

- [6] Guo, X. ve Pan, X. (2018). Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 633-641.
- [7] Zhang, P., Gao, Z., Wang, J., Guo, J., Hu, S. ve Ling, Y. (2020). Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122389.
- [8] Somna, K., Jaturapitakkul, C., Kajitvichyanukul, P. ve Chindaprasirt, P. (2011). NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. *Fuel*, 90(6), 2118-2124.
- [9] Junaid, M. T., Khennane, A., Kayali, O., Sadaoui, A., Picard, D. ve Fafard, M. (2014). Aspects of the deformational behaviour of alkali activated fly ash concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete research*, 60, 24-29.
- [10] Puligilla, S. ve Mondal, P. (2013). Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer. *Cement and concrete Research*, 43, 70-80.
- [11] Ding, Y., Dai, J. G. ve Shi, C. J. (2016). Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 127, 68-79.
- [12] Abd. Razak, S. N. ve Nuruddin, M. F. (2015). The Effects of Alkali Silica Reaction (ASR) towards Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 699, 271-276.
- [13] Ferdous, W., Manalo, A., Khennane, A. ve Kayali, O. (2015). Geopolymer concrete-filled pultruded composite beams–concrete mix design and application. *Cement and concrete composites*, 58, 1-13.
- [14] Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Tahir, M. M. ve Aziah, N. (2013). Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. *Construction and building materials*, 43, 80-86.
- [15] Khater, H. M. (2014). Studying the effect of thermal and acid exposure on alkali-activated slag geopolymer. *Advances in Cement Research*, 26(1), 1-9.
- [16] Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K. H., Kim, K. S. ve Monteiro, P. J. (2014). Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders. *Cement and Concrete Composites*, 53, 97-104.
- [17] Guo, X. ve Yang, J. (2020). Intrinsic properties and micro-crack characteristics of ultra-high toughness fly ash/steel slag based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 230, 116965.
- [18] Waqas, R. M., Butt, F., Zhu, X., Jiang, T. ve Tufail, R. F. (2021). A comprehensive study on the factors affecting the workability and mechanical properties of ambient cured fly ash and slag based geopolymer concrete. *Applied Sciences*, 11(18), 8722.
- [19] Durak, U. ve Şimşek, A. A. (2022). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu temelli geopolimer sistemlerde atık demir tozunun agrega yerine kullanımının araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 812-828.
- [20] Yurt, Ü. (2020). High performance cementless composites from alkali activated GGBFS. *Construction and Building Materials*, 264, 120222.
- [21] Öz, H. Ö. ve Güneş, M. (2023). Tasarlanmış çimento esaslı kompozit ile uçucu kül ve cüruf esaslı tasarlanmış geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 452-471.
- [22] Kurtoglu, A. E., Alzebaree, R., Aljumaili, O., Nis, A., Gulsan, M. E., Humur, G. ve Cevik, A. (2018). Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Advances in concrete construction*, 6(4), 345.

- [23] Senff, L., Barbetta, P. A., Repette, W. L., Hotza, D., Paiva, H., Ferreira, V.M. ve Labrincha, J. A. (2009). Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments. *Construction and Building Materials*, 23, 3107-3111.
- [24] Bayer Ozturk, Z., Cırık, R. ve Atabey, İ. İ. (2023). Sustainable environment approach by the usage of ceramic pottery waste in geopolymer mortar. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 7577–7588.
- [25] Bayer Ozturk, Z. ve Çam, T. (2023). Performance of eco-friendly fly ash-based geopolymer mortars with stone-cutting waste. *Materials Chemistry and Physics*, 307, 128112.
- [26] Zhang, D. W., Sun, X. M., Zhao, K. F., Xu, Z. Y., ve Li, H. (2022). An application of alkali-activated fly-ash materials with low-compressive strength: Thermal stability at elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 61, 105256.