



Yüksek ve Düşük Kalsiyum İçeren Uçucu Külle üretilen Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Mehmet KAYA^{1*}

¹Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye
Mehmet KAYA ORCID No: 0000-0002-8116-0123

*Sorumlu yazar: mehmet.kaya@yobu.edu.tr

(Alınış: 18.08.2020, Kabul: 07.12.2020, Online Yayınlanma: 30.12.2020)

Anahtar Kelimeler

F sınıfı uçucu kül,
Geopolimer,
Eğilme dayanımı,
Basınç dayanımı,
Aktivatör,
Fiziksel özellikler

Öz: Bu çalışmada, C sınıfı ve F sınıfı uçucu külün birlikte kullanılarak geri dönüşümlerinin sağlanması ve ekonomiye kazandırılması amacıyla üretilen geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. C sınıfı uçucu kül (UK) ile F sınıfı UK'nın %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında birbirleri ile yer değiştirilmesi ile oluşturulan bağlayıcı, sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) ile ayrı ayrı aktive edilmiştir. Aktivatör/bağlayıcı oranı %10 olarak kullanılmıştır. Likit/bağlayıcı oranı 0,35, agrega/bağlayıcı oranı 3 olarak belirlenmiştir. UK, kum, aktivatör ve suyun standart çimento mikserinde karıştırılması ile hazırlanan harç numuneler, 40mm×40mm×160 mm boyutlu standart kalıplara yerleştirildikten sonra 100 °C' de 24 saat süre ile aktivasyon sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Daha sonra numuneler 28 gün boyunca hava kürüne (22±2°C) tabi tutulmuşlardır. Hava kürünü takiben fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak %60 C sınıfı ve %40 F sınıfı UK içeren ve NaOH ile üretilen numunelerde 3,8 MPa eğilme dayanımı, 28 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

96

Investigation of Physical and Mechanical Properties of Geopolymer Mortars Produced with High and Low Calcium Content Fly Ash

Keywords

F class fly ash,
Geopolymer,
Flexural strength,
Compressive strength,
Activator,
Physical properties,

Abstract: In this study, the physical and mechanical properties of geopolymer mortars produced in order to provide recycling and gain to the economy by using C class and F class fly ash (FA) together were examined. Binder, sodium hydroxide (NaOH) and potassium hydroxide (KOH), which is formed by replacing C class FA and F class FA at 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% with individually activated. Activator/binder was used as 10%. The liquid/binder ratio was determined as 0.35, and the aggregate/binder ratio was determined as 3. Mortar samples prepared by mixing FA, sand, activator and water in a standard cement mixer were placed in standard molds of 40mm×40mm×160mm and then exposed to the activation temperature at 100 °C for 24 hours. The samples were then air cured (22 ± 2 °C) for 28 days. Physical and mechanical tests were carried out following air curing. As a result, 3.8 MPa flexural strength and 28 MPa compressive strength were obtained in samples containing 60% C class and 40% F class FA and produced with NaOH.

1. GİRİŞ

Çimento üretimi sırasında, fazla miktarda enerji tüketimi ve yüksek miktarda CO₂ gazı salınımı nedeniyle, çimentoya alternatif bağlayıcı yapı malzemesi üretimine yönelik çalışmalar son yıllarda önem kazanmıştır. Bazı kaynaklarda çimento üretimindeki enerji maliyetinin %20-%40 olduğu [1-3], bazılarında ise enerji maliyetinin %59,1'e ulaştığı belirtilmektedir [4]. 1 ton çimento üretimi sonucu yaklaşık 1 ton CO₂ açığa çıkmaktadır. Küresel CO₂ salınımının tahmini %5-7' si çimento

tesislerinden kaynaklanmaktadır [5]. Dünyada çimento tüketimi 2019 yılı itibariyle tahmini 102 milyon tona ulaşmıştır [6]. Buna bağlı olarak fosil yakıt kaynaklı CO₂ salınımının ise yaklaşık 1.5 Gigaton olduğu bilinmektedir [7]. Diğer taraftan, dünya genelinde enerji ihtiyacının karşılanması için fosil yakıtların kullanımı oldukça yaygındır. Elektrik ihtiyacının bir kısmı da termik santrallerde kömürün yakılması ile sağlanmaktadır. Kömürün yanması sonucu hem yakma ünitesi tabanında hem de termik santral bacasında kül oluşmaktadır [8]. Yanmış kömür atığı olan taban külü ve bacadan çıkan UK, çevreyi kirletici etkisinin yanı sıra, depolanma gibi

atık yönetimi sorunlarına neden olmaktadır. Kömürün yakılması sonucu oluşan uçucu külün dünyada 2015 yılı itibariyle 750 milyon tona ulaştığı belirtilmektedir [9]. ASTM C618-19 'a göre, bitümlü kömürden elde edilen ve içeriğindeki $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %70 ve fazlası olan UK, F sınıfı olarak tanımlanmaktadır. Yarı bitümlü kömürden elde edilen ve içeriğindeki $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan UK ise C sınıfı olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca C sınıfı UK sınıflandırmasında CaO oranını %10 üzerinde olduğu belirtilmektedir [10]. Son yıllarda UK, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi endüstriyel atıkların geri dönüşümünün sağlanması önem kazanmıştır [11-13]. UK, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi endüstriyel atıklar ile kaolin, kil, kireç ve kırmızı çamur gibi doğal malzemelerin çeşitli alkaliler ile aktivasyonu sağlanarak bağlayıcı üretilebilmektedir [14-18]. Bu şekilde üretilen bağlayıcılar ile üretilen betonlara geopolimer beton ismi verilmektedir [19]. Aktivasyon işleminde sodyum hidroksit (NaOH) [20], potasyum hidroksit (KOH) [21], sodyum silikat (Na_2SiO_3) [22], potasyum silikat (K_2SiO_3) [23] gibi alkali aktivatörler kullanılmaktadır. Bu aktivatörler tek başına kullanılabildiği gibi, $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ve $\text{KOH}+\text{K}_2\text{SiO}_3$ karışımı biçiminde kullanılabilmektedir [24-25]. Geleneksel portland çimentoda görülen C-S-H jeli, alkali aktivasyonu ile üretilen geopolimerlerde N-A-S-H veya C-A-S-H jeli olarak gözlenmektedir [26-27]. Geopolimerin dayanım mekanizmasında bu jelin etkisi büyüktür. Bununla birlikte karışımda kullanılan cüruf ve UK gibi bağlayıcıların yapısındaki Si/Al oranlarının da bağ yapısı üzerinde etkileri bulunmaktadır [28-29]. UK içeren geopolimerin dayanım kazanması için sıcaklık kürüne ihtiyaç duyulmaktadır [20,24]. Yüksek fırın cürufu ve metakaolin esaslı geopolimerlerde 60 °C-80 °C sıcaklık dayanım için yeterli olurken [30-31], UK esaslı geopolimerlerde 80°C-110°C aralığında sıcaklık gerekmektedir [20,24]. Dayanım mekanizmasında kür sıcaklığı, kür süresi, kömürün yanmasına bağlı olarak bağlayıcı kalitesi, bağlayıcı içeriği, agrega cinsi, su miktarı, aktivatör oranı, aktivatör cinsi, kür şartları gibi unsurlar önemlidir [20,32-34]. Geopolimer betonlar geleneksel betonlara kıyasla, erken ve yüksek dayanım, yüksek sıcaklık, donma-çözülme, ıslanma-kurumaya ve aşınma karşı daha dirençli olup, daha düşük kuruma büzülmesi gösterirler [20,24,35-36]. Buna karşılık bazı çalışmalarda asit ve sülfatlara karşı dirençleri geleneksel betonlardan daha düşük olduğunu belirtilmektedir [37]. Bazı çalışmalarda ise asit ve ağır metallerle karşı dirençli olduğu belirtilmektedir [38-39]. Literatürde F sınıfı UK ile geopolimer üretme çalışmaları yoğun biçimde gözlenirken, C sınıfı uçucu kül, aktivasyon zorluğu, erken priz ve düşük dayanım gibi sorunları nedeniyle, geopolimer üretim çalışmalarında çok yaygın kullanılmamaktadır [40]. Bu çalışmada, C sınıfı uçucu külün erken priz, düşük dayanım, sülfatlara karşı direnç gibi özelliklerinin iyileştirilmesi ve geopolimer üretiminde yaygın olarak kullanılmasının sağlanması amacıyla, F sınıfı UK ile karıştırılarak geopolimer harç üretimi yapılmıştır. Üretilen harçlar üzerinde, yayılma tablası deneyi, birim ağırlık, su emme oranı, boşluk oranı, ultrases geçiş hızı gibi fiziksel deneylerin yanı sıra

eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yüksek dayanım sağlayan uçucu kül oranları tespit edilmiştir.

2.MATERYAL ve YÖNTEM

2.1.Materyal

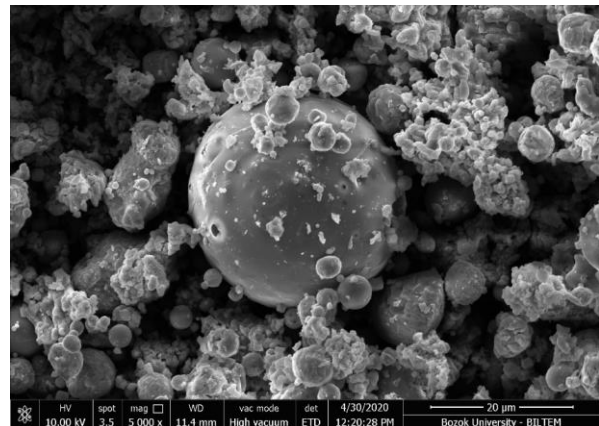
2.1.1.Uçucu kül (UK)

Çalışmada kullanılan C sınıfı UK, Soma Termik Santrali'nden, F sınıfı UK ise Tunçbilek Termik santralinden tedarik edilmiştir. Uçucu Küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1' de gösterilmiştir. C sınıfı uçucu külde $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının %54,63, F sınıfı uçucu külde ise $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3$ oranının ise %90,6 olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

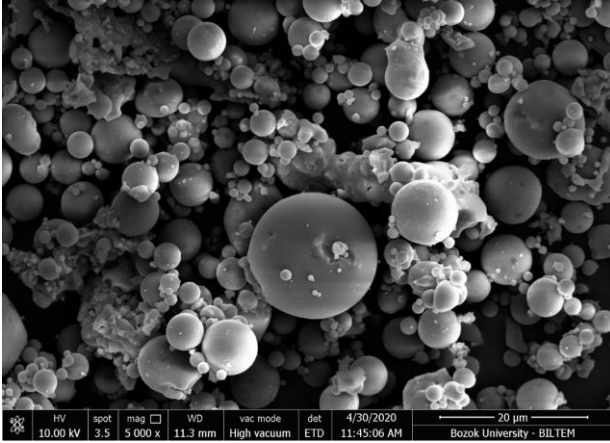
UK	C	F
Kimyasal Özellikler	(%)	(%)
MgO	3,12	3,68
Al_2O_3	14,2	21,41
SiO_2	35,01	58,73
SO_3	7,56	0,25
Na_2O	1,21	0,28
K_2O	1,06	1,65
CaO	25,75	1,88
Fe_2O_3	5,42	10,46
Çözünmez kalıntı	24,21	24,33
Kızdırma kaybı	6,02	0,64
Toplam	99,35	98,98
$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	2,46	2,74
Fiziksel Özellikler		
Özgül ağırlık , (ton m^{-3})	2,72	2,24
45 mikron elek üstünde kalan, (%)	44,3	4,9
Blaine özgül yüzey , $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$	3320	3703

C sınıfı uçucu külün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) Şekil 1' de gösterilmiştir. C sınıfı uçucu külde 1-20 mm arasında değişen kürecik taneler gözlenmektedir. Bu taneciklerin yüzeyi pürüzlü olup, çoğunluğu düzensiz şekildedir.



Şekil 1. C sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü (x5000)

F sınıfı uçucu külün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (SEM) Şekil 2' de gösterilmiştir. F sınıfı UK tanelerinin belirgin şekilde küresel ve camsı yapıda olduğu gözlenmektedir.



Şekil 2. F sınıfı uçucu külün SEM görüntüsü (x5000)

2.1.2. Sodyum hidroksit (NaOH)

Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH), Ankara' da faaliyet gösteren Emir Kimya Firması'ndan temin edilmiş olup, kimyasal özellikleri Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. NaOH'un özellikleri

Sodyum Hidroksit (NaOH)	
Molekül ağırlığı	40 g.mol ⁻¹
Asidimetrik	≥97
Na ₂ CO ₃	≤1
Cl	<0,01
SO ₄	≤0,01
Ağır metal	≤0,002
Al	≤0,002
Fe	≤0,002

2.1.3. Potasyum hidroksit (KOH)

Çalışmada kullanılan sodyum hidroksit (KOH), Ankara' da faaliyet gösteren Emir Kimya Firması'ndan temin edilmiş olup kimyasal özellikleri Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. KOH'un özellikleri

Potasyum Hidroksit (KOH)	
Molekül ağırlığı	56,11 g.mol ⁻¹
Yoğunluk	2,04 g.cm ⁻³
Erime Noktası	406 °C
Kaynama Noktası	1320 °C

2.1.4. Agrega ve su

Çalışmada, en büyük tane çapı 4 mm olan kalker kökenli agrega kullanılmış olup, özgül ağırlığı 2,64 ton.m⁻³, su emme oranı ise % 0,95 tir. Deneysel çalışmalarda musluk suyu kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

Çalışmada C sınıfı UK ile F sınıfı UK, %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında yer değiştirmek suretiyle karıştırılıp bağlayıcı olarak kullanılmıştır. UK

karışımlarından bir grup, bağlayıcı ağırlığına oranla %10 sodyum (Na) içeren NaOH ile aktive edilerek geopolimer harç numuneler hazırlanmıştır. Diğer grup UK karışımları ise bağlayıcı ağırlığına oranla %10 potasyum (K) içeren KOH ile aktive edilerek, geopolimer harç numuneler hazırlanmıştır. C sınıfı uçucu külde bulunan fazla miktardaki CaO içeriğinin bağlayıcılık üzerine etkisi dikkate alınarak aktivatör oranı düşük tutulmuştur. Toplamda 22 seri harç numunesi üretilmiştir. Harç numunelerin tamamında agrega/bağlayıcı oranı 3, likit/bağlayıcı oranı 0,35 olarak kullanılmıştır. Karışımlar standart çimento mikserinde hazırlanmış olup, ilk önce UK ve kum 1 dakika kuru olarak karıştırılmıştır. Daha sonra suda çözülmüş ve oda sıcaklığına kadar soğutulmuş aktivatör karışımı mikserine ilave edilerek 2 dakika daha karıştırma işlemi yapılmıştır. Harç karışımları kalıba yerleştirilmeden önce TS EN 12350-5:2019 standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi yapılmıştır [41]. Daha sonra harç karışımları 40 mm×40 mm×160 mm boyutlarındaki standart kalıplara yerleştirilerek etüve konulmuştur. Kalıplar etüve 100 °C sıcaklıkta 24 saat süre sıcaklık kürüne maruz bırakılmıştır. Etüvden çıkarılan numuneler kalıplardan sökülerek oda sıcaklığında 28 güne kadar bekletilmiştir. 28 gün sonunda numuneler üzerinde birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Numuneler üzerinde TS EN 1015-11 standardına göre eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır [42]. Basınç deneyinden sonra tamamı C sınıfı ve F sınıfı UK içeren numuneler ile en yüksek dayanıma sahip numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelenmiştir. Numune kodlamalarında C sınıfı kül içeriği C ile F sınıfı UK içeriği ise F ile belirtilmiştir. Örnek olarak, C100-F0 kodlu numune ağırlıkça %100 C sınıfı UK içeren numuneyi temsil ederken, C40-F60 ise ağırlıkça %40 C sınıfı UK ile %60 F sınıfı UK içeren numuneyi temsil etmektedir. Bazı çalışmalarda uçucu külün işlenebilirlik ve dayanım açısından optimum su/bağlayıcı oranının 0,28-0,40 arasında olduğu belirtilmektedir [20,32-35]. Bu çalışmada likit/UK oranı 0,35 olarak alınmıştır. Tablo 4' te numunelerin karışım oranları verilmiştir.

Tablo 4. Numunelerin karışım oranları

Numune Kodu	UK (C) g	UK (F) g	Kum (g)	Aktivatör /UK (%)	Likit/UK (%)
C100-F0	450	0	1350	10	0,35
C90-F10	405	45	1350	10	0,35
C80-F20	360	90	1350	10	0,35
C70-F30	315	135	1350	10	0,35
C60-F40	270	180	1350	10	0,35
C50-F50	225	225	1350	10	0,35
C40-F60	180	270	1350	10	0,35
C30-F70	135	315	1350	10	0,35
C20-F80	90	360	1350	10	0,35
C10-F90	45	405	1350	10	0,35
C0-F100	0	450	1350	10	0,35

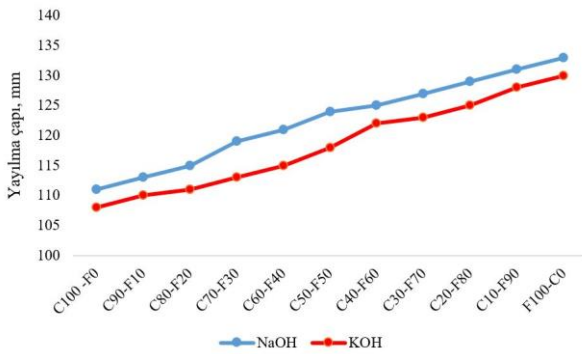
Numuneler içerisindeki UK karışımlarının $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranları, basınç dayanımları ile karşılaştırılmak amacıyla Tablo 5' te verilmiştir.

Tablo 5. Numunelerin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranları

Numune Kodu	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$
C100-F0	2,46	1,81
C90-F10	2,48	1,64
C80-F20	2,52	1,47
C70-F30	2,54	1,29
C60-F40	2,57	1,12
C50-F50	2,6	0,95
C40-F60	2,63	0,78
C30-F70	2,66	0,61
C20-F80	2,68	0,43
C10-F90	2,71	0,26
F100-C0	2,74	0,09

3. DENEY SONUÇLARI

3.1. Yayılma Tablası Deney Sonuçları

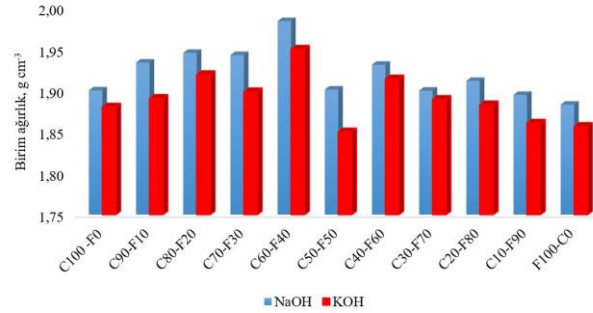


Şekil 3. Numunelerin yayılma tablası değerleri

Numunelerin yayılma tablası değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Numunelerin yayılma tablası deney sonuçları incelendiğinde, karışım içerisinde F sınıfı UK miktarının artışı işle birlikte yayılma değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. NaOH ile üretilen numunelerin yayılma tablasındaki yayılma çapları 111 mm ile 133 mm arasında değişiklik gösterirken KOH ile üretilen numunelerin yayılma tablasındaki yayılma çapı değerleri ise 108 mm ile 130 mm arasında değişiklik göstermektedir. NaOH ile üretilen numuneler, KOH ile üretilen numunelere kıyasla tabla üzerinde daha fazla yayılma göstermişlerdir. Literatürde, F sınıfı UK kullanılarak NaOH ile üretilen, bağlayıcı/su oranı 0,30 olan ve %9 Na içeren numunelerde ve yayılma tablası değerinin 100 mm ve 102 mm arasında değiştiği belirtilmektedir [35]. F sınıfı ve C sınıfı UK ayrı ayrı kullanılarak NaOH+ Na_2SiO_3 karışımı ile geopolimer harç üretilen başka bir çalışmada ise, F sınıfı UK ile üretilen numunelerde yayılma değerinin 122 mm olduğu, C sınıfı UK kül ile üretilen numunelerde ise yayılma değerinin 109 mm olduğu belirtilmektedir [27]. Numunelerde yayılma değerleri arasında farkın az olması, sabit aktivatör ve su miktarından kaynaklanmaktadır. C sınıfı uçucu külün bağlayıcılık özelliğinin bulunması yayılma değerlerini azaltıcı bir unsur olarak gözlenmektedir [43]. NaOH'un, KOH'a kıyasla daha fazla aktivasyon özelliği göstermesinden

dolayı, NaOH ile üretilen numunelerde, KOH ile üretilen numunelere kıyasla daha fazla yayılma değeri gözlenmiştir. Bu durum NaOH ile üretilen numunelerde işlenebilirliğin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır [44].

3.2. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

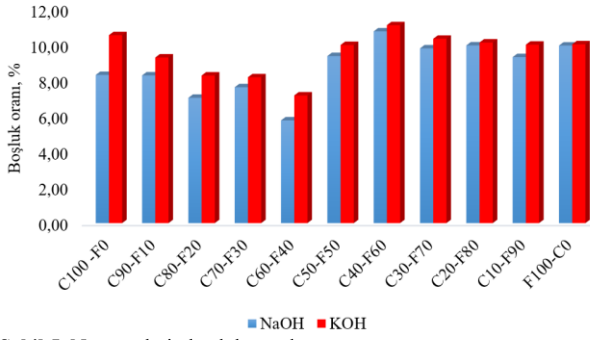


Şekil 4. Numunelerin birim ağırlıkları

Numunelerin birim ağırlıkları Şekil 4' te verilmiştir. NaOH ile imal edilen numunelerin birim ağırlıkları 1,88 gr cm^{-3} ile 1,98 gr cm^{-3} arasında değişirken, KOH ile üretilen numunelerin birim ağırlıkları 1,85 gr cm^{-3} ile 1,95 gr cm^{-3} arasında değişmektedir. En büyük birim ağırlık %60 C sınıfı UK, %40 F sınıfı UK içeren numunelerden NaOH ile üretilenlerde 1,98 gr cm^{-3} , KOH ile üretilen numunelerde ise 1,95 gr cm^{-3} olarak belirlenmiştir. NaOH ile üretilen numunelerin birim ağırlıkları KOH ile üretilen numunelerin birim ağırlıklarından daha yüksektir. İki farklı F sınıfı uçucu külün NaOH ile aktive edilmesi ile geopolimer harçların üretildiği bir çalışmada, %9 Na içeriğine sahip, 24 saat 100 °C' sıcaklık küründe tutulan numunelerde, birim ağırlığın 2,04 ve 2,13 gr cm^{-3} olduğu belirlenmiştir [35]. Başka bir çalışmada ise C sınıfı UK ile üretilen geopolimer harçlarda birim ağırlığın 1,77-1,97 gr cm^{-3} , F sınıfı UK ile üretilen geopolimer harçlarda ise birim ağırlığın 1,57-2,05 gr cm^{-3} arasında değiştiği belirtilmiştir [37]. NaOH, KOH'a kıyasla daha etkin aktivasyon özelliği göstermekte ve daha kuvvetli bağ yapısı oluşturmaktadır [44]. Bu sebeple NaOH ile üretilen numunelerin birim ağırlıkları KOH ile üretilen numunelerin birim ağırlıklarından daha büyüktür. Bunun yanı sıra birim NaOH ve KOH ile üretilen numuneler arasındaki birim ağırlık farkı fazla belirgin değildir.

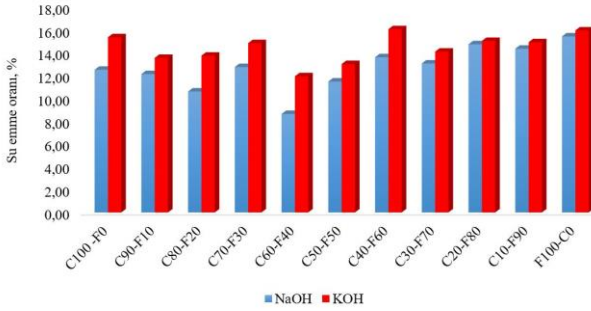
3.3. Boşluk Oranı ve Su Emme Oranı Deney Sonuçları

Numunelerin boşluk oranları Şekil 5'te verilmiştir. NaOH ile üretilen numunelerde boşluk oranı %5,76-%10,75 arasında değişirken, KOH ile üretilen numunelerde ise %7,16-%11,10 arasında değişmektedir. En düşük boşluk oranı, %60 C sınıfı %40 F sınıfı UK içeren ve NaOH ile üretilen numunelerde %5,76, KOH ile üretilen numunelerde ise numunelerde %7,16 gözlenmiştir.



Şekil 5. Numunelerin boşluk oranları

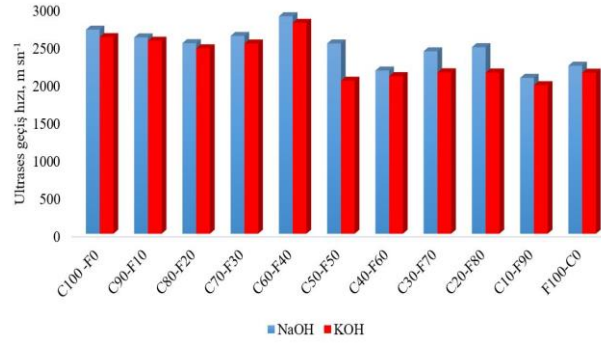
En büyük boşluk oranı ise %40 C sınıfı %60 F sınıfı UK içeren C40-F60 numunelerinde tespit edilmiştir. NaOH ile üretilen C60-F40 numunesinde boşluk oranı %10,75, KOH ile üretilen C60-F40 numunesinde ise %11,10 olarak belirlenmiştir. NaOH ile üretilen numunelerin boşluk oranları KOH ile üretilen numunelerin boşluk oranlarından daha azdır. Numunelerin boşluk oranları arasındaki bu fark fazla belirgin değildir. Karışımlardaki sodyum/bağlayıcı ile potasyum/bağlayıcı oranlarının %10 olarak aynı kullanılması, NaOH ve KOH ile aktive edilmiş numunelerde boşluk oranlarının belirgin farklılık göstermemesine sebep olmuştur. Literatürde tamamı F sınıfı UK ile üretilmiş geopolimer numunelerde boşluk oranını %9-10 civarında olduğu belirtilmektedir [37].



Şekil 6. Numunelerin su emme oranları

Numunelerin su emme oranları Şekil 6'da verilmiştir. Su emme oranları, NaOH ile üretilen numunelerde %8,63-%15,44 arasında gözlenirken KOH ile üretilen numunelerde ise %11,94-%16,07 arasında değişiklik göstermektedir. En düşük su emme oranı %60 C sınıfı %40 F sınıfı UK içeren ve NaOH ile üretilen numunelerde % 8,63, KOH ile üretilen numunelerde ise numunelerde %11,94 olarak gözlenmiştir. NaOH ile üretilen C0-F100 numunesinde su emme oranı %15,44, KOH ile üretilen C60-F40 numunesinde ise %16,07 olarak belirlenmiştir. KOH ile üretilen numunelerin su emme oranları NaOH ile üretilen numunelerin su emme oranlarından belirgin olmamakla birlikte bir miktar daha fazladır. KOH aktivasyonunun NaOH aktivasyonuna kıyasla daha az olması, numunelerde bağlayıcılık özelliğini de etkilemektedir [44]. Bu sebeple boşluk miktarının artışı ile birlikte su emme özelliğinin de artış gösterdiği bilinmektedir [35,37].

3.4. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

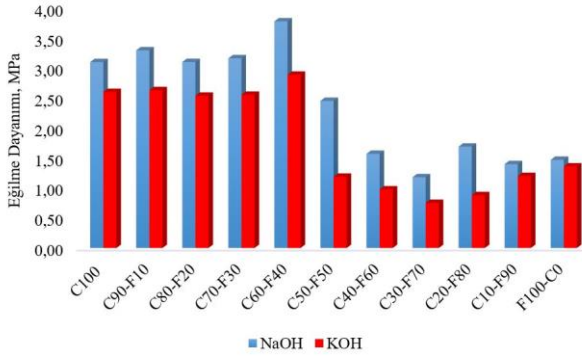


Şekil 7. Numunelerin ultrases geçiş hızları

Numunelerin ultrases geçiş hızları Şekil 7' de verilmiştir. Ultrases geçiş hızları NaOH ile üretilen numunelerde 2065-2882 m sn⁻¹ arasında, KOH ile üretilen numunelerde ise 1967-2794 m sn⁻¹ arasında değişiklik göstermektedir. En yüksek ultrases geçiş hızı değeri, %60 C sınıfı UK, %40 F sınıfı UK içeren ve NaOH ile aktive edilmiş numunelerde 2882 m sn⁻¹, KOH ile aktive edilen numunelerde ise 2794 m sn⁻¹ olarak tespit edilmiştir. En düşük ultrases geçiş hızı değeri ise %10 C sınıfı UK, %90 F sınıfı UK içeren ve NaOH ile aktive edilmiş numunelerde 2065 m sn⁻¹, KOH ile aktive edilen numunelerde ise 1967 m sn⁻¹ olarak tespit edilmiştir. NaOH ile üretilen numunelerin ultrases geçiş hızları KOH ile üretilen numunelerin ultrases geçiş hızlarından daha yüksektir. Boşluk oranının artışı ile birlikte ultrases geçiş hızlarında da azalma görülmektedir [44]. F sınıfı UK kullanılarak geopolimer üretilen bir çalışmada 100 °C' de 24 saat kür edilerek üretilen numunelerin 28 gün sonraki ultrases geçiş hızları 2514 m sn⁻¹, C sınıfı UK kullanılarak üretilen numunelerin ultrases geçiş hızı ise 1600 m sn⁻¹ olarak tespit edilmiştir [32]. Ağırılıkça %9 Na içeren aktivatör ile farklı iki kaynaktan saptanan F sınıfı UK ile üretilen geopolimer numunelerde 3825 m sn⁻¹ ve 3175 m sn⁻¹ ultrases geçiş hızı tespit edilmiştir [35]. Boşluk oranının artmasına bağlı olarak ultrases geçiş hızları azalma göstermektedir.

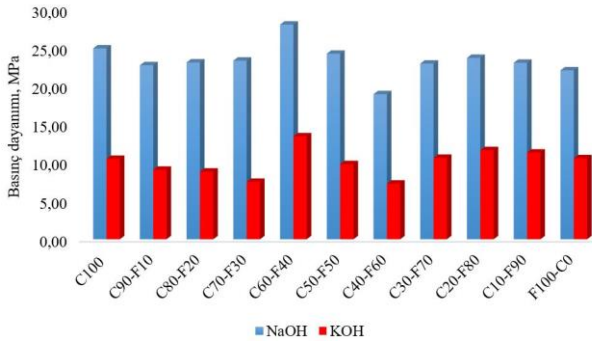
3.5. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Şekil 8' de numunelerin eğilme dayanımları verilmiştir. 28 günlük eğilme dayanımları, NaOH ile aktive edilmiş numunelerde 1,2 MPa-3,8 MPa arasında, KOH ile aktive edilmiş numunelerde ise 0,8 MPa-2,9 MPa arasında değişiklik göstermektedir. En yüksek eğilme dayanımı, NaOH ve KOH ile aktive edilmiş C60-F40 numunelerinde gözlenmiş olup, sırasıyla 3,8 MPa ve 2,9 MPa olarak tespit edilmiştir. En düşük eğilme dayanımları ise C30-F70 numunelerinde NaOH ile aktive edilmiş olanlarda 1,2 MPa, KOH ile aktive edilmiş olanlarda ise 0,8 MPa olarak tespit edilmiştir. Karışım içerisindeki F sınıfı UK miktarının %50 ve üzerine çıkması ile birlikte eğilme dayanımlarında belirgin azalmalar gözlenmiştir. Düşük aktivatör oranlarında C sınıfı uçucu külün yapısında bulunan fazla CaO miktarı bağ yapısı ve dayanım üzerinde etkili olmaktadır [43]. CaO'nun bağlayıcı özelliği nedeniyle fazla miktarda C sınıfı UK içeren numunelerde eğilme dayanımı daha yüksek değerlere ulaşmıştır.



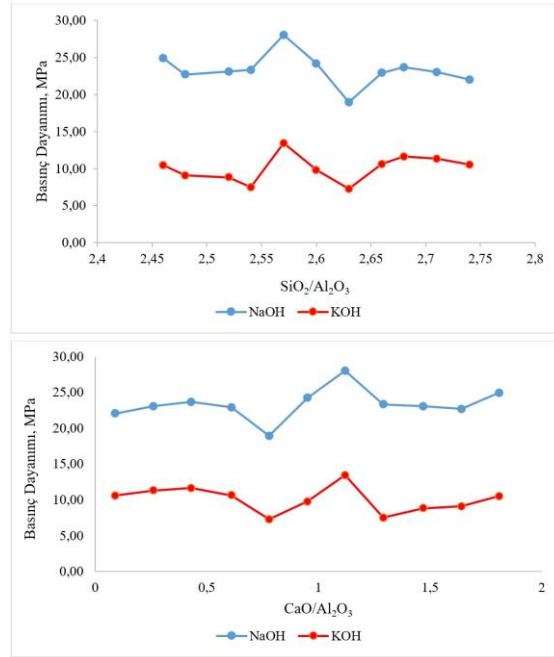
Şekil 8. Numunelerin eğilme dayanımları

3.6. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları



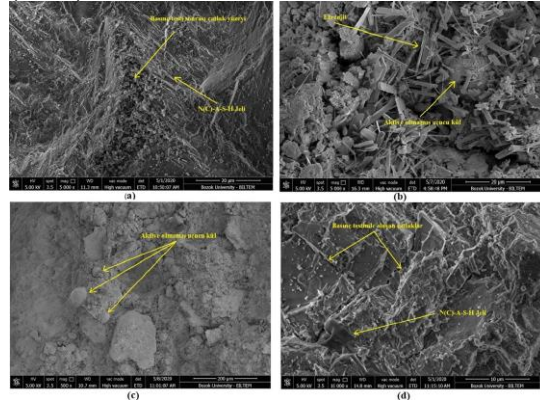
Şekil 9. Numunelerin basınç dayanımları

Numunelerin basınç dayanımları Şekil 9' da verilmiştir. 28 günlük basınç dayanımları, NaOH ile aktive edilmiş numunelerde 18,9 MPa-28 MPa arasında, KOH ile aktive edilmiş numunelerde ise 7,3 MPa-13,4 MPa arasında değişiklik göstermektedir. En yüksek basınç dayanımı, NaOH ve KOH ile aktive edilmiş C60-F40 numunelerinde sırasıyla 28 MPa ve 13,4 MPa olarak tespit edilmiştir. En düşük basınç dayanımları ise C40-F60 numunelerinde NaOH ile aktive edilmiş olanlarda 18,9 MPa, KOH ile aktive edilmiş olanlarda ise 7,3 MPa olarak tespit edilmiştir. NaOH ile üretilmiş numunelerin basınç dayanımları KOH ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarından daha yüksektir. Geopolimer harçlarda, kullanılan alkali aktivatör miktarı ve tipinin dayanım üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. NaOH ile üretilen geopolimerlerde, özellikle yüksek dayanım için 12 M ve üzeri karışımlarda belirgin dayanım artışı gözlenmektedir [45]. NaOH ile KOH aktivatörler karşılaştırıldığında KOH'un iyonik çapının küçük olması ve aktivasyon özelliğinin daha düşük olması sebebiyle, NaOH a göre daha düşük dayanım kazandırma özelliğine sahip olduğu bilinmektedir. [28, 46-47].

Şekil 10. Numunelerin basınç dayanımlarının SiO₂/Al₂O₃ ve CaO/Al₂O₃ oranlarına göre değişimi

Numunelerin basınç dayanımlarının SiO₂/Al₂O₃ ve CaO/Al₂O₃ oranlarına göre değişimi Şekil 10' da verilmiştir. NaOH ve KOH ile üretilen numunelerde en yüksek dayanıma sahip C60-F40 numunelerinin SiO₂/Al₂O₃ oranı 2,57 olarak belirlenmiştir. En düşük dayanıma sahip C40-F60 numunelerinin ise SiO₂/Al₂O₃ oranı 2,63 olarak belirlenmiştir. Literatürde Si/Al atomik oranının dayanım üzerinde etkili olduğu, özellikle SiO₂/Na₂O oranının Si/Al atomik oranını artırdığı belirtilmektedir. Si/Al oranının 1,5 civarında olması dayanımı belirgin şekilde artırmaktadır [28,48-49]. NaOH ve KOH ile üretilen numunelerde en yüksek dayanıma sahip C60-F40 numunelerinin CaO/Al₂O₃ oranı 1,12 olarak belirlenmiştir. En düşük dayanıma sahip C40-F60 numunelerinin ise CaO/Al₂O₃ oranı 0,78 olarak belirlenmiştir. CaO içeriğinin ortam sıcaklığında kür edilen geopolimerlerde dayanımı artırdığı, yüksek sıcaklıklarda kür edilenlerde ise dayanımı olumsuz etkilediği bilinmektedir [50]. Diğer taraftan CaO içeriğinin N(C)-A-S-H jeli oluşumunda da önemli etkisi bulunmaktadır [48].

3.7. Numunelerin Taramalı Elektrom Mikroskobu (SEM) Görüntülerinin İncelenmesi



Şekil 11. Numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11(a) da, NaOH ile aktive edilen %100 C sınıfı UK içeren numunenin basınç deneyi sonrasında SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntünün incelenmesi sonucu, numune yüzeyinde N(C)-A-S-H jeli gözlenmiştir. Şekil 11 (b)' de görüldüğü üzere, %100 F sınıfı UK ile üretilmiş numunede ise etrenjit oluşumu gözlenmiştir. %100 C sınıfı uçucu külün KOH ile aktive edilmesi sonucu üretilmiş numunede ise zayıf aktivasyon yüzeyi görülmektedir. Numune görüntülerinde aktive olmamış UK taneleri görülmektedir. KOH ile aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımlarının NaOH ile aktive edilmiş numunelerin basınç dayanımlarının daha düşük olması, zayıf aktivasyondan kaynaklanmaktadır. Şekil 11(c) incelendiğinde, KOH ile üretilmiş numune yüzeyinde belirgin N(C)-A-S-H jeli gözlenmemiştir. Buna karşılık Şekil 11(d)' de görüldüğü gibi %60 C sınıfı ve %40 F sınıfı UK içeren ve NaOH kullanılarak üretilmiş C60-F40 numunesinde yüzeyinde belirgin N(C)-A-S-H jeli gözlenmektedir. C60-F40 numunesi, diğer deney numuneleri arasında en yüksek basınç dayanımına sahip numunedir. Dayanım üzerinde N(C)-A-S-H jeli oluşumunun büyük etkisi bulunmaktadır [26-27,48]. Literatürde, NaOH ve KOH ile üretilen geopolimer numunelerin içyapıları karşılaştırıldığında, NaOH ile üretilen numune yüzeylerinin daha yoğun ve daha homojen bir yapıya sahip olduğu belirtilmektedir [46].

4.SONUÇ

Bu çalışmada, geopolimer üretiminde C sınıfı UK'nın yaygın olarak kullanılmasını sağlamak amacıyla, farklı oranlarda C sınıfı ve F sınıfı UK birlikte kullanılarak geopolimer harç numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenerek, özellikle $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarının dayanım üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- NaOH ile üretilen numunelerin yayılma tablasındaki yayılma çapı değerlerinin, KOH ile üretilen numunelerin yayılma çapı değerlerinden daha büyük olduğu tespit edilmiştir.
- En büyük birim ağırlık %60 C sınıfı UK, %40 F sınıfı UK içeren numunelerden NaOH ile üretilenlerde $1,98 \text{ gr cm}^{-3}$, KOH ile üretilen numunelerde, $1,95 \text{ gr cm}^{-3}$ olarak belirlenmiştir.
- NaOH ile üretilen numunelerin boşluk oranları, KOH ile üretilen numunelerin boşluk oranlarından daha düşük olarak tespit edilmiştir. En düşük boşluk oranı, %60 C sınıfı %40 F sınıfı UK içeren ve NaOH ile üretilen numunelerde %5,76, KOH ile üretilen numunelerde ise numunelerde %7,16 gözlenmiştir.
- En yüksek ultrases geçiş hızı değeri NaOH ve KOH kullanılarak üretilen %60 C sınıfı UK, %40 F sınıfı UK içeren numunelerde tespit edilmiştir. En düşük ultrases geçiş hızı değeri ise %10 C sınıfı UK, %90 F sınıfı UK içeren numunelerde tespit edilmiştir.
- Aktivatör/bağlayıcı oranı %10 kullanılarak, NaOH ve KOH ile üretilen numunelerin basınç ve eğilme dayanımları karşılaştırıldığında, NaOH ile üretilen

numunelerin daha yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

- NaOH ile üretilen numunelerde, %60 C sınıfı ve %40 F sınıfı UK içeren C60-F40 numunesinde 3,8 MPa eğilme dayanımı, 28 MPa basınç dayanımı, en yüksek dayanım olarak tespit edilmiştir. KOH ile aktive edilmiş numunelerde ise %60 C sınıfı ve %40 F sınıfı UK içeren NaOH ile üretilen C60-F40 numunesinde 2,9 MPa eğilme dayanımı, 13,4 MPa basınç dayanımı, en yüksek dayanım olarak belirlenmiştir.
- En yüksek basınç dayanımı tespit edilen numunelerde $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının 2,57, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının ise 1,12 olduğu gözlenmiştir.
- Tamamı F sınıfı UK ile üretilmiş ve NaOH ile aktive edilmiş numunelerde etrenjit oluşumu görülmüştür.
- Numuneler içerisinde, fiziksel ve mekanik özellikler açısından NaOH ile üretilen, %60 C sınıfı ve %40 F sınıfı UK içeren karışımın optimum karışım oranı olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Bhagath Singh G. V. P. and Subramaniam K. V. L. Production and characterization of low-energy Portland composite cement from post-industrial waste, *Journal of Cleaner Production*, 2019; 239: 118024.
- [2] Wang J, Dai Y Gao, L. Exergy analyses and parametric optimizations for different cogeneration power plants in cement industry, *Applied Energy*, 2009; 86(6): 941-948.
- [3] Zhang W, Maleki A, Khajeh M. G, Zhang Y, Mortazavi S. M, Vassel-Be-Hagh A. A novel framework for integrated energy optimization of a cement plant: An industrial case study, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019; 35: 245-256
- [4] Çimento Sektör Raporu (2019), Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü, <https://www.sanayi.gov.tr/plan-program-raporlar-ve-yayinlar/sector-raporlari/mu0303011402> (05.07.2020)
- [5] Habert G, Ouellet-Plamondon C. Recent update on the environmental impact of geopolymers, *RILEM Tech. Lett.* 1 (2016): 17–23.
- [6] <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/> (10.06.2020)
- [7] <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2019-152/essd-2019-152.pdf>, (07.06.2020)
- [8] Yılmaz B, Erdoğan E, Erdoğan Y. Uçucu Kül taban külü ve wallostonit katkılı çimentolara sodyum karbonat ilavesinin etkisinin incelenmesi, *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, İnşaat Mühendisleri Odası, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitab.*2005.
- [9] Fan, F, Liu, Z, Xu, G, Peng, H, Cai, C.S. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. *Construct. Build. Mater.* 2018; 160: 66e81.

- [10] ASTM C618–19, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- [11] Raijiwala DB, Patil HS. , Geopolymer concrete A green concrete, 2010 2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering. ICBEE 2010.
- [12] Provis JL. Green concrete or red herring–future of alkali-activated materials, *Advances in Applied Ceramics*. 2014; 113(8): 472-477.
- [13] Simatupang P, Imran I, Pane I. The Latest Development of Green Concrete in Indonesia, 1st International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials. 2012.
- [14] Sukprasert S, Hoy M, Horpibulsuk S, Arulrajah A, Safuan A, Nazir R. Fly ash based geopolymer stabilisation of silty clay/blast furnace slag for subgrade applications, *Road Materials and Pavement Design*. 2019.
- [15] Yurt Ü. High performance cementless composites from alkali activated GGBFS, *Construction and Building Materials*. 2020; 264: 120222
- [16] Li Y, Min X, Ke Y, Liu D, Tang C. Preparation of red mud-based geopolymer materials from MSWI fly ash and red mud by mechanical activation. *Waste Management*. 2019;83:202-208.
- [17] Suraj D, Priyantha W.J, Sanjaya S, Branimir S. Stabilization of highly expansive soils containing sulfate using metakaolin and fly ash based geopolymer modified with lime and gypsum, *Transportation Geotechnics*. 2020;23: 100327.
- [18] Yurt Ü. An experimental study on fracture energy of alkali activated slag composites incorporated different fibers, *Journal of Building Engineering*. 2020; 32: 101519
- [19] Davidovits J. Geopolymers - Inorganic Polymeric New Materials. *J Therm Anal*. 1991;37(8):1633-56.
- [20] Atis C. D, Gorur E. B, Karahan O, Bilim C, İlkentapar S, LUGA E. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Constr. Build. Mater*. 2015:673-678.
- [21] Okoye F.N, Durgaprasad J, Singh N.B. Fly ash/Kaolin based geopolymer green concretes and their mechanical properties. *Data in Brief*. 2015; 5:739-744.
- [22] X. Yu, L. Jiang, J. Xu, Y. Zu. Effect of Na₂SiO₃ content on passivation and corrosion behaviour of steel in a simulated pore solution of Na₂SiO₃-activated slag. *Constr. Build. Mater*. 2017;146: 156-164.
- [23] H. L. Chi, P. Louda, T. Bakalova, V. Kovačič. Preparation and Mechanical Properties of Potassium Metakaolin Based Geopolymer Paste, *Advanced Engineering Forum*. 2019;31: 38-45.
- [24] Kaya M, Uysal M, Yılmaz K, Atiş C.D. Behaviour of Geopolymer Mortars after Exposure to Elevated Temperatures. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2018;24: 428-436.
- [25] Hosan, A, Haque, S. and Shaikh, F. Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesised fly ash geopolymer at elevated temperatures: a comparative study. *Journal of Building Engineering*. 2016;8:123-130.
- [26] Hayder A, Mohamed A.S, Megan L. W. Review of Fly-Ash-Based Geopolymers for Soil Stabilisation with Special Reference to Clay, www.mdpi.com/journal/geosciences, *Geosciences*, 2020;10: 249
- [27] Rangan, B.V, “Fly ash-based geopolymer concrete”. Research Report GC 4, Engineering Faculty, Curtin University of Technology.2008; SF:44, Perth, Australia.
- [28] Komljenovic, M, Bascarić, Z, Bradic, V. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers.. *J. Hazard. Mater*,2010; 181: 35- 42.
- [29] Greiser S, Gluth G, P Sturm, Jäger C, 29Si 27Al}, 27Al {29Si and 27Al 1H double-resonance NMR spectroscopy study of cementitious sodium aluminosilicate gels (geopolymers) and gel-zeolite composites. *RSC Advances*. 2018; 70: 40164–40171.
- [30] Tippayasam C, Balyore P, Thavorniti P, Kamseu E, Leonelli C, Chindaprasirt P, et al. Potassium alkali concentration and heat treatment affected metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*.2016; 104: 293–297.
- [31] Ankur Gupta. Investigation of the strength of ground granulated blast furnace slag based geopolymer composite with silica fume, *Materials Today: Proceedings*. 2020.
- [32] Kaya M, Uysal M, Yılmaz K, Karahan O, Atiş C.D. Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars, *Gradevinar*.2020; 72 (4): 297-309.
- [33] İlkentapar, S, Atiş, C. D, Karahan, O, Görür Avşaroğlu E. B. Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class F fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*. 2017;vol.151: 363-369.
- [34] Ozodabas, A, Yılmaz, K. Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice. *Construction And Building Materials*.2013: Vol.48 pp.26.
- [35] Atabey İ.İ. F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği. Doktora Tezi, 2017
- [36] Balcıkanlı M, Turker H T, Ozbay, E, Karahan O, Atiş C. D. Identifying the bond and abrasion behavior of alkali activated concretes by central composite design method. *Construction and Building Materials*, 2017; 132: 196-209.
- [37] Kaya M, Farklı Tür Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Alkali Aktive Edilmiş Harçların Mekanik ve Durabilite Özelliklerinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. 2016
- [38] M. Zhang, M. Zhao, G. Zhang, D. Mann, K. Lumsden, and M. Tao, "Durability of red mud-fly

- ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water," *Construction and Building Materials*, 2016; 124:373-382.
- [39] B. B. Jindal, "Investigations on the properties of geopolymer mortar and concrete with mineral admixtures: A review," *Construction and Building Materials*. 2019;227:116644.
- [40] Nuaklong P, Wongs A, Sata V, Boonserm K, et al, Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate, *Heliyon*. 2019;5(9): e02513,
- [41] TS EN 12350-5 :2019; Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi, Türk Standardları Enstitüsü,2019
- [42] TS EN 1015-11, Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, Türk Standardları Enstitüsü,2013
- [43] Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement & Concrete Composites*.2007; 29, 224–229.
- [44] Aygörmez Y, Canpolat O, Al-mashhadani M, Uysal M. Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites, *Construction and Building Materials*.2020; 235(28): 117502.
- [45] Hamidi R, Man Z, Azizli K. Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer, *Procedia Engineering*.2016; 148: 189–193.
- [46] Purbasari A, Samadhi T, Bindar Y. The Effect of Alkaline Activator Types on Strength and Microstructural Properties of Geopolymer from Co-Combustion Residuals of Bamboo and Kaolin, *Indones. J. Chem*. 2018; 18 (3): 397–402.
- [47] Askarian M, Tao Z, Samali B, Adam G, Shuaibu R. Mix composition and characterisation of one-part geopolymers with different activators. *Construction and Building Materials*,2019; 225:526–53.
- [48] Wang Y, Liu X, Zhang W, Li Z, Zhang Li Y, Ren Y. Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer, , *Journal of Cleaner Production*,2020; 244: 118852.
- [49] Lee B, Kim G, Kim R, Cho B, Lee S, Chon C. Strength development properties of geopolymer paste and mortar with respect to amorphous Si/Al ratio of fly ash. *Construction and Building Materials*.2017; 151: 512–519.
- [50] Temuujin J, Riessen A, Williams R. Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *Journal of Hazardous Materials*, 2009; 167: 82–88.