









Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Alkali ile Aktive Edilmiş Cüruf ve Uçucu Kül Harçlarına Yüksek Sıcaklık Sonrası Hava Kürünün Etkisi

 Rabia Gizem SERTBAKAN^a,  İsmail İsa ATABEY^{b,*},  Uğur DURAK^c,  Serhan İLKENTAPAR^c,  Okan KARAHAN^c,  Cengiz Duran ATIŞ^c

^a İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Nevşehir, TÜRKİYE

^c İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: ismailatabey@nevsehir.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1091163

Öz

Bu çalışmada alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren harçların dayanım özelliklerine yüksek sıcaklık sonrası hava kürü koşullarının etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla uçucu kül %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında yüksek fırın cürufu ile ikame edilerek alkali ile aktive edilmiş harçlar üretilmiştir. Harçlarda aktivatör olarak %10 oranında Sodyum (Na) içeren sodyum metasilikat kullanılmıştır. Üretilen harçlar 24 saat 90°C ısı küre tabi tutulmuştur. Isıl kür sonrası numuneler 400, 600 ve 800°C'de yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Referans grubu numuneleri etüv kürü uygulandıktan sonra, birinci grup numuneler yüksek sıcaklık uygulandıktan 1 gün sonra, ikinci grup numuneler ise yüksek sıcaklık uygulandıktan 28 gün sonra ağırlık kaybı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık öncesi en yüksek basınç dayanım 75,5 MPa ile %100 cürufu numunelerde elde edilirken en düşük basınç dayanımı 44,6 MPa ile %100 uçucu kül içeren numunelerde elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıktan sonra 28 gün havada kür uygulanan numunelerin basınç dayanım değerleri yüksek sıcaklığa maruz kalmayan numunelerin basınç dayanım değerleri ile karşılaştırıldığında, 400°C, 600°C ve 800°C'de sırasıyla en fazla %32, %64 ve %93 basınç dayanımı kaybı meydana gelmiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 gün süreyle havada kür edilmesi, basınç dayanımlarında önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Yüksek sıcaklık sonrası eğilme ve basınç dayanımı kaybı hemen oluşmuş, 28 gün hava kürü ile numuneler genel olarak basınç dayanımlarını korumuşlardır.

Anahtar Kelimeler: Alkali aktivasyon, cüruf, uçucu kül, dayanım, yüksek sıcaklık, hava kürü.

The Effect of Post-Fire Air Curing on Alkali-Activated Slag and Fly Ash Mortars

ABSTRACT

In this study, the effect of high temperature post-air curing conditions on the strength of mortars containing alkali-activated blast furnace slag and fly ash was investigated. For this purpose, alkali-activated mortar samples were produced by replacing 0%, 25%, 50%, 75%, 100% fly ash with blast furnace slag. In the study, sodium metasilicate containing 10% sodium (Na) was used as activator. Samples produced were heat cured at 90°C for 24 hours. After heat curing, the samples were exposed to elevated temperatures at 400, 600 and 800°C. Weight loss, flexural, and compressive strength tests were applied to the first group samples one day after the heat curing, the second group samples one day after the elevated temperature, and the third group samples 28 days

after the elevated temperature. While the highest compressive strength before high temperature was obtained at 75.5 MPa in 100% slag samples, the lowest compressive strength was obtained at 44.6 MPa in samples containing 100% fly ash. When the compressive strength values of the samples, which were cured in air for 28 days after high temperature, were compared with the compressive strength values of the samples that were not exposed to high temperature, a maximum of 32%, 64% and 93% loss of compressive strength occurred at 400°C, 600°C and 800°C, respectively. Air curing of the samples for 1 and 28 days after high temperature did not cause a significant change in their compressive strength. The flexural and compressive strength loss occurred immediately after high temperature, and the samples generally preserved their strengths after 28 days of air curing.

Keywords: Alkaline activation, slag, fly ash, strength, high temperature, air curing.

I. GİRİŞ

Nüfus artışı ve toprakların kullanımının kısıtlı olması bakımından yüksek binalara veya yeraltı yapılarına duyulan ihtiyaç artmaktadır. Bu tür inşaatlar yapımı ve servis ömrü boyunca yangın hasarları ile karşı karşıya kalmaktadır. Son yıllarda dünya üzerinde çok sayıda yangın insan yaşamını ve yapıları tehdit edecek şekilde artmaktadır [1]. Ülkemizde değişen iklim koşulları ve vatandaşların bilinçsiz davranışları yüzünden son zamanlarda birçok yangın yaşanmıştır. İnşaat endüstrisinde geleneksel beton, yaygın olarak yangına dayanıklı bir malzeme olarak tanınmasına rağmen, servis ömrü boyunca yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonların kimyasal bileşimlerinde ve fiziksel özelliklerinde ciddi değişiklikler meydana gelmektedir [2],[3]. Genellikle beton 300 °C'nin altındaki sıcaklığa maruz kaldığında dayanımda bir azalma olmaz ya da bünyedeki suyun buharlaşmasından dolayı çok az dayanım artışı olabileceği görülmektedir [3]. Ancak 300°C'den sonra betonun yapısı hızla bozulmaktadır [4]. Beton bünyesine etki eden sıcaklık 400°C'nin üzerine çıktığında dayanım önemli ölçüde azalmaya başlar [5]. Bu azalma kalsiyum-silikat-hidrat jelinin 900°C'de tamamen yok olmasına kadar devam eder [6]. Ancak çimentosuz üretilen alkali ile aktive edilmiş harçlar çimentolu harçlara göre farklı yangın davranışı gösterebilmektedir.

Günümüzde, atmosfere salınan karbondioksit miktarını da azaltan, yüksek sıcaklıklarda mekanik performansını koruyabilen daha çevreci yapı malzemesi geliştirilmektedir. Bağlayıcı bileşen olarak Portland çimentosu kullanmak yerine, uçucu kül, cüruf gibi atık veya yan ürünler kullanılarak alkali aktivasyon yöntemi ile kompozit malzemeler oluşturulabilmektedir. Alkali aktivasyon teknolojisi, Portland çimentosuna benzer mühendislik özellikleri ve bazı durumlarda daha iyi termal özellikler nedeniyle inşaat endüstrisinde yaygın kullanımı için uygundur [7]. Cüruf, uçucu kül gibi atık malzemelerin yüksek sıcaklık koşullarındaki performansları hakkında yapılan çalışmalarda açık gözenek yapısı sebebi ile Portland çimentosundan daha iyi performans gösterdiğine, 600-800°C ve daha yüksek sıcaklıklarda bile çoğu durumda soğumadan sonra basınç mukavemetlerini koruduğu sonucuna varılmıştır [7],[8]. Literatür incelendiğinde cüruf ve uçucu küllü harçların yüksek sıcaklık özellikleri ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Kaya ve ark. (2018) Uçucu küllü geopolimer harçların çimentolu kontrol harçlarına göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [9]. Çelikten ve Canbaz (2020), cüruf içeren lifli alkali ile aktive edilmiş harçların 200°C ve 400°C gibi düşük sıcaklıklarda dayanım artışı belirlemişlerdir [10]. Başka bir çalışmada Çelikten ve ark. (2019), yüksek fırın cürufu ve uçucu kül bazlı alkali ile aktive edilmiş harçların Portland çimento harçlarına göre 800 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olduğunu vurgulamışlardır [11]. Yurt (2020) çalışmasında, yüksek fırın cürufunun yüksek dayanımlı çimentosuz beton üretiminde kullanılabilirliğini ortaya koymuştur [12]. Ancak yapılan bu çalışmalarda yüksek sıcaklık sonrası hemen dayanım testleri gerçekleştirilmiştir Yüksek sıcaklık sonrası dayanım gelişimini araştıran çalışmalar kısıtlıdır. Lee et al. [13], 800°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz kalan alkali ile aktifleştirilmiş cüruf/uçucu kül hamur performansını araştırmışlardır. Yüksek kalsiyum içerikli alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcıların ana reaksiyon ürünü olan C-A-S-H jelinin, düşük kalsiyum içeren alkali ile aktifleştirilmiş bağlayıcıların ana reaksiyon ürünü olan N-A-S-H jeline göre yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra dehidratasyon ve bozulmaya karşı daha savunmasız olduğunu belirtmektedirler.

Poon ve ark. [6] çimentolu harçların içerisine farklı oranlarda puzolan ilave ederek numuneler üretmişlerdir. Ürettikleri numuneleri 600°C ve 800°C yüksek sıcaklık sonrası havada ve suda kür ettikten sonra 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımlarını ölçmüşlerdir. Yaptıkları araştırmalar sonunda yüksek sıcaklık sonrası numunelerin basınç dayanımının büyük oranda düştüğünü ancak havada ve suda ikinci bir kür işleminden sonra numunelerin basınç dayanımında az da olsa bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Daha önceki çalışmalarda, alkali ile aktive edilen harçların cüruf [14] ve uçucu kül [15] ile normal kür özellikleri incelenmiştir. Ayrıca sodyum metasilikatin aktivatör olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar olsa da [16] sodyum hidroksit ve sodyum silikatin kullanımı kadar yaygın değildir. Bu çalışmada ise alkali ile aktive edilmiş cüruf ve uçucu kül harçlarının yüksek sıcaklık sonrası hava kürü ile dayanımında oluşan değişim araştırılmıştır. Bu amaçla farklı oranlarda bir araya gelen cüruf ve uçucu kül bileşimi harçlar 400, 600 ve 800°C sıcaklığa maruz bırakılarak ortam sıcaklığında 1 ve 28 gün sonraki dayanım değişimleri belirlenmiştir. Böylece literatürde yapılan araştırmaların büyük bir bölümünü oluşturan yüksek sıcaklık sonrası hemen dayanım deneyleri yerine ortam sıcaklığında bekleyen harçların dayanım durumlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

II. MATERYAL

Laboratuvar çalışmasında alkali ile aktive edilmiş harç üretimi için; yüksek fırın cürufu, uçucu kül, sodyum metasilikat, dere kumu ve içilebilir şebeke suyu kullanılmıştır. Malzemelere ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

A. CÜRUF

Deneyisel çalışmalarda, Hatay ili İskenderun ilçesindeki İSDEMİR Demir Çelik Fabrikasının attığı olan yüksek fırın cürufu (C) kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu 45µm'dan daha ince olup, özgül ağırlığı 2,90 g/cm³'tür. Cürufa ait kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

B. UÇUCU KÜL

Çalışmada, Adana ili Yumurtalık ilçesi Sugözü köyünde bulunan Sugözü Termik Santrali'nden elde edilen, 45µm'dan büyük tane miktarı %18,5, özgül ağırlığı 2,29 g/cm³ olan CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılan F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Cüruf ve uçucu kül kimyasal özellikleri.

Oksit, %	Cüruf	Uçucu Kül
SiO₂	37,11	59,92
CaO	36,76	1,62
Al₂O₃	10,48	20,88
Fe₂O₃	1,43	8,74
Na₂O	0,00	1,02
MgO	7,11	1,89
K₂O	0,79	2,12
SO₃	1,05	0,17
BaO	0,22	0,13
TiO₂	0,63	0,91

P₂O₅	0,00	0,27
Diğer	4,42	2,33
Kızdırma Kaybı	2,35	2,10

C. DERE KUMU

Harç üretiminde maksimum tane boyutu 4 mm'den küçük olan dere kumu kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı 2,68, su emme oranı %1,97'dir. Dere kumunun tane dağılımı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo2. Dere kumunun tane dağılımı.

Elek Çapı, mm	Geçen, %
4,00	99,1
2,00	65,1
1,00	40,2
0,50	21,3
0,25	9,9
0,13	3,7
0,06	0,9

D. AKTİVATÖR VE SU

Deneyisel çalışmalarda aktivatör olarak kullanılmak üzere Tekkim Kimya Sanayi firmasından granül şeklinde temin edilen ve kimyasal özellikleri Tablo 3'de verilen sodyum metasilikat temin edilmiştir. Ayrıca harç hazırlamada şehir şebekesinden içilebilir musluk suyu kullanılmıştır.

Tablo3. Sodyum metasilikatın kimyasal analizi.

Spesifikasyon	Saflık	Sodyum Oksit (Na₂O)	Silika (SiO₂)	Demir (Fe)	Suda Çözünmeyen	pH
Değerler (%)	≥95	48,0-51,0	44,4-47,4	≤0,1	≤0,5	>12

III. METOT

Laboratuvar çalışmalarında üretilen harçların su/bağlayıcı oranı 0.40 ve kum/bağlayıcı oranı 3 olarak belirlenmiştir. Alkali aktivatör olarak %10 Na oranında metasilikat uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile beraber karışıma ilave edilerek kullanılmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu yerine %0, %25, %50, %75, %100 oranlarında ikame edilerek harçlar üretilmiştir. Harç karışımları TS EN 196-1 [17] standardına göre hazırlanmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu yerine seçilen oranlarda değiştirilerek su ile birlikte karıştırma kabında 30 saniye karıştırılmıştır. Karıştırma sonrası ikinci 30 saniyelik süre içerisinde uçucu kül ve cürufu aktive etmek için granül olarak kumun içerisine sodyum metasilikat ilave edilmiştir. Ardından yüksek hızda karışımın tamamı 30 saniye daha mikserde karıştırılmaya devam edilmiştir. Karıştırıcı durdurulup ilk 30 saniyede kabın çeperlerindeki harç ortaya toplanarak toplam 90 saniye beklenmiştir. Ardından karıştırma işlemindeki son aşama olan yüksek hızda 60 saniye devam edilerek harç karışımı işlemi sonlandırılmıştır. Hazırlanan harçlar 40mm×40mm×160mm prizmatik kalıplara sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Numuneler 90°C etüvde 24 saat ısıtılarak kuru edilmiştir. Ardından numuneler kalıptan çıkarılmış ve oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen numunelerden bir takımı yüksek sıcaklık öncesi eğilme ve basınç

dayanım değerlerinin bulunması için deneye tabi tutulmuştur. Diğer iki grup numuneler 400°C, 600°C ve 800°C olmak üzere her sıcaklık grubu için dakikada 5°C artış gösterecek şekilde yüksek sıcaklık fırını ayarlanmış, hedeflenen sıcaklığa geldiğinde 60 dakika yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası fırından çıkarılan numuneler bir gün oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numunelerden birinci gruba 1 günlük yangın sonrası eğilme ve basınç dayanım değerlerinin bulunması için hemen eğilme ve basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. İkinci gruba ait numuneler ise yüksek sıcaklık sonrası 28 gün oda sıcaklığında bekletildikten sonra eğilme ve basınç dayanımı deneyleri uygulanarak laboratuvar koşullarında beklemenin etkisi belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin yüksek sıcaklık sonrası 28 günlük ağırlıkları kaydedilerek yüksek sıcaklık öncesi ağırlıklarına oranlanarak toplam yüzde ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Numuneler cüruf içeriğine göre kodlanmıştır. Örneğin C75 kodlu numuneler %75 Cüruf %25 uçucu kül içeren karışımları tanımlamaktadır. C100 grubu %100 cüruf, C0 ise %100 uçucu kül içeren harç grubuna aittir. Karışıma giren malzeme miktarları Tablo 4'te verilmiştir.

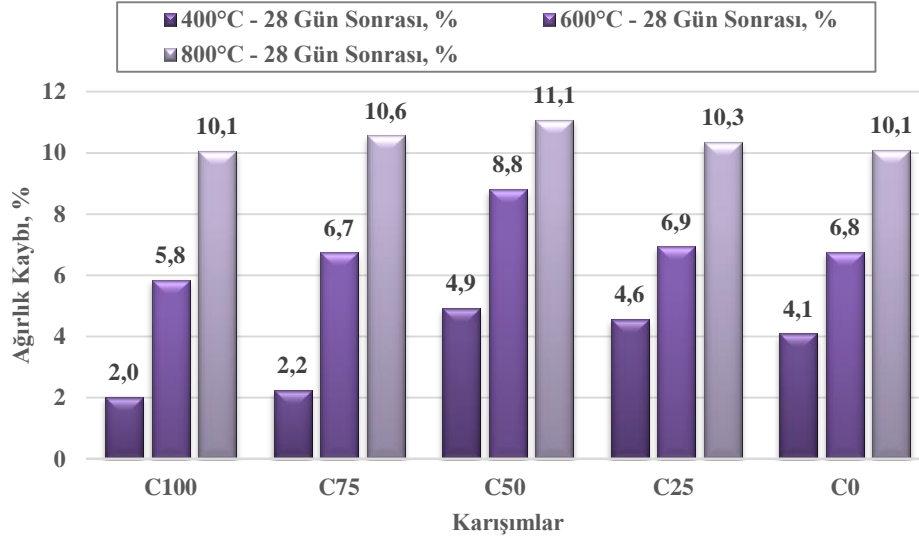
Tablo 4. Harç karışım miktarları (g).

Karışım Kodu	Cüruf	Uçucu Kül	Kum	Sodyum Metasilikat	Su
C100	450	0	1350	120	180
C75	337,5	112,5	1350	120	180
C50	225	225	1350	120	180
C25	112,5	337,5	1350	120	180
C0	0	450	1350	120	180

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

A. AĞIRLIK KAYBI

Laboratuvar çalışmalarında yüksek sıcaklık sonrası 28 günlük numunelerin ağırlık kayıpları belirlenerek Şekil 1'de verilmiştir. Tüm harç gruplarında sıcaklık artışı ile beraber ağırlık kayıpları oluşmuştur. Ancak C100 ve C75 grubu cüruf içeriği fazla olan harçlar 400°C'de C50, C25 ve C0 grubu harçlara göre daha düşük ağırlık kaybı yaşamıştır. Kür sonrası C100, C75, C50, C25 ve C0'ın ağırlık kaybı sırası ile %2,0, %2,2, %4,9, %4,6, %4,1 iken 800°C sonrası sırasıyla %10,1, %10,6, %11,1, %10,3, %10,1 olarak elde edilmiştir. Ancak kayıp oranları birbirine yakın olsa da C50 grubu harçlarda her sıcaklık için daha fazla ağırlık kaybı gözlemlenmiştir. C100 grubu harçlarda 400°C ve 600°C sıcaklık sonrası, C0 harcına göre daha düşük ağırlık kaybı görülmüş olsa da 800°C'de ağırlık kaybı değerleri birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Ağırlık kayıplarının sonuçları eğilme dayanım deneyleri ile birlikte değerlendirildiğinde en yüksek eğilme ve ağırlık kayıpları C50 grubu numunelerinde gözlenmiştir (Şekil 1,2,3 ve 4). Ağırlık kaybının 800°C'ye yükselen sıcaklıklarda artması, harcın mekanik bozulmasının yüksek sıcaklıkla önemli ölçüde şiddetlenmesi ile gözenekli mikro yapının oluşumuna bağlanmaktadır [18].

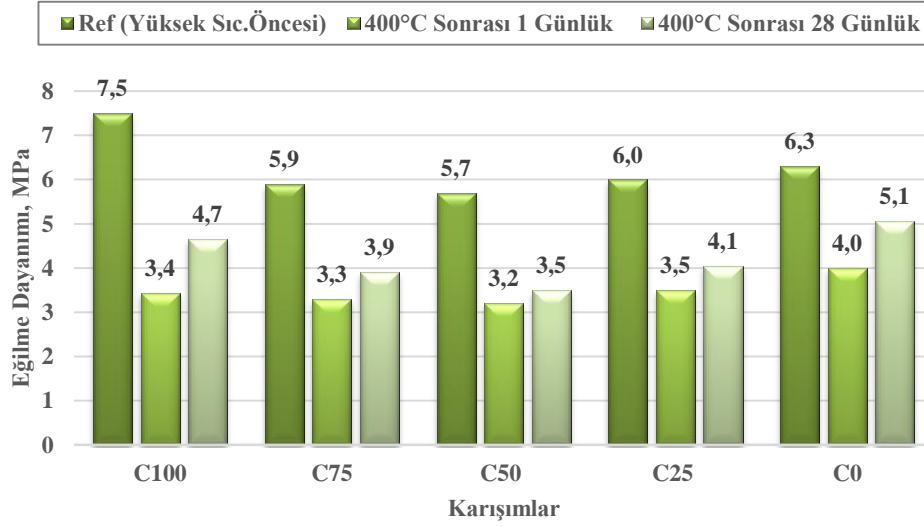


Şekil 1. 400, 600 ve 800°C sonrası 28 günlük ağırlık kaybı.

B. EĞİLME DAYANIMI

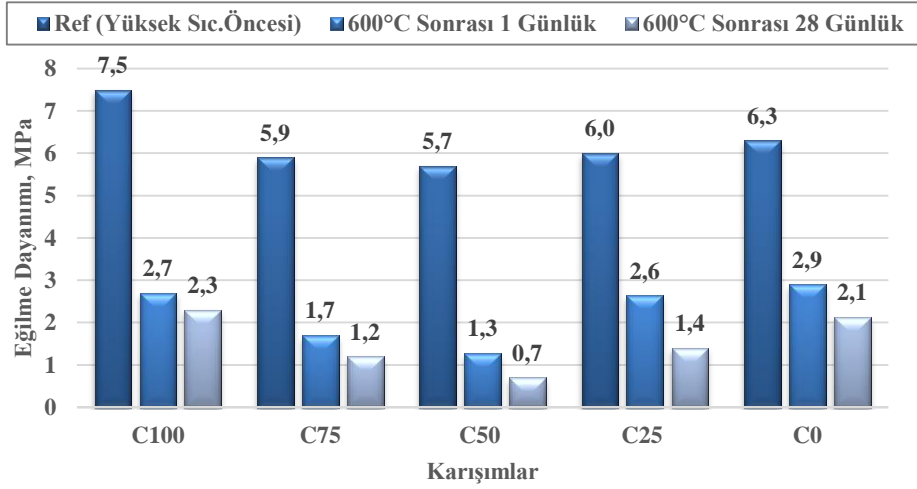
Çalışmada üretilen alkali ile aktive edilmiş harçların yüksek sıcaklık öncesi eğilme dayanımı C100, C75, C50, C25 ve C0 için sırasıyla 7,5 MPa, 5,9 MPa, 5,7 MPa, 6,0 MPa ve 6,3 MPa'dır (Şekil 2,3,4). C100 ve C0 grubu harçlar cüruf ve uçucu külün birlikte kullanıldığı harç gruplarından daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. C100 grubu ile C0 grubu arasında basınç dayanımında yaklaşık 30 MPa fark var iken eğilme dayanımında 1,2 MPa fark vardır. Yani basınç dayanımında azalma %41 iken eğilme dayanımında azalma %16'dır. Bu durumun sebebi artan uçucu kül oranı Eğilme Dayanımı/Basınç Dayanımı oranını arttırmaktadır. Özellikle C25 ve C0 grubu harçların Eğilme dayanımı/Basınç dayanımı oranı C100 grubundan daha yüksektir. Benzer bir çalışmada Marjanovic' ve ark. [19], alkali ile aktive edilen harçlarda ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 seviyelerinde uçucu külü cüruf ile yer değiştirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, Uçucu kül/Cüruf oranının artması Eğilme Dayanımı/Basınç Dayanımı oranlarını arttırdığını belirlemişlerdir.

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren numunelerin 400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık öncesi eğilme dayanımı en yüksek C100 grubu numunelerde 7,5 MPa, en düşük ise C50 grubu numunelerde 5,7 MPa olarak ölçülmüştür. 400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra numunelerin 1 günlük eğilme dayanım değerleri dikkate alındığında en düşük olduğu grup C50 grubudur. C50 grubu numunelerde 1 günlük kayıp %43,9 ve 28 günlük ise %38,6'dır. 400°C yüksek sıcaklık sonrası 28 günlük eğilme dayanım değerleri 1 günlük eğilme dayanım değerleri ile karşılaştırıldığında artış gözlenmektedir. Ancak bu artış sadece 400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde gözlenmiştir. 600°C ve 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde böyle bir artış söz konusu değildir.



Şekil 2. 400°C öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değişimi.

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren numunelerin 600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri Şekil 3’de verilmiştir. 400°C’de olduğu gibi 600°C yüksek sıcaklıkta da en düşük eğilme dayanımı değeri C50 grubuna aittir. Sıcaklık artışı ile birlikte dayanım kaybı tüm harç gruplarında artmıştır.

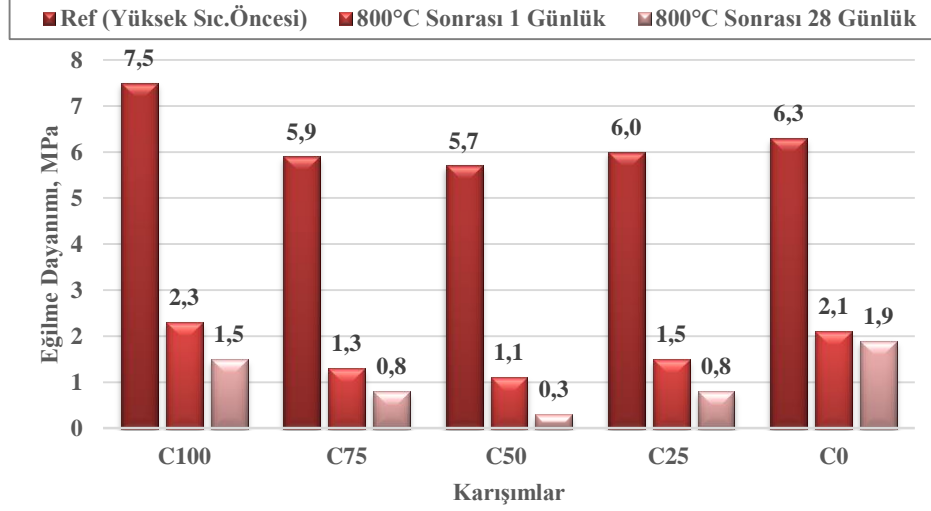


Şekil 3. 600°C öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değişimi.

Numunelerin 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük eğilme dayanımı değerleri Şekil 4’de verilmiştir. Tüm harç grupları için dayanım kaybının en yüksek olduğu sıcaklık 800°C’dir. 800°C’de 400°C ve 600°C’de olduğu gibi en düşük eğilme dayanımı ise yine C50 grubu numunelere aittir. Dayanım kaybının en çok gözlemlendiği bu numune grubunda benzer şekilde ağırlık kaybı da yüksektir (Şekil 1). C50 grubu numunelerde 800°C yüksek sıcaklık sonrası 1 günlük dayanım kaybı %80,7 olarak ölçülürken, bu değer 28 günlük sonuçlar dikkate alındığında %94,7 olarak ölçülmüştür. Ancak dayanım kaybı büyük oranda yüksek sıcaklık sonrası oluşmuş, 28 günlük bekleme dayanım değerlerinin düşmesinde kayda değer bir etki oluşturmamıştır.

Genel olarak hem yüksek sıcaklık öncesi hem de 400°C, 600°C ve 800°C’de C100 ve C0 grubu harçların eğilme dayanımları C50 grubundan yüksektir. %50 cüruf ve % 50 uçucu kül içeren harçlarda

eğilme dayanımının düşük olması, cürüflü sistemlere uçucu kül ilave edilmesi reaksiyon kinetiğini değiştirmektedir. Bu durum Pan ve ark. (2018) ve Puertas ve ark. (2011) tarafından, düşük Ca içeriğinin dayanımı arttıran jel oluşumunu geciktirdiği böylece %100 uçucu kül veya %100 cüruf ile üretilen harçlara göre karışımın farklı davranış sergilediğini ifade etmektedirler [20,21].

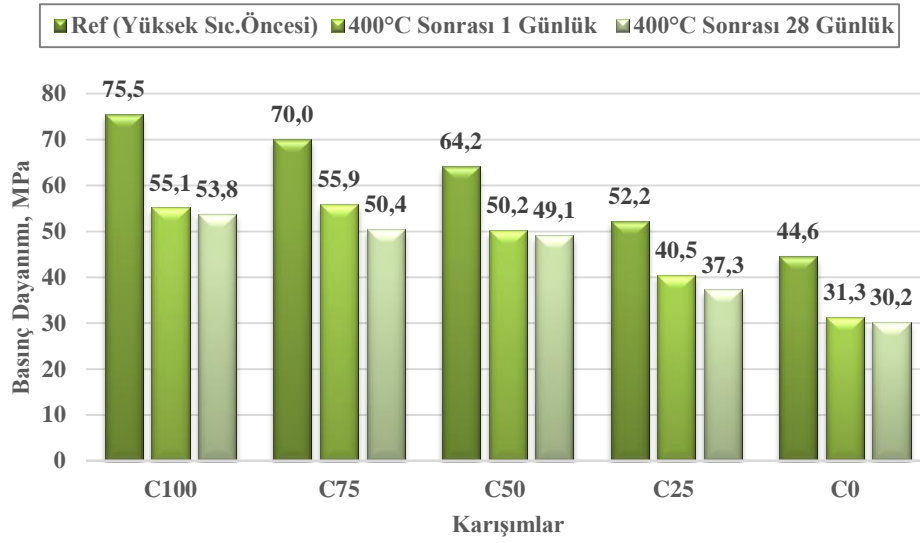


Şekil 4. 800°C öncesi ve sonrası eğilme dayanımı değişimi.

C. BASINÇ DAYANIMI

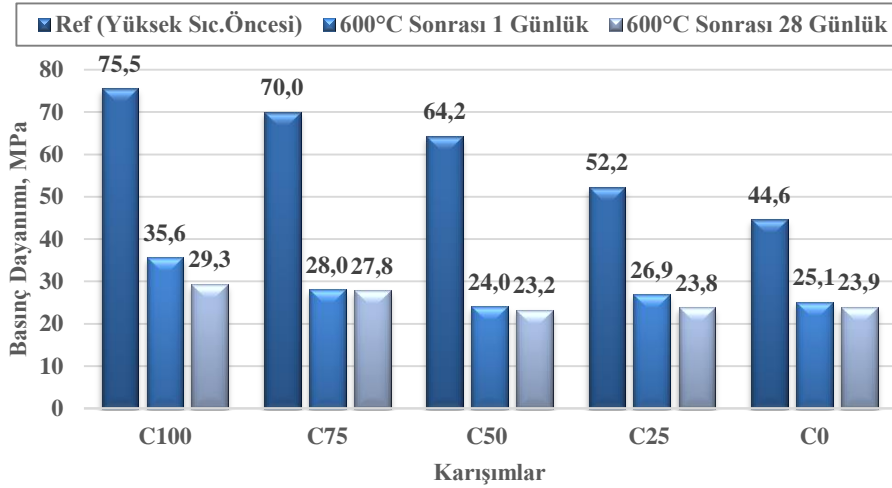
Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül içeren alkali ile aktifleştirilmiş harçların yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımları, yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük basınç dayanımları ile karşılaştırmak için kullanılmıştır. C100, C75, C50, C25 ve C0 grubu harçların basınç dayanımları sırası ile 75,5 MPa, 70,0 MPa, 64,2 MPa, 52,2 MPa ve 44,6 MPa'dır. Harç içeriğindeki uçucu kül oranı artışı ile dayanımda düşüş eğilimi oluşsa da %100 uçucu kül ile üretilen C0 numuneleri açısından bakıldığında cüruf ilavesinin sabit üretim parametrelerinde dayanım artışı sağladığı söylenebilir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu hem kimyasal özellik hem de kullanılan aktivatörün atık tozlar üzerindeki etkisi sebebi ile farklı dayanım gelişimi göstermişlerdir. Bu sebeple sodyum metasilikat ile 0,4 su/bağlayıcı oranında C100 en yüksek C0 ise en düşük değerde çıkmıştır. Oysa Pan ve ark. [22] yaptıkları çalışmada, sodyum hidroksit, sodyum silikat ve sodyum metasilikat karışımı aktivatör kullanarak ürettikleri %100 cüruf ve %100 uçucu kül içeren harçların dayanımlarını birbirine yakın bulurken, %50 cüruf-%50 uçucu kül içeren harçların dayanımlarının en düşük dayanım olduğunu belirlemişlerdir. Bu durum yalnızca sodyum metasilikat kullanılarak sonuç elde edilen çalışmamızda Şekil 7'de görüldüğü gibi 800°C sonrasında oluşmuştur. Ayrıca Çelikten ve ark. [11] farklı MS ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) oranlarında sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı aktivatörler ile harç ürettikleri çalışmalarında %100 cüruf içeren karışımlarla %25 ve %50 oranında uçucu kül ile ikame edildiğinde dayanımda düşüş gözlemlenmiştir.

Harç numunelerinin 400°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Harçlarda uçucu kül oranının artışı ile dayanım değerlerinde azalma oluşmuştur. 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük en yüksek basınç dayanım kaybı sırasıyla tamamen uçucu kül ile üretilen C0 grubunda oluşsa da dayanım kayıpları diğer gruplar ile birbirine yakındır. Bu nedenle 400°C'de en düşük C0'de dayanım değeri elde edilse de yüksek sıcaklık sonrası dayanım değişimi yüzde olarak incelendiğinde tüm harç gruplarında 28 gün sonunda %23-%32 arasında dayanım kaybı söz konusudur. Basınç dayanımı eğilme dayanımı ile kıyaslandığında 1 ve 28 gün sonunda farklı dayanım gelişimi oluşmuştur. Eğilme dayanımında yüksek sıcaklık sonrası hava kürü bir miktar dayanım artışına yol açmıştır. Ancak basınç dayanımında 1 günden 28 güne kadar 1-4 MPa arasında dayanım kaybı oluşmuştur.



Şekil 5. 400°C öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimi.

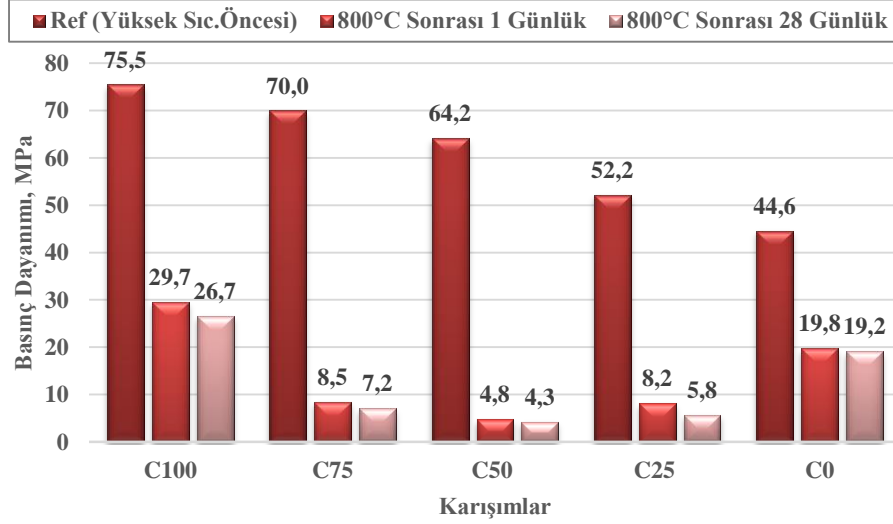
Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren numunelerin 600°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası kür uygulaması sonucu C100 grubunda 1 günden 28 güne dayanım 35,6 MPa'dan 29,3 MPa'ya düşmüştür. 600°C yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük en çok basınç dayanım kaybı sırasıyla %62,6 ve %63,9 ile C50 grubu numunelere aittir. Ancak 28 gün bekleme süresi uçucu kül içeren harçlarda yüksek oranda bir dayanım değişimi oluşturmamıştır. Yüksek sıcaklık sonrası 28 gün bekleyen numunelerin dayanım değerleri 1 günlük bekleme sonrası elde edilen değerlere yakın ya da bir miktar düşüş göstermiştir.



Şekil 6. 600°C öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimi.

Alkali ile aktifleştirilmiş harçların 800°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası 1 ve 28 günlük dayanımları dikkate alındığında en düşük kayıp C0 grubu numunelerde %55,6 ve %57,0 oranında görülmüştür. Ardından C100 ikinci en düşük oransal dayanım kaybı gösteren harç grubudur. 800°C sıcaklık cüruf ve uçucu kül birlikte içeren harç gruplarının dayanımını daha fazla olumsuz etkilemiştir. Yüksek sıcaklık öncesi ile kıyaslandığında 800°C yüksek sıcaklık sonrası 1 ve

28 günlük en çok basınç dayanım kaybı sırasıyla %92,5 ve %93,3 ile C50 grubu numunelere aittir. Ancak C25 ve C75 harçları da C100 ve C0'e göre aşırı dayanım kaybına uğramıştır. Ayrıca 1 günden 28 güne havada bekleme süresi dayanımda önemli ölçüde kayıp oluşturmamıştır. Örneğin; C50 grubu numuneleri, dayanımlarını büyük oranda yüksek sıcaklık etkisi ile kaybetmiş (64,2 MPa'dan 4,8 MPa'ya düşmüş), numunelerin yüksek sıcaklık sonrası 1 günden 28 güne kadar havada beklemesi 4,8 MPa'dan 4,3 MPa'ya düşük değerde (0,5 MPa) bir dayanım kaybı oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 7. 800°C öncesi ve sonrası basınç dayanımı değişimi.

Genel olarak yüksek sıcaklık sonrası hava kürü uygulaması 28 gün sonunda basınç dayanımda küçük oranda kayıplara sebep olmuştur. El-Hassan ve ark (2021) [23] çalışmalarında cüruf ve uçucu kül içeren alkali ile aktifleştirilmiş harçların normal koşullarda havada ve suda ilave kür uygulamasının sonuçlarını araştırmışlardır. Tamamen cüruf ile üretilen harçlara %25 ve %50 oranında uçucu kül ikame etmişlerdir. Tüm harç gruplarında hava kürü ile dayanımda düşüşler gözlemlenmişler ancak su küründe dayanım artışı olmuştur.

Alkali ile aktive edilen cüruf ve uçucu kül içeren harçların yüksek sıcaklık sonrası 1. Gün ve 28. Gün arasında önemli dayanım kaybı oluşmamaktadır. Ancak alkali ile aktive edilen harçlar çimentolu harçlarla kıyaslandığında çimentolu harçlarda ilave hava kürü dayanımda düşüşe yol açmaktadır. Bu durumu açıklayan bir çalışmada Karahan (2011) [24], 400°C yüksek sıcaklık sonrası hemen kırılan numunelerin basınç dayanımı yaklaşık 54 MPa iken 7 gün ilave hava kürü sonunda 43 MPa'ya düştüğünü belirlemiştir. Bu durum 600°C ve 800°C için de geçerlidir. 600°C de 32 MPa'dan 14 MPa'ya, 800°C'de 17 MPa'dan 5 MPa basınç dayanımına düşmüştür. Fakat çalışmamızda alkali ile aktive edilen C100 harcı 400°C'de 55,1'den 53,8 MPa'ya 600°C'de 35,6 MPa'dan 29,3 MPa'ya, 800°C'de ise 29,7 MPa'dan 26,7 MPa'ya düşmüştür. Bu durum C75, C50, C25 ve C0 grubu harçlar için de benzer şekildedir. Bu yönü ile ilave hava kürü dayanım değişimi açısından alkali ile aktive edilen harçların çimentolu harçlardan farklı olarak daha olumlu davranış gösterdiğini ortaya koymuştur [25]. Ayrıca C100 grubu harçlardan C0 a doğru basınç dayanımında azalma eğilimi görülürken bu durum eğilme dayanımında aynı azalış eğilimi göstermemektedir. Luga ve Atiş (2016) çalışmasında da benzer durum söz konusudur. Sodyum metasilikat kullanılarak üretilen cüruf/uçucu kül içeren alkali ile aktive edilmiş harçlarda basınç dayanımı cürufa kül ikame oranının artması ile azalmaktadır. Ancak eğilme dayanımında artış görülmektedir [26].

V. SONUÇ

Deneysel çalışmadan aşağıdaki ana sonuçlar çıkarılabilir:

- Alkali ile aktive edilen harçlarda yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı eşit oranda cüruf ve uçucu kül kullanılan C50 harçlarında en fazla oluşmuştur. Ancak uçucu külün cüruf ile ikame oranı arttıkça genel olarak ağırlık kaybının arttığı görülmüştür.
- 400°C yüksek sıcaklık sonrası 1. günden 28. güne kadar eğilme dayanımında bir miktar artış olmuştur. Bu artış küçük olsa da 600°C ve 800°C sıcaklıkta bu eğilim ters yönde oluşarak eğilme dayanımında düşüş gözlenmiştir.
- Yüksek sıcaklık sonrası oransal olarak en fazla eğilme dayanımı kaybı C50 grubu harçlarda oluşmuştur. Ancak 1 ile 28 gün hava kürü arasında eğilme dayanımı kaybı düşük orandadır.
- Uçucu kül oranı artışı ile C25 ve C0 grubu harçlarda Eğilme dayanımı/Basınç dayanımı oranının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Basınç dayanım değerlerinde sıcaklık artışı ile dayanım kaybı artmıştır. Ancak 400°C ve 600°C yüksek sıcaklık sonrası dayanım kaybı tüm harç gruplarında benzer eğilim gösterirken, 800°C sonrası C100 ve C0 grubu harçların yüksek sıcaklık direncinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.
- Yüksek sıcaklık sonrası numunelerde meydana gelen eğilme ve basınç dayanım kayıpları hemen oluşmuştur. Yüksek sıcaklık sonrası 28 gün hava kürü, numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında kayda değer bir değişim oluşmasına neden olmamıştır.

VI. KAYNAKLAR

- [1] Q. Ma, R. Guo, Z. Zhao, Z. Lin, and K. He, “Mechanical properties of concrete at high temperature-A review,” *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 371–383, 2015.
- [2] H. Yang, Y. Lin, C. Hsiao, and J. Y. Liu, “Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity,” *Fire Safety Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 121–130, 2009.
- [3] L. Li, L. Shi, Q. Wang, Y. Liu, J. Dong, H. Zhang, and G. Zhang, “A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing,” *Construction and Building Materials*, vol. 237, p. 117564, 2020.
- [4] S. K. Handoo, S. Agarwal, and S. K. Agarwal, “Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures,” *Cement and Concrete Research*, vol. 32, no. 7, pp. 1009–1018, 2002.
- [5] J. Xiao and G. König, “Study on concrete at high temperature in China - An overview,” *Fire Safety Journal*, vol. 39, no. 1, pp. 89–103, 2004.
- [6] C. S. Poon, S. Azhar, M. Anson, and Y. L. Wong, “Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing,” *Cement and Concrete Research*, vol. 31, no. 9, pp. 1307–1318, 2001.
- [7] O. G. Rivera *et al.*, “Effect of elevated temperature on alkali-activated geopolymeric binders compared to portland cement-based binders,” *Cement and Concrete Research*, vol. 90, pp. 43–51, 2016.
- [8] A. Martin, J. Y. Pastor, A. Palomo, and A. Fernández Jiménez, “Mechanical behaviour at high temperature of alkali-activated aluminosilicates (geopolymers),” *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 1188–1196, 2015.

- [9] M. Kaya, M. Uysal, K. Yilmaz, and C. D. Atiş, “Behaviour of geopolymers mortars after exposure to elevated temperatures,” *Materials Science-Medziagotyra*, 24(4), 2018.
- [10] S. Çelikten ve M. Canbaz, “Yüksek sıcaklığa maruz atık çelik lif takviyeli alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürüflü harçların davranışı,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(6), 1110-1116, 2020.
- [11] S. Çelikten, M. Sarıdemir, ve İ. Ö. Deneme, “Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature,” *Construction and Building Materials*, vol. 217, pp. 50-61, 2019.
- [12] Ü. Yurt, “High performance cementless composites from alkali activated GGBFS,” *Construction and Building Materials*, 264, 120222, 2020.
- [13] N. K. Lee, K. T. Koh, G. H. An, and G. S. Ryu, “Influence of binder composition on the gel structure in alkali activated fly ash/slag pastes exposed to elevated temperatures,” *Ceramics International*, vol 43, no.2, pp. 2471–2480, 2017.
- [14] Z. Almaz Özcan, “Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül tabanlı harçların özellikleri,” Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2020.
- [15] İ. İ. Atabey, “F sınıfı uçucu küllü geopolimer harcının durabilite özelliklerinin araştırılması,” Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2017.
- [16] İ. İ. Atabey, “Farklı aktivatör tipinin atık cam tozu esaslı geopolimer harçların üretim özelliklerine etkisi,” The 3rd International Symposium of Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences (IEACES2021), Karabük, 2021.
- [17] *Çimento Deney Metodları-Bölüm 1: Dayanım Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-1, 2016.
- [18] R. Cai, and H. Ye, “Clinkerless ultra-high strength concrete based on alkali-activated slag at high temperatures,” *Cement and Concrete Research*, 145, 106465, 2021.
- [19] N. Marjanović, M. Komljenović, Z. Bašćarević, V. Nikolić, and R. Petrović, “Physical–mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash–blast furnace slag blends,” *Ceramics International*, vol. 41, no. 1 pp. 1421-1435, 2015.
- [20] Z. Pan, Z. Tao, Y. F. Cao, R. Wuhner, and T. Murphy, “Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature,” *Cement and Concrete Composites*, 86, 9-18, 2018.
- [21] F. Puertas, M. Palacios, H. Manzano, J. S. Dolado, A. Rico, and J. Rodríguez, “A model for the CASH gel formed in alkali-activated slag cements,” *Journal of the European Ceramic Society*, 31(12), 2043-2056, 2011.
- [22] Z. Pan, Z. Tao, Y. F. Cao, R. Wuhner, & T. Murphy, “Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 86, pp. 9-18, 2018.
- [23] H. El-Hassan, E. Shehab, and A. Al-Sallamin, “Effect of curing regime on the performance and microstructure characteristics of alkali-activated slag-fly ash blended concrete,” *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 10, no.5, pp. 289-317, 2021.

[24] O. Karahan, “Residual compressive strength of fire-damaged mortar after post-fire-air-curing,” *Fire and Materials*, vol. 35, no.8, pp. 561-567, 2011.

[25] R. G. Sertbakan, İ. İ. Atabey, U. Durak, S. İlkentapar, O. Karahan ve C. D. Atiş, “Alkali ile aktive edilmiş cüruf+uçucu kül harçlarına yüksek sıcaklık sonrası hava kürünün etkisi,” 4. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS 22), Düzce, 2022.

[26] E. Luga and C. D. Atiş, “Strength properties of slag/fly ash blends activated with sodium metasilicate and sodium hydroxide plus silica fume,” *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*, 60(2), 2016.