

## Yeşil Mutabakatı Destekleyen Mineral Katkılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Asit-Sülfat Direnci ve Karbonatlaşma Derinliği

Müzeyyen BALÇIKANLI BANKİR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İskenderun/Hatay

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5091-8766>

\*Sorumlu yazar: muzeyyen.balcikanli@iste.edu.tr

### Araştırma Makalesi

### ÖZ

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 20.10.2021

Kabul tarihi: 29.03.2022

Online Yayınlanma: 18.07.2022

#### Anahtar Kelimeler:

Sürdürülebilir üretim

Yeşil mutabakat

Mineral katkı

Asit ve sülfat direnci

Karbonatlaşma

Çalışma kapsamında sürdürülebilir ve yeşil mutabakatı destekleyen çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve durabilite performanslarını değerlendirmek için Granüle Yüksek Fırın Cürufu (GYFC), Uçucu Kül (UK) ve Silis Dumanı (SD)'nin tekli, ikili ve üçlü kompozisyonlarının çimento ile ağırlıkça %15, %30 ve %45 oranında ikame edilmesi ile sekiz farklı beton üretilmiştir. Numunelerin 28 ve 90 günlük dört noktadan eğilme dayanımı ve basınç dayanımının yanı sıra 30 gün boyunca %5 konsantrasyonda hazırlanan sülfürik asit ve sodyum sülfat içeren ortamlara maruz kalan betonların performans değerlendirilmesi ağırlık ve dayanım değişimleri dikkate alınarak yapılmıştır. Çimento miktarının %30 azaltılması ile üretilen kompozit numuneler kontrol numunesine göre daha üstün mekanik ve durabilite özelliği sergilemiştir. Laboratuvar ortamında bekletilen numunelerin 60 ve 120 günlük karbonatlaşma derinlikleri (KD) de ölçülmüş ve KD'yi sınırlayan en ideal kompozisyon %15 GYFC+ %15 UK'dir.

### Aggressive Environment and Carbonation Resistance of Sustainable Cement-Based Composites Supporting the Green Deal

### Research Article

### ABSTRACT

#### Article History:

Received: 20.10.2021

Accepted: 29.03.2022

Published online: 18.07.2022

#### Keywords:

Sustainable production

Green deal

Mineral additive

Acid and sulfate resistance

Carbonation

Within the scope of the study, in order to evaluate the mechanical and durability performances of cement-based composites that support sustainable production and green deal, single, double and triple compositions of Granulated Blast Furnace Slag (GYFC), Fly Ash (UK) and Silica Fume (SD) were replaced with cement 15%, 30% and 45% by weight and so eight different concretes were produced. In addition to the four point flexural and compressive strength of the samples at 28 and 90 days, the concretes were exposed to sulfuric acid and sodium sulfate solutions prepared at 5% concentration for 30 days. Performance evaluation was made by considering weight and strength changes. Concrete samples produced by reducing the amount of cement by 30% showed superior mechanical and durability properties compared to the control sample. Carbonation depths (KD) of 60 and 120 days samples, kept in the laboratory, were measured and the ideal composition limiting the KD was 15% GYFC + 15% UK.

**To Cite:** Bankir MB. Yeşil Mutabakatı Destekleyen Mineral Katkılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Asit-Sülfat Direnci ve Karbonatlaşma Derinliği. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(2): 943-957.

### 1. Giriş

Çimento esaslı kompozitler dünyada en çok tercih edilen yapı malzemeleridir. Çimento üretimi ise yüksek enerji tüketiminin yanı sıra doğal kaynak tüketimine de neden olmaktadır. Çimento üretim aşamasında doğaya çok miktarda sera gazı salınımı ve atıl malzeme üretimi gerçekleşmektedir. Çeşitli

sektörlerden açığa çıkarak atmosfere karışan, doğaya bırakılan ve beraberinde küresel ısınma problemini getiren zararlı gaz ve malzemelerin en aza indirgenmesi için çeşitli önlemler alınmaktadır. Bunlardan bir tanesi önümüzdeki 29 yılı hedef alan Avrupa Yeşil Mutabakatı'dır (Şahin ve Önder, 2021). Bu bağlamda atık malzemelerin ekonomide üç farklı kategoride değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmektedir. Bunlar; atık malzemelerin kaynağında kirlenmeden ayrıştırılarak farklı sektörlerde değerlendirilmesi ile sürdürülebilir üretim, bertaraf edilmesi ve doğal hammadde kullanımının sınırlandırılması ile çevreyi korumaya yönelik destek sağlanmasıdır (Şahin ve Önder, 2021). Kalkınan ülkelerde atık veya atıl malzemelerin israfının önüne geçilmesi ile ekonomiye büyük oranda katkı sağlanabilecektir.

Yapı malzemesi olarak kullanılan çimento üretimi de bir takım çevresel sorunlara yol açmaktadır. Dünyadaki CO<sub>2</sub> salınımı %5 oranında çimento üretiminden açığa çıkmaktadır (Gürsel ve Meral, 2012). Çimento kullanımının azaltılması ile bu sorunların da azalacağı açıktır. Çimento yerine kullanılacak alternatif malzeme arayışı birçok araştırmacının konusu durumundadır (Ahmad ve ark, 2021). Farklı sektörlerden açığa çıkan ve çimento yerine kullanılmasının mekanik özellikleri açısından mümkün olduğu belirlenmiş puzolanik özellik gösterebilen malzemeler vardır (Chen ve ark, 2020; Hossain ve ark, 2021). Çelik üretiminden açığa çıkan Yüksek fırın cürufu (GYFC), termik santrallerden açığa çıkan uçucu kül (UK) ve ferrosilikon alaşımların üretiminden açığa çıkan silis dumanı (SD) bunlardan bazılarıdır. Küresel olarak, GYFC, UK, SD yıllık olarak sırasıyla 360 milyar ton, 1 milyar ton, 1622,58 bin ton açığa çıkmaktadır (Malhotra, 2006; Reynolds, 2009; Kumar ve ark, 2017; Kumar ve ark, 2021 ). Bu malzemelerin çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve geçirimsizlik özelliklerine iyileştirici etkisinin olduğunu belirten araştırmalar yapılmıştır. Örneğin, GYFC katkılı harçların yedi günlük dayanımlarının çimento harçlarına göre daha düşük ancak 28 ve 90 günlük numunelerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu yapılan bir çalışmada ifade edilmiştir (Gupta, 2016). SD katkılı harçlar ile kontrol harcının dayanımı karşılaştırıldığında 28 güne kadar basınç dayanımı üzerinde olumsuz bir etkinin olduğu fakat 28 günden sonra %10 SD ilavesi ile 180 günlük kür neticesinde basınç dayanımının daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Sezer, 2012). SD yüksek oranda puzolanik bir malzeme olduğundan, çimentoya eklendiğinde daha fazla C-S-H jel oluşumunu destekler ve böylece basınç dayanımı artar (Jeong ve ark, 2020). Yapılan bir diğer çalışmada UK katkısı ile üretilen harçların basınç dayanımında %3 ile %35 oranında artış meydana geldiği ifade edilmiştir (Hsu ve ark, 2018; Mironyuk ve ark, 2019).

GYFC, SD ve UK katkılı beton veya harçların agresif ortamlardaki performansını araştırmaya yönelik yapılan çalışmalar da mevcuttur. Kırmızı çamur, GYFC ve elektrik ark fırın tozu katkısı ile üretilen çimentolu harçlarda kullanım oranı %10 iken asit atağına karşı daha iyi performans elde edildiği belirtilmiştir (Sabzi ve ark. 2021). Metakaolin bazlı geopolimer kompozitler SD, GYFC ve kolemanit atığı ilavesi ile üretilerek hacimce %10 hidroklorik asit ve sülfürik asit içeren çözeltilerde 12 ay bekletilmiştir. Performans değerlendirmesi ağırlık kaybı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı açısından yapılmıştır. Geopolimer harçların eğilme ve basınç dayanımlarının sülfürik ve hidroklorik

asit saldırılarına maruz bırakıldıktan sonra önemli oranda azaldığı ifade edilmiştir. Durumun sebebi yapılan mikroyapı analizleri neticesinde belirlenmiş ve sülfürik ve hidroklorik asit ortamlarında bekletilen numunelerde oksijen-alyuminyum köprüsünün (-Al-Si-O) bozulması olarak açıklanmıştır. Sonuç olarak basınç ve eğilme dayanımında azalmaya sebep olduğu belirtilmiştir (Aygörmez ve Canpolat, 2021). Yapılan başka bir araştırmada GYFC ve kalsine kil katkısı ile üretilen geopolimer betonların %5 konsantrasyondaki asit atağına karşı sadece çimento ile üretilen betonlara göre daha dirençli olduğu belirtilmiştir (Gupta ve ark, 2021).

Literatürden elde edilen bilgiler tabanında ancak farklı olarak bu çalışmada YFC, UK ve SD'nin çimento ile tekli, ikili ve üçlü olarak yer değiştirmesi ile Çimento esaslı yeşil mutabakatı destekleyen kompozitler (ÇEYK) üretilmiş ve mekanik özelliklerinin yanı sıra çevresel etkiler karşısındaki performansı araştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan çimento miktarı %45'e varan oranlarda azaltılıp yerine YFC, SD ve UK'nin tekli, ikili ve üçlü kombinasyonları kullanılarak beton üretimi yapılmıştır. ÇEYK numunelerinin eğilme ve basınç dayanımının yanı sıra asit ve sülfat atağına karşı hangi kombinasyonun daha dirençli olduğu tespit edilmiştir. Beton elemanların servis ömrü boyunca istenmeden maruz kaldığı karbonatlaşma etkisine karşı numuneler 120 güne kadar denize yakın olan bir bölgede bekletilerek 60 ve 120 gün sonra karbonatlaşma derinlikleri (KD) ölçülmüştür. Geçen bu süre zarfında KD'nin hangi kombinasyonda en az ve en çok olduğu belirlenmiştir. Sürdürülebilir ÇEYK üretimi ile daha az maliyet ve çevre kirliliği ile daha üstün özelliklerde çimento esaslı kompozit üretimi, yöntemi ile beraber belirlenmiştir.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1. Malzemeler**

Çalışma kapsamında mineral katkıları (GYFC, SD ve UK) sayesinde ÇEYK üretilmiştir. Üretimde eşit oranlarda olmak koşulu ile ikili ve üçlü kombinasyonlar kullanılarak sekiz farklı ÇEYK üretilmiştir. CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. CEM I 42.5 R, GYFC, SD ve UK'nin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Agregalar olarak en büyük tane boyutu 11 mm olan kalker esaslı agregalar ve en büyük tane boyutu 4 mm olan kalker esaslı kum kullanılmıştır. Karışım ve kür suyu olarak İskenderun şehir suyu kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak tüm karışımların eşit çökme değerine (S4) ulaşması sağlanmıştır.

Mineral katkıların çimento ile tekli, ikili ve üçlü yer değiştirmesi ile üretilen ÇEYK'lerin üretiminde su/toplam bağlayıcı oranı 0,5 olarak sabit tutulmuş ve tüm karışımlar için toplam bağlayıcı dozajı 400 kg/m<sup>3</sup> seçilmiştir. Üç mineral katkının tekli, ikili ve üçlü olarak çimento ile yer değiştirme oranı hacimce %0, %15, %30 ve %45'tir. K1 kodlu karışımda hiç mineral katkı bulunmadığından diğer numuneleri karşılaştırmak için kontrol numunesi olarak seçilmiştir. K2, K3 ve K4 kodlu karışımlarda %15 oranında GYFC, UK ve SD bulunurken, K5, K6 ve K7 kodlu karışımlarda ikili kombinasyonlarının oranı hacimce %30 olacak şekilde kullanılmıştır. En son K8 kodlu karışımda ise

her üç mineral katkı eşit oranlarda katılarak %45 oranında çimento ile yer değiştirilmiştir. ÇEYK üretimi için tasarlanan karışım özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** CEM I 42.5 R, UK, SD ve GYFC’nin kimyasal özellikleri

Bileşen (%)	CEM I 42.5 R	UK	SD	GYFC
SiO <sub>2</sub>	21,02	59,2	91,36	43,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,41	21,21	1,39	11,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,27	7,69	1,31	0,74
CaO	62,2	4,24	0,45	37,11
MgO	2,54	1,92	-	6,1
SO <sub>3</sub>	2,38	0,49	0,41	0,6
Kızdırma kaybı	2,19	1,78	3,11	0
Na <sub>2</sub> O	0,17	1,58	0,45	0,28
K <sub>2</sub> O	0,76	1,89	1,52	0,75
Özgül ağırlık	3,12	2,25	2,2	2,89
Blaine inceliği (cm <sup>2</sup> /g)	3250	2870	21080	5400

**Tablo 2.** ÇEYK Karışım Tasarımı

Malzeme	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
CEM I 42,5 R (%)	100	85	85	85	70	70	70	55
GYFC (%)	0	15	0	0	15	15	0	15
UK (%)	0	0	15	0	15	0	15	15
SD (%)	0	0	0	15	0	15	15	15

## 2.2. Deney Yöntemi

### 2.2.1. Eğilme Dayanımı

Üretilen ÇEYK karışımından 100x100x500 mm<sup>3</sup> boyutlarında prizmatik kiriş numuneler üretilmiş ve 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 28 gün su kürü uygulanmıştır. ASTM C1161-18 standardına göre dört noktadan eğilme testi uygulanmıştır.

### 2.2.2. Basınç Dayanımı

100x100x100 mm<sup>3</sup> boyutlarında üretilen küp numuneler 28 gün suda kür edildikten sonra numunelere ASTM C 39’a göre tek eksenli basınç testi uygulanmıştır.

### 2.2.3. Asit ve Sülfat Direnci

100x100x100 mm<sup>3</sup> ölçülerindeki küp numuneler %5 konsantrasyonda hazırlanan sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve sodyum sülfat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) çözeltilerinde 30 gün bekletildikten sonra 7 gün laboratuvar koşullarında kurumaya bırakılmıştır. Kurutulan numunelerin başlangıç durumuna göre dayanım ve ağırlık değişimleri oransal olarak belirlenmiştir.

#### 2.2.4. Karbonatlaşma Derinliği

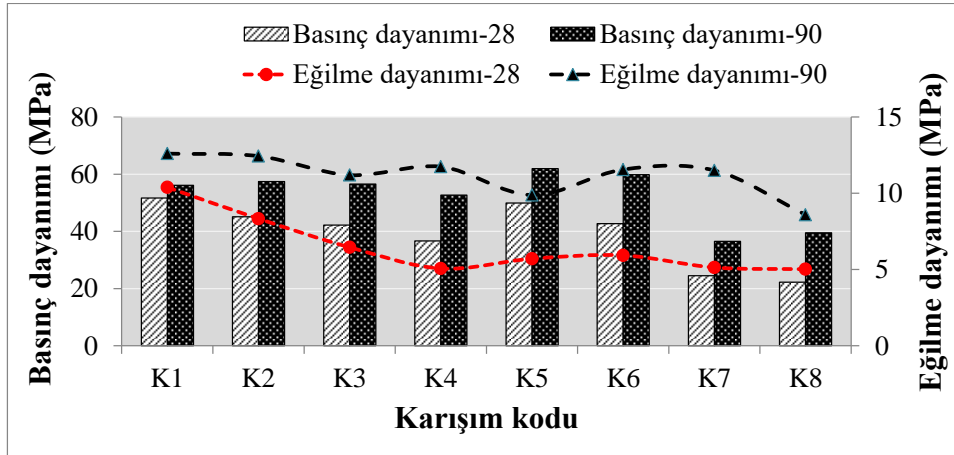
Betonun karbonatlaşma direncini belirlemek için kiriş parçalarından 60. ve 120. günde kesitler alınıp %1 derişimde hazırlanan Fenolftalein çözeltisi püskürtülerek (Verbeck, 1958) karbonatlaşma derinlikleri (KD) ölçülmüştür (EN 13295:2004).

### 3. Bulgular ve Tartışma

Her deney için 3'er adet numune test edilmiştir ve aralarındaki standart sapma miktarı %3'ü aşmayan sonuçların aritmetik ortalaması verilmiştir.

#### 3.1. Eğilme ve Basınç Dayanımı

Farklı oranlarda mineral katkı içeren ÇEYK numunelerin dört noktadan eğilme dayanımı ve basınç dayanımı sonuçları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ÇEYK numunelerin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ile eğilme dayanımları

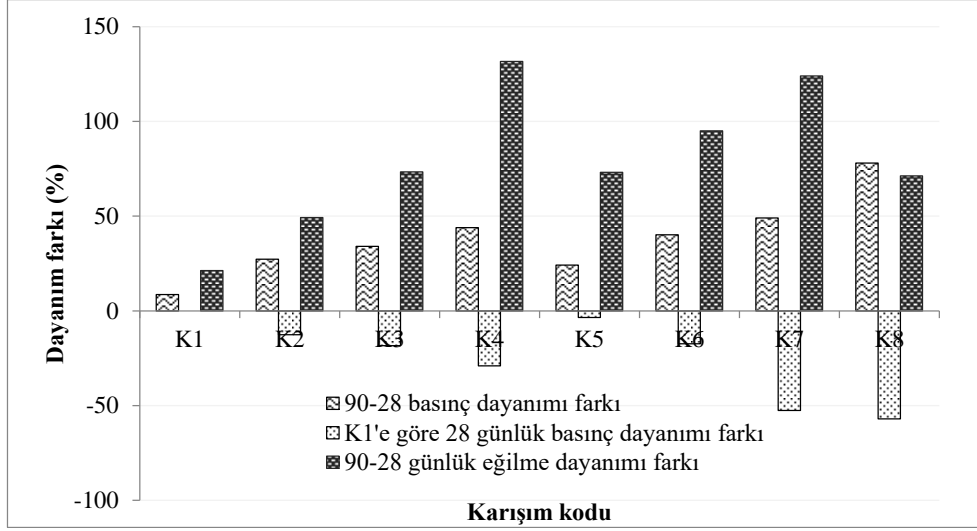
Numunelerin basınç dayanımı ile paralel olarak 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları Şekil 1'de gösterilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı ile eğilme dayanımı davranışı benzer eğilimdedir. Kontrol numunesi olan K1'in 28 günlük dört noktadan eğilme dayanımı 10,39 MPa iken 90 gün sonunda %12,6 MPa'ya yükselmiş ve % 21,24 oranında artış gerçekleşmiştir. %15 oranında GYFC, UK ve SD içeren K2, K3 ve K4 numunelerinin eğilme dayanımlarında 90 gün sonunda sırası ile %49, %73 ve %131 oranında artış meydana gelmiştir. Literatür çalışmalarında da UK, GYFC ve SD katkılı betonların zamanla mineral katkı miktarına bağlı olarak dayanımın artış gösterdiği ifade edilmiştir (Afroz ve ark, 2019; Bankir ve Sevim, 2020; Jiang ve ark, 2020). Tekli olarak kullanıldığında eğilme dayanımındaki artış en fazla SD eklendiği karışımda gözlenmiştir (Şekil 2). %30 oranında GYFC, UK ve SD içeren ikili kombinasyonlu karışımların (K5, K6 ve K7) eğilme dayanımları ise 28. güne göre sırası ile %73, %95 ve %124 artış göstermiştir (Şekil 2). UK ve SD ikili kombinasyonu (K7) ile eğilme dayanımı 5,13 MPa'dan 11,5 MPa'ya yükselmiş ve kontrol numunesinin eğilme dayanımına (12,6 MPa) çok yaklaşmıştır. ÇEYK numunelerinin eğilme dayanımı 90 gün sonunda K1 kontrol

numunesi ile kıyaslanabilir seviyelere ulaşmıştır. Buradan çimento yerine %30 oranında mineral katkı kullanılmasının yeşil mutabakat ve sürdürülebilir üretim açısından önemi anlaşılmaktadır. %45 oranında GYFC, UK ve SD içeren K8 karışımının eğilme dayanımı ise 5,02 MPa'dan 8,6 MPa'ya yükselmiştir. Ancak çimento azalma oranı %45 olması ile birlikte bu dayanım değeri azımsanmayacak kadar önemlidir.

Tüm numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri 90 günlük dayanım değerlerinden daha düşüktür. Mineral katkılardan en az birini içeren karışımlarla üretilen numunelerin tamamının 28 günlük basınç dayanımı K1'den düşüktür. Bu durumun nedeni çimentonun mineral katkılar ile kısmen yer değiştirmesi ile erken yaşlardaki hidratasyon hızının ve ısısının etkili bir şekilde azalmasıdır (Zhang ve ark, 2020). Mineral katkılarının çimento ile ikame oranı arttıkça bu dayanım kaybı oranı artış göstermiş ve K8 numunesinde bu oran %57'ye ulaşmıştır (Şekil 2). Yani K8 numunesinin basınç dayanımı K1 numunesinden %57 daha düşüktür. Yapılan bir araştırmada bu durumun nedeni %50 oranında katkı malzemesi içeren harç karışımında mikro çatlak oluşumu ve yüksek su emme değerlerinin ana nedeni olarak kabul edilebilecek daha büyük boşlukların meydana geldiği şeklinde açıklanmıştır. Bu boşlukların varlığı ile dayanımın azalması doğrudan ilişkilendirilmiştir (Ramezianpour ve Moeini, 2018). Ayrıca, sınırlı miktarda atıl malzemenin katkı olarak kullanılması gözeneklerin küçülmesine yol açabilirken, ikame oranının arttırılması ile mikroyapısal özelliklerin bozulduğunu ifade eden çalışmalar da mevcuttur (Sadique ve Al- Nageim, 2012).

K1'e alternatif olarak K5 numunesi gösterilebilir. Basınç dayanımları birbirine çok yakın olmasına karşın içerikleri incelendiğinde K5 numunelerinde %15 GYFC+ %15 UK bulunmaktadır. Çimento miktarının %30 oranında azaltılması neticesinde K1 ile K5 numunelerinin basınç dayanımları çok yakındır. Hatta K5'in 90 günlük basınç dayanımı K1'den %10 daha yüksektir. Bu durumda atıl malzemelerin stok sorunlarının çözülmesinin ve değerlendirilmesinin yanı sıra yeşil mutabakatı destekleyen ve ekonomik üretimler mümkün olabilecektir. Nitekim yapılan çalışmalarda geri dönüşüm sayesinde hammadde tüketiminin azalacağı ve doğal kaynakların korunabilmesi ile ülke ekonomisine katkı sağlanabileceği ifade edilmiştir (Aydın, 2015).

Hiç mineral katkı içermeyen K1 numunesinin basınç dayanımı 90 gün içerisinde 28 günlük değere göre %8,6 artış gösterirken %45 oranında mineral katkı içeren K8 numunesinin basınç dayanımı %78 artış göstermiştir (Şekil 2). Yani, karışım bünyesinde bulunan mineral katkı oranı arttıkça 28 günlük basınç dayanımı azalmış ve 90. güne kadar basınç dayanımı kazanma oranı artmıştır.

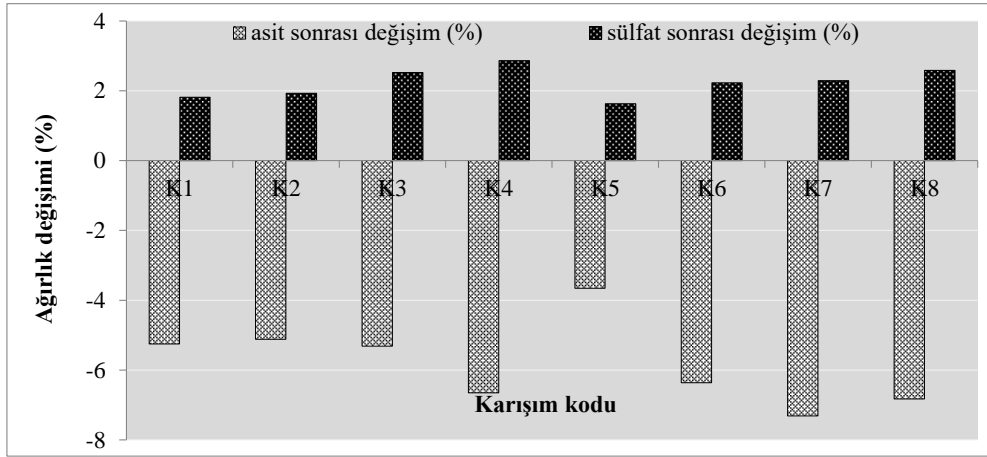


Şekil 2. Kontrol numunesine (K1) ve zamana göre dayanım değişim oranları

### 3.2. Asit ve Sülfat Direnci

$H_2SO_4$  ve  $Na_2SO_4$  çözeltilerinde 30 gün bekletildikten sonra kurutulan numunelerin ağırlık değişimleri asit ve sülfat atağına maruz bırakılmadan önceki duruma göre belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 3'den görüleceği üzere asit atağına maruz kalan numunelerde ağırlık kaybı gözlenirken sülfat atağına maruz kalan numunelerde ağırlık artışı meydana gelmiştir. Sülfat saldırısı esnasında sülfat iyonu, çimento esaslı kompozitlere nüfuz eder ve kalsiyum hidroksit gibi çimento hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girer. Tepkimeler sonucunda etrenjit ve alçıtaşı gibi zararlı ürünlerin oluşması ile çimento esaslı kompozitler aşınır, genişler ve çatlaklar oluşur (Chen ve ark, 2016). Bu süreç devam ederken, kurumuş yüzeylerdeki gözeneklerde sülfat tuzları kristalleşir, kompozit yüzeyinde hasar meydana gelir. Hem fiziksel hem de kimyasal sülfat atağının bir sonucu olarak, anhidrat sodyum sülfat, %314 hacimsel genişleme ile hidrat formuna dönüşür (Tekin, 2010; Haynes ve Bassuoni, 2011) ve böylece ağırlık artışı gözlenir. %15 oranında sırası ile GYFC ve UK içeren K2 ve K3 numunelerinin asit atağı karşısında ağırlık kaybı K1 kontrol numunesi ile benzerlik göstermiştir (Şekil 3). K1 numunesinin asit atağından sonraki ağırlık kaybı %5,25 iken K5 numunesinde %3,66'dır. Ağırlık kaybı en az %15 GYFC + %15 UK içeren K5 numunesinde meydana gelmiştir. Sülfat atağı sonrasında K1 kontrol numunesinin ağırlık kaybı %1,81 iken ağırlıkça %15 oranında GYFC, UK ve SD içeren K2, K3 ve K4 numunelerinin ağırlık kaybı oranları sırası ile %1,93, %2,52 ve %2,86'dır. Tekli olarak çimento ikamesi yapılan bu mineral katkılardan sülfat atağına karşı ağırlık kaybına en dirençli olan asit atağında olduğu gibi GYFC'dir. Bunun nedeni erken yaşlarda UK'nın reaktivitesinin GYFC'den çok daha düşük olmasıdır (Zhang ve ark, 2021). GYFC katkısı ile asit atağına karşı UK ve SD'ye nazaran daha dirençli betonların üretilmiştir (Elyamani, 2020). Bu durumun nedeni olarak GYFC kullanımı ile oluşan gözeneklerin daha küçük olması neticesinde olumsuz çevresel koşullara maruz kaldığında beton bileşenlerinin dayanıklılığının artması gösterilmiştir (Hwang ve Lin, 1986). Ayrıca, çimento hidratasyonunun bir yan ürünü olarak kabul

edilen ve betonun dayanım kazanma sürecine katkıda bulunmayan  $\text{Ca(OH)}_2$ , daha fazla kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli oluşturmak ve sertleşmeyi iyileştirmek için su ve GYFC ile reaksiyona girebilir (Elyamani ve ark, 2020). Puzolanik reaksiyonların doğası gereği, çimento ikame malzemelerinin kullanılması, kireç içeriğinde azalmaya neden olur ve beton geçirgenliğini artırır. Bu nedenle, doğal puzolanlar ve GYFC gibi mineral katkı malzemelerinin kullanılması, sülfürik aside maruz kalan ortamlarda beton dayanıklılığını iyileştirebilir (Sabzi ve ark., 2021). İkili kombinasyonlar şeklinde çimento ile ikame edilen mineral katkıların etkisine bakılırsa GYFC ve UK'nin birlikte kullanımı ile çimento oranı %30 azaltılmış ve sülfat atağına karşı ağırlığı koruma direnci artmıştır (Şekil 3, K5 numunesi). Ağırlık değişim oranları karşılaştırıldığında asit ortamında bekletilen numunelerde meydana gelen ağırlık değişim oranı sülfat ortamında bekletilenlere göre daha yüksektir. Asit içeren ortamların betonun bütünlüğünü bozan ve hasar oranını sülfatlı ortamlara göre daha çok artıran ortamlar olduğu belirlenmiştir.



**Şekil 3.** Asit ve sülfat atağından sonra meydana gelen ağırlık değişimi

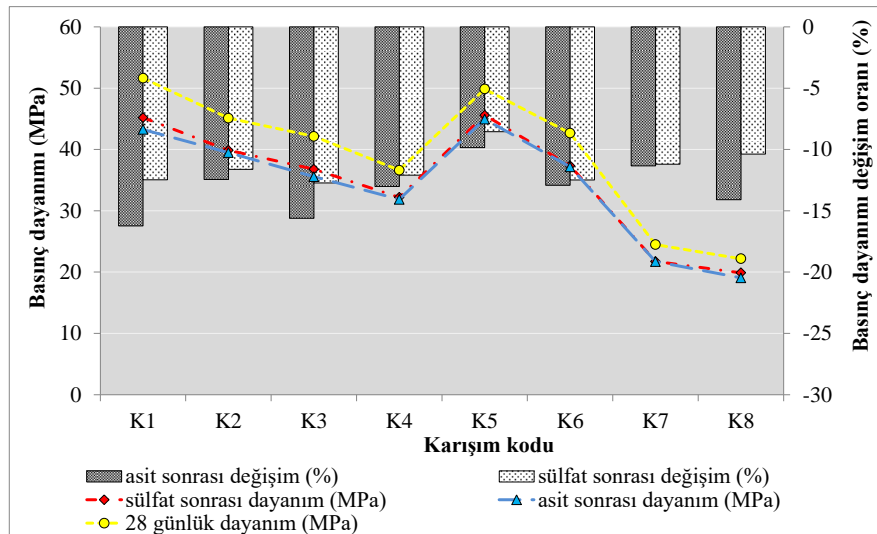
Asit atağından sonra numunelerin basınç dayanım kaybı oranları ağırlık kaybı oranları ile benzer eğilimde olmuştur. K1 kontrol numunesinin basınç dayanımı %16,2 iken %15 GYFC içeren K2 numunesinde %12,5 ve %15 GYFC+ %15 UK içeren K5 numunesinde %9,8'dir (Şekil 4). ÇEYK numuneler asit atağına maruz kaldığı andan itibaren asit parçacıkları kompozit numune içine girmeye çalışır ve zamanla çimento çözülmeye başlar. pH seviyesi 10.6'nın altına inmeye başladığında etrenjit bozunmaya başlar ve alüminyum hidroksite ayrılarak betonda alçı oluşumları meydana gelir. Etrenjitin genişmesi ile birlikte içsel lokal gerilmeler meydana gelir. Bu döngü devam ederken hacmi alçıdan 7 kat daha fazla olan etrenjit, pH değeri düştüğünde,  $\text{Ca(OH)}_2$  ve kalsiyum alüminat hidratın çözünmesiyle oluşur. Son olarak asit infiltrasyonu başlar ve betonda kabarma ve boşluklar meydana gelir. Kalsiyum silikat hidrat jelleri (C-S-H) sülfürik asidin etkisinden dolayı ağırlık ve mukavemet kaybına neden olur ve hatta parçalanma ile sonuçlanabilir (Hadigheh ve ark, 2017; Bankir ve Sevim, 2020). K1 numunesinin asit atağına maruz kalmadan önceki basınç dayanımı 51,6 MPa iken asit atağı sonrasında 43,3 MPa'dır. Dayanım kaybı oranı en az olan K5 numunesinin asit atağından önceki ve sonraki dayanımları ise sırası ile 49,9 MPa ve 45 MPa'dır. Yani asit etkisinden sonraki dayanım değeri



kontrol numunesinden daha yüksektir. Buradan anlaşılacağı üzere GYFC ve UK katkısı asit ortamında numunelerin dayanıklılığını çimentoya göre daha fazla artırmıştır. Yapılan bir çalışmada UK miktarının %22 olması durumunda ağırlık kaybının %11,3'ü aşmadığı ifade edilmiştir (Bankir ve Sevim, 2020). Başka bir çalışmada cüruf içeren geopolimer betonların kontrol numunesine göre %4 daha az hasar aldığı belirtilmiştir (Jena ve Panigrahi, 2021).

Sülfat atağına maruz kalan tüm numunelerin de basınç dayanımında azalma meydana gelmiş ancak hasar seviyesi asit atağındaki kadar fazla olmamıştır (Şekil 4). Sülfatlı ortamda bekletilen numunelerin basınç dayanımları ve dayanımdaki azalma miktarı 28 günlük değerlerle ve asit atağı sonrasındaki dayanım değerleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4'de gösterilmiştir. K1 kontrol numunesinin sülfat atağından sonraki dayanım değişim oranı %12,5 iken %45 oranında mineral katkı ikamesi yapılan K8 numunesinin basınç dayanımı değişimi %10,4 olmuştur. K1 ve K5 numunelerinin nihai dayanım değerlerinin neredeyse aynı olduğu (sırasıyla 45,2 ve 45,6 MPa) görülmüştür. K5 içeriğinde bulunan %15 GYFC ve %15 UK ikili kombinasyonu asit atağına olduğu gibi sülfat atağı karşısında da betonun durabilitesini iyileştirici etki göstermiştir. Üstelik tekli kullanımları ile azaltılan dayanım kaybının çok daha azaldığı belirlenmiştir. Çimento miktarının %30 oranında azaltılması ile kontrol numunesi ile aynı dayanıma sahip olması, betonun dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sunmasının yanı sıra doğaya bırakılan atıl malzemelerin değerlendirilmesi ile yeşil mutabakat dostu betonlar üretilebilmiştir.

Her üç mineral katkının tekli ve ikili kombinasyonlarının basınç dayanımı ve ağırlık değişimine olan etkileri göz önüne alındığında asit ve sülfat atağına karşı en dirençli olan mineral katkının GYFC + UK olduğu anlaşılmıştır. Mineral katkıları tekli olarak çimento ile ikame edildiğinde ise asit ve sülfat atağına karşı GYFC'nin UK ve SD'den daha dirençli olduğu tespit edilmiştir.

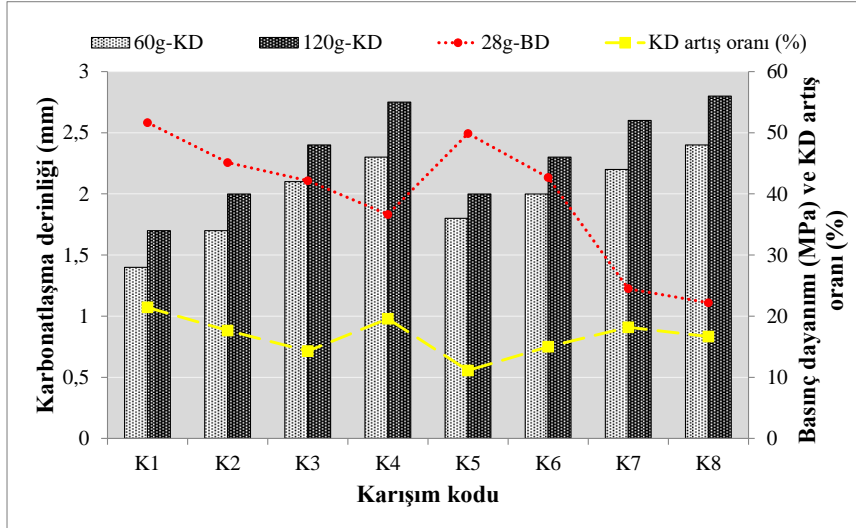


Şekil 4. Asit ve sülfat atağından sonra meydana gelen basınç dayanımı değişimi

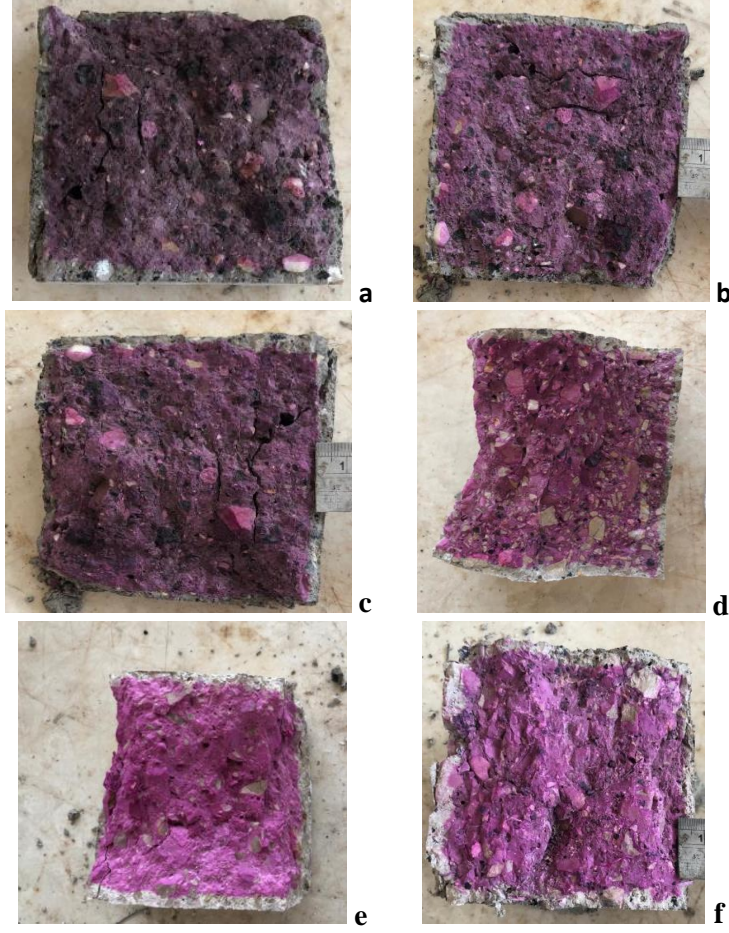
### 3.3. Karbonatlaşma Derinliği

Üç farklı mineral katkının tekli, ikili ve üçlü kombinasyonunun çimento yerine kullanılması ile üretilen ÇEYK numunelerinin 60 ve 120 günlük KD ve 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi Şekil 5'de

gösterilmiştir. Basınç dayanımı yüksek olan numunelerin KD değerlerinin düşük, basınç dayanımı düşük olan numunelerin KD değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan araştırmalarda da bu bulguyu destekler ifadelerle rastlanmıştır (Kara ve Yazıcıoğlu, 2016; Horoz, 2020). KD zamanla meydana gelen ve 120. gün sonunda numunelerde ölçülen KD miktarı 60. güne göre artış göstermiştir. 60. ve 120. gün sonunda K1 ile K5 numunelerinde neredeyse aynı oranda karbonatlaşma meydana gelmiştir. K1'in içeriğinde hiç mineral katkı bulunmuyorken K5 numunesinde %30 oranında GYFC ve UK karışımı bulunmaktadır. Yani çimento miktarının %30 oranında az olması ile KD arasında ciddi fark oluşmamıştır. GYFC ve UK içeren K2 ve K3 kodlu numunelerin KD değerleri yine GYFC ve UK'nin ikili kombinasyonlarını içeren K5 ve K6 numuneleri ile yakın değerlerdedir. Buradan GYFC ve UK'nin karbonatlaşmayı azaltıcı etkisinin olduğu anlaşılmaktadır. GYFC katkısı puzolanik reaktivitesi nedeniyle betondaki CH içeriğini azaltma eğilimindedir (Saillio ve ark, 2019). SD eklenen numunelerin KD, GYFC ve UK katkılı numunelere kıyasla daha fazla ölçülmüştür. Hatta SD katkılı K4, K7 ve K8 numunelerinin KD'leri kontrol numunesine göre sırası ile %64, %57 ve %71 daha fazladır. KD'nin ilk ölçümünden 60 gün sonra KD artış oranı (%) Şekil 5'de gösterilmiştir. 60 günde KD değeri artış oranı K1 numunesinde %21,4; K5 numunesinde %11,1 ve K8 numunesinde %16,7'dir. K1, K5 ve K8'in 60 ve 120 günlük KD görüntüleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Başlangıçtaki KD'ye göre K1'den sonra en fazla artış %15 SD içeren K4'tedir (%19,6).



Şekil 5. Zamana bağlı karbonatlaşma derinliği ve 28 günlük basınç dayanımları



**Şekil 6.** ÇEYK numunelerin 60 ve 120 günlük karbonatlaşma derinlikleri a) K1-60 gün b) K1-120 gün c) K5-60 gün d) K5-120 gün e) K8-60 gün f) K8-120 gün

#### 4. Sonuç

Global dünya gereksinimleri olarak doğayı korumak ve ekonomik dengeyi sağlamak tüm sektörler için kaçınılmaz olmuştur. Beton üretiminde çokça kullanılan ve üretimi esnasında çevreye zarar veren malzemelerin kullanımının azalması Avrupa Yeşil Mutabakatı çerçevesinde elzem hale gelmiştir. Diğer yandan çokça açığa çıkan GYFC, UK ve SD gibi katma değeri olan atıl malzemelerin geri dönüşümü veya bertarafı gerekmektedir. Bu nedenlerden ötürü bu çalışma kapsamında literatür çalışmalarından farklı olarak çimentonun %15 GYFC, %15 SD ve %15 UK kombinasyonlarının ikame yoluyla azaltılması amaçlanmıştır. Çimento esaslı kompozitlerin servis ömürleri boyunca maruz kalabileceği çevresel şartların etkisinde kompozit numunelerin 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımının yanı sıra asit, sülfat ve karbonatlaşma direnci belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular şöyledir:

- Mineral katkı türüne bakılmaksızın tüm numunelerin eğilme dayanımları 28 günden 90 güne kadar artış göstermiştir. GYFC, UK ve SD'nin ikili kombinasyonları ile üretilen numunelerin eğilme dayanımlarında %124'e varan artış meydana gelmiştir. %30 oranında çimento miktarının azalması durumunda bile 90 gün sonunda kontrol numunesinden daha yüksek eğilme dayanımına ulaşılmıştır.

- Tüm numunelerin basınç dayanımları 28 günden 90 güne kadar artış göstermiştir. %15 GYFC + %15 UK içeren K5 numunesinin 28 günlük basınç dayanımları birbirine çok yakın iken 90 günlük basınç dayanımı kontrol numunesine göre %10,3 daha yüksektir. Mineral katkıların basınç dayanımının zamana bağlı olarak artmasına katkı sağlamıştır.
- Asit etkisinde kalan numunelerde ağırlık kaybı, sülfat etkisinde kalan numunelerde ağırlık artışı meydana gelmiştir. Ancak her iki durumda basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. ÇEYK numunelerin GYFC ve UK ikili kombinasyonunun çimento ile %30 ikamesi neticesinde hem asit hem de sülfat atağına karşı mevcut ağırlığını koruma kararlılığı artmıştır. Asit atağında bekletilen numunelerde meydana gelen ağırlık değişim oranı sülfat atağındaki numunelere göre daha fazladır. Yani asit içeren ortamlar çimentolu kompozitler için daha hasar vericidir.
- Çimento miktarının %30 oranında azaltılması ile kontrol numunesi ile aynı dayanıma sahip olması, betonun dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sunmasının yanı sıra doğaya bırakılan atıl malzemelerin değerlendirilmesi ile yeşil mutabakat dostu betonlar üretilebilmiştir.
- Her üç mineral katkının tekli ve ikili kombinasyonlarının basınç dayanımı ve ağırlık değişimine olan etkileri göz önüne alındığında asit ve sülfat atağına karşı en dirençli olan mineral katkının GYFC + UK olduğu anlaşılmıştır. Mineral katkıların tekli olarak çimento ile ikame edildiğinde ise asit ve sülfat atağına karşı GYFC'nin UK ve SD'den daha dirençli olduğu tespit edilmiştir.
- GYFC ve UK içeren numunelerin KD değerleri yine GYFC ve UK'nin ikili kombinasyonlarını içeren numunelerinki ile yakın değerlerdedir. GYFC ve UK'nin karbonatlaşmayı azaltıcı etkisini vardır.
- Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda çevrenin korunması, sürdürülebilir üretimlerin yapılabilmesi ve betonların servis ömrünün uzatılması için bu katkı malzemelerinin daha yüksek oranda kullanılabilirliğinin araştırılması gerekmektedir. Ayrıca, durabilite performansını geliştirebilecek özellikte olan ve kullanım alanı bulmayı bekleyen, farklı sektörlerde açığa çıkan yan ürünler değerlendirilmelidir. Sanayi iş birliği ile büyük ölçekte üretimler ile teşvik edici uygulamalara gidilmelidir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Herhangi bir çıkar çatışması veya çakışması yoktur.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazar makaleye %100 oranında katkı sağlamıştır.

## **Kaynakça**

- Afroz M., Venkatesan S., Patnaikuni I. Effects of hybrid fibers on the development of high volume fly ash cement composite. *Construction and Building Materials* 2019; 215: 984-999.
- Ahmad W., Ahmad A., Ostrowski KA., Aslam F., Joyklad P., A scientometric review of waste material utilization in concrete for sustainable construction. *Case Studies in Construction Materials* 2021; 15: e00683.
- ASTM C 39. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standards*, 1994.
- ASTM Standard C1161-18. Standard test method for flexural strength of advanced ceramics at ambient temperature. West Conshohocken, PA, USA.
- Aydın P. Lastik atığın kompozit yapımında değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, 2015, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Aygörmez Y., Canpolat O. Long-term sulfuric and hydrochloric acid resistance of silica fume and colemanite waste reinforced metakaolin-based geopolymers. *Revista de la Construcción* 2021; 20(2): 291-307.
- Bankir MB., Sevim UK., Performance optimization of hybrid fiber concrete according to mechanical properties. *Construction and Building Materials* 2020; 261: 119952.
- Bankir MB., Sevim UK., Performance optimization of hybrid fiber concretes against acid and sulfate attack. *Journal of Building Engineering* 2020; (32): 101443.
- Chen Y., Gao J., Tang L., Li X. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials* 2016; 106: 650-658.
- Chen JJ., Ng PL., Chu SH., Guan GX., Kwan AKH. Ternary blending with metakaolin and silica fume to improve packing density and performance of binder paste. *Construction and Building Materials* 2020; 252: 119031.
- Elyamany HE., Abd Elmoaty M., Diab ARA. Sulphuric acid resistance of slag geopolymer concrete modified with fly ash and silica fume. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 2020; 1-19.
- EN 13295. Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of resistance to carbonation. 2004.
- Gupta S. Effect of content and fineness of slag as high volume cement replacement on strength and durability of ultra-high performance mortar. *Journal of Building Materials and Structures* 2016; 3(2): 43-54.
- Gupta A., Gupta N., Saxena KK. Experimental study of the mechanical and durability properties of slag and calcined clay based geopolymer composite. *Advances in Materials and Processing Technologies* 2021; 1-15.
- Gürsel AP., Meral Ç. Türkiye’de çimento üretiminin karşılaştırmalı yaşam döngüsü analizi. 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü 2012; 1-13.

- Hadigheh SA., Gravina RJ., Smith ST. Effect of acid attack on FRP-to-concrete bonded interfaces. *Construction and Building Materials* 2017; 152: 285-303.
- Haynes H., Bassuoni MT. Physical salt attack on concrete. *Concrete International* 2011; 33(11): 38-42.
- Horoz A. Şanlıurfa yöresinde bulunan kalker ocaklarında atıl durumdaki elenmiş malzemelerin (Taş unu) taze ve sertleşmiş betona etkisi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2020.
- Hossain MU., Dong Y., Ng ST. Influence of supplementary cementitious materials in sustainability performance of concrete industry: A case study in Hong Kong. *Case Studies in Construction Materials* 2021; 15: e00659.
- Hsu S., Chi M., Huang R. Effect of fineness and replacement ratio of ground fly ash on properties of blended cement mortar. *Construction and Building Materials* 2018; 176: 250-258.
- Hwang CL., Lin CY. Strength development of blended blast-furnace slag-cement mortars. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 1986; 9(3): 233-239.
- Jena S., Panigrahi R. Evaluation of durability and microstructural properties of geopolymer concrete with ferrochrome slag as coarse aggregate. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering* 2021; 1-10.
- Jeong Y., Kang SH., Kim MO., Moon J. Acceleration of cement hydration from supplementary cementitious materials: Performance comparison between silica fume and hydrophobic silica. *Cement and Concrete Composites* 2020; 112: 103688.
- Jiang H., Yi H., Yilmaz E., Liu S., Qiu J. Ultrasonic evaluation of strength properties of cemented paste backfill: effects of mineral admixture and curing temperature. *Ultrasonics* 2020; 100: 105983.
- Kara C., Yazicioglu S. Mermer tozu atığı ve silis dumanının betonun karbonatlaşma özelliğine etkisi. *Journal of Science* 2016; 5(2): 191-202.
- Kumar S., Mucsi G., Kristály F., Pekker P. Mechanical activation of fly ash and its influence on micro and nano-structural behaviour of resulting geopolymers. *Advanced Powder Technology* 2017; 28(3): 805-813.
- Kumar R., Goyal S., Srivastava A. A comprehensive study on the influence of supplementary cementitious materials on physico-mechanical, microstructural and durability properties of low carbon cement composites. *Powder Technology* 2021; 394: 645-668.
- Malhotra VM. Reducing CO<sub>2</sub> emissions. *Concrete International* 2006; 28(9): 42-45.
- Mironyuk I., Tatarchuk T., Paliychuk N., Heviuk I., Horpynko A., Yarema O., Mykytyn I. Effect of surface-modified fly ash on compressive strength of cement mortar. *Materials Today: Proceedings* 2019; 35: 534-537.
- Ramezaniapour AA., Moeini MA. Mechanical and durability properties of alkali activated slag coating mortars containing nanosilica and silica fume. *Construction and Building Materials* 2018; 163: 611-621.

- Reynolds S. The future of ferrous slag,. Market Forecasts to 2020. Pira International Ltd., Cleeve Road, Surrey KT227RU, Leatherhead, UK, 2009.
- Sabzi J., Asadi Shamsabadi E., Ghalehnovi M., Hadigheh SA., Khodabakhshian A., Brito JD. Mechanical and durability properties of mortars incorporating red mud, ground granulated blast furnace slag, and electric arc furnace dust. *Applied Sciences* 2021; 11(9): 4110.
- Sadique M., Al-Nageim H. Hydration kinetics of a low carbon cementitious material produced by physico-chemical activation of high calcium fly ash. *Journal of Advanced Concrete Technology* 2012; 10(8): 254-263.
- Sailio M., Baroghel-Bouny V., Bertin M., Pradelle S., Vincent J. Phase assemblage of cement pastes with SCM at different ages. *Construction and Building Materials* 2019; 224: 144-157.
- Sezer Gİ. Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars. *Construction and Building Materials* 2012; 26(1): 613-618.
- Şahin G., Önder HG. Atık yönetimi, sera gazı emisyonları ve Türkiye: Avrupa yeşil mutabakatı çerçevesinde bir değerlendirme. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi* 2021; 9(112): 194-216.
- Tekin İ. Sülfat etkisine maruz farklı çimento harçlarındaki makro boşluk yapısı gelişiminin bilgisayarlı tomografi yöntemi ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* 2010.
- Verbeck G. Carbonation of hydrated Portland cement. *ASTM International* 1958; 17-36.
- Zhang S., Yang L., Ren F., Qiu J., Ding H. Rheological and mechanical properties of cemented foam backfill: Effect of mineral admixture type and dosage. *Cement and Concrete Composites* 2020; 112: 103689.
- Zhang T., Ma B., Jiang D., Jiang Q., Jin Z. Comparative research on the effect of various mineral admixtures on the early hydration process of cement. *Construction and Building Materials* 2021; 301: 124372.