

Atf İçin: Aksakal, E., Çelik, Z. ve Bingöl, A.F. (2023). Farklı Konsantrasyonlarda Sodyum Sülfata Maruz Kalan Silis Dumanı İçerikli Betonların Sülfat Direncinin İncelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(4), 2706-2716.

To Cite: Aksakal, E., Çelik, Z. & Bingöl, A.F. (2023). Investigation of Sulphate Resistance of Concretes Containing Silica Fume Exposed to Sodium Sulphate at Different Concentrations. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(4), 2706-2716.

Farklı Konsantrasyonlarda Sodyum Sülfata Maruz Kalan Silis Dumanı İçerikli Betonların Sülfat Direncinin İncelenmesi

Emrah AKSAKAL¹, Zinnur ÇELİK^{2*}, Ahmet Ferhat BİNGÖL³

Öne Çıkanlar:

- Sülfat
- Basınç dayanım kaybı
- Durabilite

Anahtar Kelimeler:

- Na₂SO₄
- Sülfat direnci
- Silis dumanı
- Konsantrasyon
- Genleşme oranı

ÖZET:

Bu çalışmada, farklı ikame seviyelerinde silis dumanı (SD) içeren betonların sodyum sülfat çözeltisine maruz kaldıktan sonraki özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, çimento ağırlığına göre %5, %10 ve %15 oranında SD kullanılmıştır. Karışımlar %3, %5 ve %10 konsantrasyona sahip Na₂SO₄ çözeltisinde 30, 60, 90 ve 120 günlük periyotlarda bekletilmiştir. Tüm karışımların çözeltiye maruz kalma sonrası basınç dayanım kayıpları ve genleşme oranları tespit edilmiştir. Ayrıca karışımların taze beton özelliği olarak çökme değerleri ölçülmüştür. Özellikle SD ilaveli karışımların çökme değerlerinin azalmaması için süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Böylelikle SD ilaveli karışımların çökme değerlerinde kayda değer düşüşler meydana gelmemiştir. Test sonuçları, SD varlığının, sodyum sülfat etkisinden kaynaklanan dayanım kaybı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Sodyum sülfat saldırısına karşı en iyi direnç, %15'lik SD ikamesi ile elde edilmiş olup; 120 günlük periyotta ve tüm konsantrasyon oranlarında %3 ile %8 arasında dayanım kaybı tespit edilmiştir. Özellikle %3 konsantrasyonlu çözeltiye maruz bırakılan numunelerin erken yaşlarda (30 ve 60.gün) dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Bu durum, gözenek boşluklarının genişleyen ürünler tarafından doldurulmasına ve harç matrisinin yoğunlaştırılmasına bağlanabilir. %10 konsantrasyona sahip çözeltide bekletilen kontrol numunesinin bağıl artık basınç dayanımı %94 ile %77.95 aralığında değişirken, SD-15 numunesi için bu değerler %100.31 ile %92.35 aralığında elde edilmiştir. Ayrıca Na₂SO₄ çözeltisine maruz kalan numunelerin genleşme oranları, basınç dayanımı sonuçları ile benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir.

Investigation of Sulphate Resistance of Concretes Containing Silica Fume Exposed to Sodium Sulphate at Different Concentrations

Highlights:

- Sulfate
- Compressive strength loss
- Durability

Keywords:

- Na₂SO₄
- Sulfate resistance
- Silica fume
- Concentration
- Expansion value

ABSTRACT:

In this study, the properties of concretes containing silica fume (SF) at different substitution levels after exposure to sodium sulfate solution were investigated. For this purpose, 5%, 10% and 15% SF were used according to the cement weight. The mixtures were kept in Na₂SO₄ solution with 3%, 5% and 10% concentrations for 30, 60, 90 and 120 day periods. Compressive strength losses and expansion ratios of all mixtures after exposure to solution were determined. In addition, the slump values of the mixtures as fresh concrete properties were also measured. A superplasticizer was used especially in order not to decrease the slump values of SF added mixtures. Thus, there was no significant decrease in the slump values of the SF-added mixtures. The test results showed that the presence of SF had a positive effect on the strength loss caused by the sodium sulfate effect. The best resistance to sodium sulfate attack was obtained with 15% SF substitution; A strength loss of 3% to 8% was detected in a 120-day period and at all concentrations. In particular, the strength of the samples exposed to 3% concentrated solution increased at early ages (30 and 60 days). This can be attributed to the filling of the pore spaces by the expanding products and the thickening of the mortar matrix. While the relative residual compressive strength of the control sample kept in 10% concentration solution ranged between 94% and 77.95%, these values were obtained between 100.31% and 92.35% for the SD-15 sample. In addition, it was observed that the expansion values of the samples exposed to the Na₂SO₄ solution were similar to the compressive strength results.

¹Emrah AKSAKAL ([Orcid ID: 0009-0005-4924-5169](https://orcid.org/0009-0005-4924-5169)), Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye

²Zinnur ÇELİK ([Orcid ID: 0000-0001-7298-7367](https://orcid.org/0000-0001-7298-7367)), Atatürk Üniversitesi, Pasinler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojileri Bölümü, Erzurum, Türkiye

³Ahmet Ferhat BİNGÖL ([Orcid ID: 0000-0002-8798-8343](https://orcid.org/0000-0002-8798-8343)), Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

***Sorumlu Yazar/Corresponding Author:** Zinnur ÇELİK, e-mail: zinnur.celik@atauni.edu.tr

Bu çalışma Emrah AKSAKAL'ın Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

GİRİŞ

Sülfat iyonları ile çimentonun hidratasyon ürünleri arasında meydana gelen ve hasarlara neden olan bir reaksiyon olarak tanımlanabilecek dış sülfat saldırısı (DSS), agresif bir ortamda beton dayanıklılığı için gerçek bir tehdittir. Sülfat iyonları yer altı sularında, deniz sularında, topraklarda ve atık sularda bulunur (Figg, 1999; El-Hachem ve ark., 2012). Dış sülfat saldırısı (DSS), sülfat ortamlarına maruz kalan hidrolik yapılar ve kıyı binaları gibi beton yapıların dayanıklılığını etkileyen önemli faktörlerdendir. Sülfat saldırısına maruz kalan çimentolu ürünlerin bozulma süreçleri dört ana kategoriye ayrılabilir: taşıma süreci, kimyasal reaksiyonlar, genişleme kuvvetleri ve mekanik tepkiler (Ikumi ve Segura, 2019; Wang ve ark., 2021). Sülfat saldırısı, dış ortamdan taşınan sülfat iyonlarının çimento içerisindeki bazı bileşenlerle reaksiyona girerek birincil olarak etrenjit ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) ve ikincil olarak jips ($\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oluşturmasından kaynaklanan ve beton içerisinde önemli mekanik hasara yol açabilen bir olaydır (Planel, 2006). Bu oluşumlardan etrenjit, katı hacim artışına neden olarak genişleme ve çatlamaya, jips ise betonun kütle ve mukavemet kaybına yol açabilir (Brown ve Badger, 2000; Wang ve ark., 2017). Bu durumun sıklıkla tekrarı, betonun zayıflamasına ve agrega taneleri ile çimento matrisinin ayrışmasına neden olan yıkıcı genişleme ve çatlaklar meydana getirir (Santhanam ve ark., 2003; Liu ve ark., 2012). Betonun sülfatlara direnme kabiliyeti, geçirgenliği, su/çimento oranı, çimento tipi ve maruz kalma şartları gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik gösterir (Skalny ve Pierce, 1999; Şahmaran ve ark., 2007).

Uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD) ve metakaolin (MK) gibi mineral katkı malzemeleri genellikle betonun işlenebilirlik, mekanik ve sülfat saldırısı gibi agresif ortamlara karşı dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek için betona dahil edilir. Mineral katkı malzemesi olarak silis dumanı (SD) kullanımı, portlanditin güçlü puzolanik reaksiyon yoluyla ikincil C-S-H jeline dönüştürülmesi nedeniyle sülfat ortamına maruz kalan harç numunelerinin direncini arttırmaktadır. Ayrıca ince parçacık boyutundan dolayı SD'nin doldurucu etkisi, sodyum sülfat çözeltisinden kaynaklanan sülfat iyonlarının harç içerisine nüfuz etmesine ve difüzyonuna kolayca izin vermez (Lee ve ark., 2005).

Lee ve ark. (2005) çalışmalarında, %5, %10 ve %15 oranlarında SD'yi çimento yerine ikame ederek, 0.45 su/çimento oranında hazırladıkları harç numunelerini sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakarak belirli günlerde basınç dayanımı kayıplarını tespit etmişlerdir. Çalışmada referans numunenin 180 gün sodyum sülfat çözeltisinde bekletildikten sonra basınç dayanımında %14.01 azalma meydana gelmiştir. Bu durum, %5, %10 ve %15 SD kullanılan numunelerde sırasıyla %3.63, %0.57 ve %1.29 olarak hesaplanmıştır. Lv ve ark. (2022), çimento harcına UK, SD ve YFC ilave ederek harçların uzun süreli sülfat direncini araştırmışlardır. Çalışmada SD'li karışımın, UK ve YFC'ye göre yüksek sülfat direnci sergilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, 36 aylık sodyum sülfat çözeltisine maruz kalmanın ardından %3 SD kullanılan karışımın artık basınç ve eğilme dayanımı sırasıyla %71.6 ve %76.2 olarak elde edilmiştir. Bu çalışmaların aksine, Hekal ve ark. (2002), portland çimentosunun kısmen silis dumanı (%10-15) ile değiştirilmesinin, sertleştirilmiş çimento hamurunun sülfat direncinde önemli bir iyileşme göstermediğini bildirmişlerdir.

Sülfat atağına maruz kalan harç ve beton numunelerin dirençlerinin belirlenmesindeki en önemli parametrelerden biri genişleme yüzdeleridir. Aghabaglou ve ark. (2014), %10 oranında UK, SD ve MK'yi çimento ile ikame ederek hazırladıkları harç numunelerini Na_2SO_4 çözeltisine daldırarak genişleme değerlerini belirlemişlerdir. En düşük genişleme değerleri SD ilaveli karışımlardan elde edilmiştir. Sonuç olarak, mineral katkının puzolanik aktivite indeksi arttıkça, kontrol ve puzolanik karışımların genişleme değerleri arasındaki farkın arttığını tespit etmişlerdir. Sezer (2012)

çalışmalarında, SD oranının %5'den %15'e yükselmesiyle harç numunelerin genleşme değerlerinde azalmalar olduğunu bildirmiştir.

Literatürde genel olarak çeşitli mineral katkıları, farklı su/çimento oranları ve farklı sülfat çözeltileri (Na_2SO_4 , MgSO_4) kullanılarak hazırlanan çözeltilere maruz bırakılan harç numunelerinin sülfat direnci araştırılmıştır. Bu makalede incelenen çalışmaların çoğunluğunda ve diğer literatür araştırmalarında beton veya harç numuneler %5 sodyum sülfat solüsyonlarına maruz bırakılmıştır. Bu, ASTM C1012'de belirtildiği gibi sülfat çözeltisine maruz kalan hidrolik çimento harçları için önerilen sülfat iyonu konsantrasyonudur. Ancak beton yapılar daha düşük veya daha yüksek oranda Na_2SO_4 çözeltisine maruz kalabilir. Bu nedenle çalışmada genel olarak kullanılan çözelti oranından (%5) hariç olarak %3 ve %10 çözeltilerdeki sonuçları da araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında, %0, %5, %10 ve %15 oranında SD ilave edilen beton numuneler üç farklı sodyum sülfat konsantrasyonuna maruz bırakılmıştır. Beton numunelerinin sülfat direncini belirlemek üzere basınç dayanımı ve genleşme değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca karışımların işlenebilirliğini belirlemek için çökme deneyi yapılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Malzemeler ve Karışım Oranları

Çalışmada bağlayıcı malzeme olarak özgül ağırlığı 3.12 ve özgül yüzeyi $3710 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olan Portland 42.5R çimentosu (PÇ 42.5R) kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 2.20 olan silis dumanı (SD) çimento kütlelerine göre %5, %10 ve %15 oranlarında ikame edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan PÇ ve SD'nin kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çimento ve SD'nin kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	PÇ 42.5R	SD
SiO_2 (%)	18.68	88.92
Al_2O_3 (%)	4.23	0.56
Fe_2O_3 (%)	2.46	0.32
CaO (%)	64.66	2.06
MgO (%)	2.97	4.02
SO_3 (%)	3.20	0.20
Kızdırma kaybı	2.13	2.96
Çözünmeyen kalıntı	0.46	

Çalışmada, 0-3 mm, 0-7 mm ve 7-15 mm aralığında kırmataş agregalar kullanılmıştır. Agregalara ait özgül ağırlık değerleri sırasıyla 2.47, 2.69 ve 2.63 olarak belirlenmiştir. Agregaların su emme oranları ise sırasıyla %1.8, %1.7 ve %1.5 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca karışımların işlenebilirliğini ayarlayabilmek için polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltıcı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında toplam bağlayıcı miktarı 450 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Silis dumanı %5, %10 ve %15 oranlarında çimento ile ikame edilmiştir. Beton karışımların tamamında su/çimento (S/Ç) oranı 0.35 olarak belirlenmiştir. Agregalar, 0-3 mm, 0-7 mm ve 7-15 mm boyut aralıklarında sırasıyla %15, %35 ve %50 karışım oranlarında kullanılmıştır. Ön deneyler sonucunda, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarı tüm karışımlarda bağlayıcı malzeme oranının %2'si olarak belirlenmiştir. Bu parametreler doğrultusunda 4 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Silis dumanı ikame edilmeyen karışım kontrol olarak, silis dumanı ilave edilen karışımlar ise SD oranına göre kodlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan beton karışımlarına ait malzeme oranları Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Beton karışım oranları (kg/m³)

Karışım kodu	Çimento	Silis Dumanı	0-3 mm agrega	0-7 mm agrega	7-15 mm agrega	S/Ç	Akışkanlaştırıcı
Kontrol	450		267	623	890	0.35	9
SD-5	427.5	22.5	265	620	885	0.35	9
SD-10	405	45	264	617	881	0.35	9
SD-15	382.5	67.5	263	614	877	0.35	9

Deney Yöntemleri

DeneySEL çalışma, farklı oranlardaki silis dumanının normal betonun işlenebilirlik, mekanik ve sülfat direnci özellikleri üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda taze beton karışımlarının çökme (slump) deneyi TS EN 12350-2 (2019) standardına göre yapılmıştır. Su küründe bekletilen numunelerin 28. günde basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Sülfat direnci sonrası dayanımı belirlenecek olan numuneler ise 28 günlük kür süresinden sonra, %3, %5 ve %10 konsantrasyona sahip Na₂SO₄ çözeltileri içerisinde bekletilmiştir. Çözeltide bekletilen numuneler 30, 60, 90 ve 120 günlük periyotlarda çözeltiden çıkarılarak dayanım testine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı testi, 100x200 mm boyutlarında silindir numuneler üzerinde TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır. Ayrıca “Eşitlik 1.” kullanılarak sodyum sülfat çözeltisinde bekletilen beton numunelerin bağıl artık basınç dayanımı hesaplanmıştır.

$$\text{Bağıl Artık Basınç Dayanımı (\%)} = [(f_{cn}/f_{c0})] \times 100 \quad (1)$$

Burada, f_{cn} : Na₂SO₄ çözeltisine bırakılan numunelerin n+28 gün sonraki basınç dayanımı (MPa), f_{c0} : Na₂SO₄ çözeltisine bırakılmayan standart küremeye tabi tutulan numunelerin 28 günlük basınç dayanımını (MPa) göstermektedir.

Ayrıca Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan beton numunelerin genleşme oranları, 70x70x280 mm boyutlarında prizma numuneler üzerinde ASTM C1012’e uygun olarak belirlenmiştir. Genleşme oranları “Eşitlik 2.” kullanılarak hesaplanmıştır.

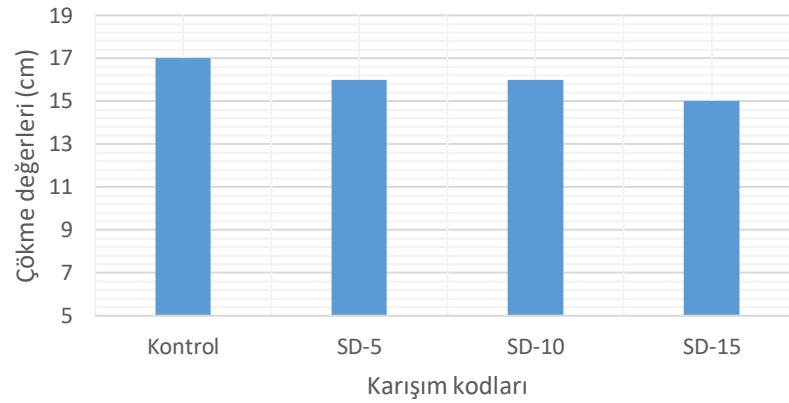
$$\text{Genleşme oranı (\%)} = \left[\frac{L_n - L_0}{L_0} \right] \times 100 \quad (2)$$

Burada, L_n : Na₂SO₄ çözeltisine bırakılan numunelerin n gün sonraki uzunluğunu, L_0 : Na₂SO₄ çözeltisine bırakılmayan standart küremeye tabi tutulan numunelerin başlangıç uzunluğunu göstermektedir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

İşlenebilirlik

Karışımlara ait çökme (slump) değerleri Şekil 1’de sunulmuştur. Çalışmaya ait ön deneyler sonucunda süper akışkanlaştırıcı kullanılmadan hazırlanan silis dumanlı karışımların çökme değerlerinin, kontrol numunesine kıyasla düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, SD partiküllerinin, çimento partiküllerine göre çok küçük olmasından dolayı daha fazla su ihtiyacı olmasına bağlanabilir. Bu nedenle, çalışmada karışımların üretilmesinde su/çimento oranı sabit tutularak, SD ilaveli karışımların çökme değerlerini iyileştirmek için süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

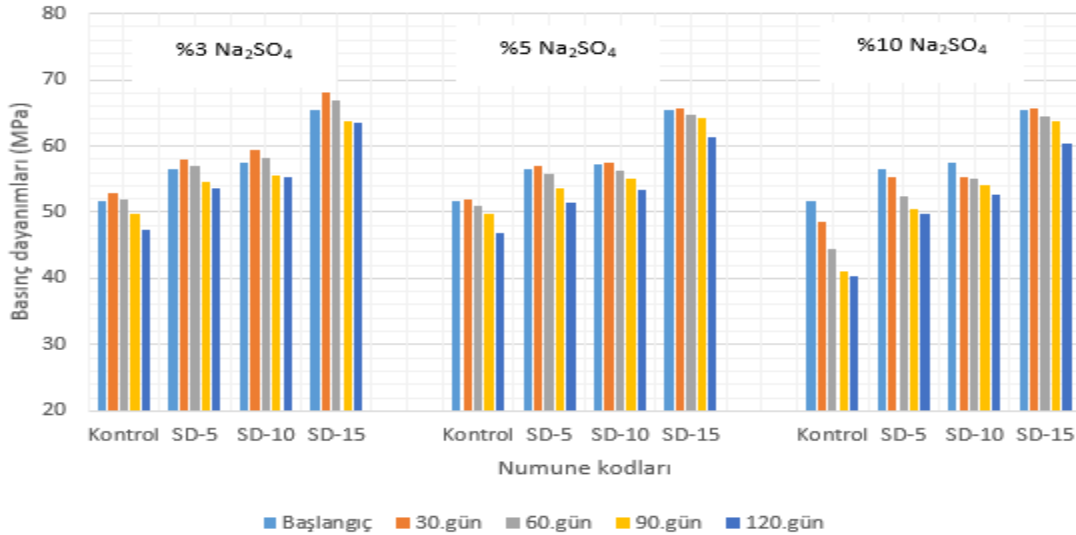


Şekil 1. Karışımlara ait çökme değerleri

Süper akışkanlaştırıcı kullanılmamasından kaynaklı olarak karışımlara ait çökme değerleri arasında kayda değer farklılık meydana gelmemiştir. SD kullanılan karışımların çökme değerindeki düşüklük, süper akışkanlaştırıcının bir kısmının yüzeyinde adsorbe olmasına neden olan silis dumanının çok ince parçacık boyutuna bağlanabilir (Mazloom ve ark., 2004; Park ve ark., 2005).

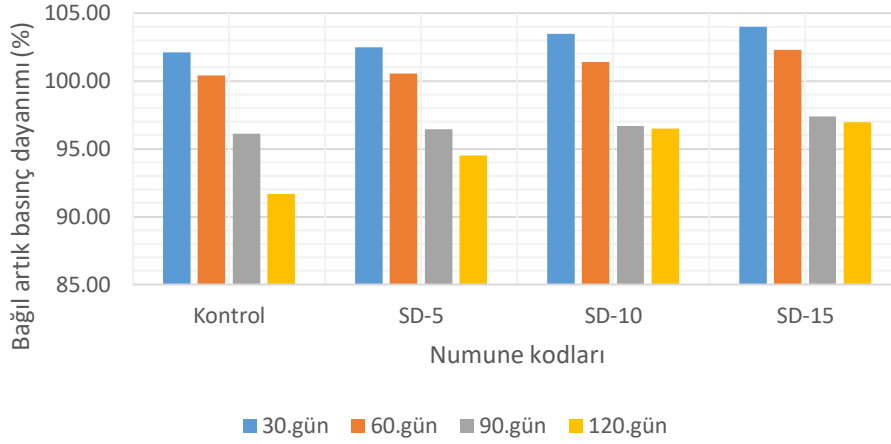
Basınç Dayanımı

Na_2SO_4 çözeltisinde bırakılmadan önce ve %3, %5 ve %10 konsantrasyona sahip çözeltide 30, 60, 90 ve 120 günlük periyotlarda bekletilen numunelere ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılmadan önceki en yüksek başlangıç basınç dayanımı (28.gün) SD-15 serisinden elde edilmiştir.

Şekil 2. Karışım numunelerine ait başlangıç ve Na_2SO_4 çözeltisine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımları

Karışımlardaki SD miktarı arttıkça basınç dayanımında artışlar tespit edilmiştir. Kontrol numunesine kıyasla %5, %10 ve %15 SD kullanımı basınç dayanımını sırasıyla yaklaşık %9.48, %11.03 ve %26.50 arttırmıştır. Bu durum, yüksek puzolanik aktiviteli bir malzeme olan SD'nin, çimento hidratasyonundan kaynaklı olarak oluşan CaOH_2 ile reaksiyona girerek ek C-S-H jelleri oluşturması ile açıklanabilir (Sezer, 2012). Ayrıca, SD partiküllerinin çok ince olmasından dolayı beton içerisinde bulunan mikro boşlukları doldurma etkisine de atfedilebilir (Yazıcı ve ark., 2009). Çelik ve ark. (2022) çalışmalarında %5, %10 ve %15 oranında SD ilavesinin beton basınç dayanımını, referans numunesine göre %6.22, %10.50 ve %22.07 oranında arttırdığını tespit etmişlerdir. Mazloom ve ark. (2004) %6,

%10 ve %15 SD ikamesinin dayanımı sırasıyla %12.06, %16.38 ve %20.69 oranında arttırdığını gözlemlenmiştir. Ancak %15 oranından daha fazla SD ilavesi işlenebilirliği olumsuz etkileyeceğinden dayanımda düşüşlere neden olabilir.

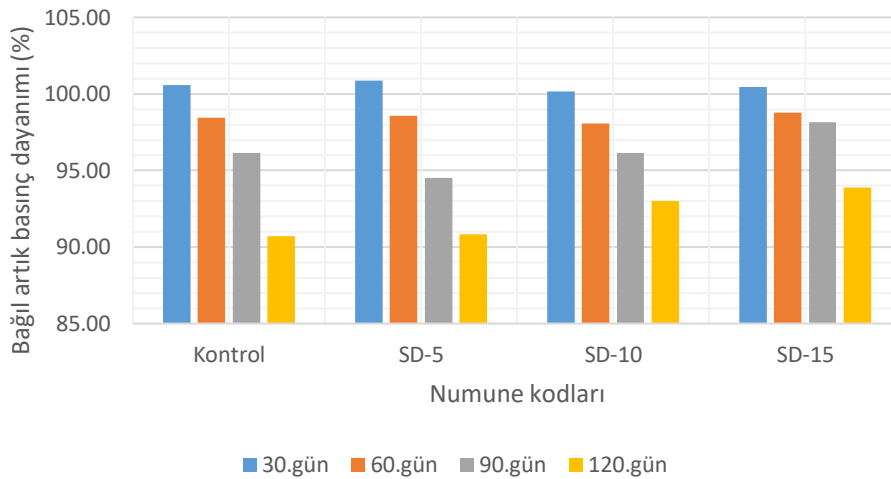


Şekil 3. %3 Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin artık basınç dayanımı

%3 konsantrasyona sahip Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelere ait 30, 60, 90 ve 120 günlük bağıl artık basınç dayanımı oranları Şekil 3'te sunulmuştur. Tüm karışım türlerinde özellikle 30 günlük süreç boyunca sodyum sülfata maruz bırakılan betonların dayanımının arttığı tespit edilmiştir. En yüksek dayanım artışı yaklaşık %4 oranıyla SD-15 serisinden elde edilmiştir. Na₂SO₄ çözeltisine maruz kalmanın erken aşamalarında (30 ve 60 gün) bağıl artık dayanımlarındaki artış Al-Amoudi (1998) ve Lee ve ark. (2005) tarafından da rapor edilmiştir. Bakharev (2005) çalışmasında, sülfat çözeltisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımının ilk ayda arttığını ve ardından sabit bir düşüşe geçtiğini bildirmiştir. Bu durum, gözenek boşluklarının genişleyen ürünler tarafından doldurulmasına, harç matrisinin daldırmanın erken döneminde ve yüksek çekme gerilmesine maruz kalmadan önce yoğunlaştırılmasına bağlanabilir (Lee ve ark., 2005). %3 konsantrasyonlu Na₂SO₄ çözeltisine tabi tutulan numunelerde maruz kalma süresi arttıkça basınç dayanım kayıpları artmıştır. Örneğin, kontrol numunesinin 120 gün sülfat maruziyetinden sonraki dayanımı, başlangıç dayanımına kıyasla %8.32 oranında azalmıştır.

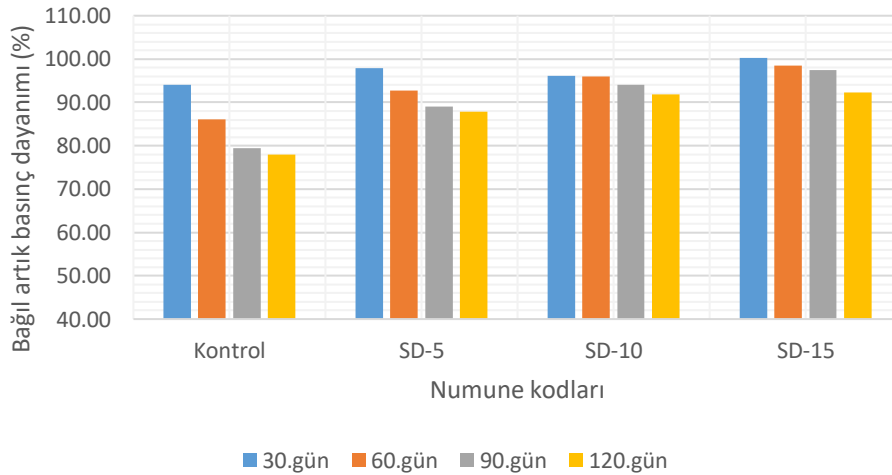
%5'lik Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan beton numunelerin basınç dayanımı sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. %3'lük Na₂SO₄ sonuçlarına benzer şekilde ilk ayda dayanımda artışlar gözlemlenmiştir. Ancak 60 günlük sonuçlar, %3'lük Na₂SO₄ sonuçlarının aksine dayanım kaybına uğramıştır. Bu durum konsantrasyonda ki artışla ilişkilendirilebilir. Kontrol numunesindeki bağıl artık dayanım oranları %90.72 ile %100.58 aralığında değişmiştir. Bu oranlar, SD-5, SD-10 ve SD-15 serilerinde sırasıyla %90.81 ile 100.88, %93.02 ile %100.17 ve %93.88 ile %100.46 arasında tespit edilmiştir. Karışımlara ikame edilen SD oranı arttıkça basınç dayanım kaybı azalmıştır. En yüksek dayanım kaybı %9.28 ile kontrol numunesinde tespit edilirken, en düşük dayanım kaybı %6.12 ile SD-15 numunesinde elde edilmiştir. Bu durum, SD'nin puzolanik reaksiyonundan dolayı mevcut CaOH₂'i azaltmasına ve böylece SD katkılı karışımlarda sülfat etkisi ile dayanım kaybını arttıracak jips oluşumunun azalmasına bağlanabilir (Sezer, 2012). Ayrıca, SD'nin çok küçük partikül boyutundan dolayı betonun geçirimsizliğini azaltarak çözeltinin beton içine nüfuz etmesini engellemiştir. Wang ve ark., (2017), SD'nin %5 konsantrasyonlu Na₂SO₄ saldırısına karşı direnci arttırmada etkili olduğunu ve SD'nin uçucu külden daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuşlardır.

Farklı Konsantrasyonlarda Sodyum Sülfata Maruz Kalan Silis Dumanı İçerikli Betonların Sülfat Direncinin İncelenmesi



Şekil 4. %5 Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin artık basınç dayanımı

Sodyum sülfat konsantrasyon oranının %10'a yükselmesiyle basınç dayanım kayıpları artmıştır. %10 Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin bağıl artık basınç dayanımı değerleri Şekil 5'de gösterilmiştir.

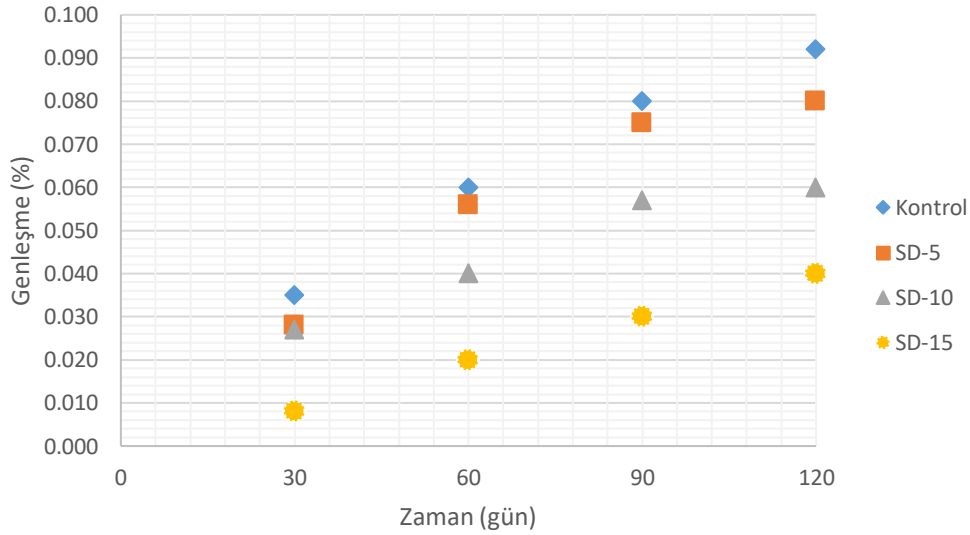


Şekil 5. %10 Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerin artık basınç dayanımı

SD-15 karışımı haricinde diğer bütün numunelerde bağıl artık basınç dayanımı oranı ilk ayda %100'den az olduğu belirlenmiştir. Kontrol numunesinin bağıl artık basınç dayanımı %94 ile %77.95 aralığında değişmiştir. Kontrol harçlarının basınç dayanımındaki bu azalma, reaksiyon ürünlerinin (alçıtaşı ve etrenjit) yıkıcı etkisinin, dayanıma katkılarında daha baskın olduğunu göstermektedir (Şahmaran ve ark., 2007). Bu oranlar, SD-5, SD-10 ve SD-15 serileri için sırasıyla %97.88 ile %87.81, %96.17 ile %91.81 ve %100.31 ile %92.35 arasında değişmiştir. Bu sonuçlar, SD ilavesinin, yalnızca kontrol numunesiyle kıyaslandığında dayanım kaybında önemli etkilere yol açtığını göstermektedir. Bununla birlikte, üç farklı SD oranı için dayanım kaybı miktarı önemli ölçüde farklı değildi ve yaklaşık 120 gün Na₂SO₄ saldırısına maruz kaldıktan sonra, dayanım kaybı, %5-15'lik SD içerikleri için yaklaşık %8-12'de nispeten sabit kalmıştır. Sonuç olarak, konsantrasyon oranı ve maruz kalma süresi arttıkça numunelerin dayanım kayıpları da artmıştır. Bu durum, genleşmeye, çatlamaya ve dayanımda azalmaya yol açan etrenjit ve alçı oluşumuyla birlikte beton numunelerin bozulmasına bağlanabilir.

Na₂SO₄ Çözeltisi Sonrası Genleşme Oranları

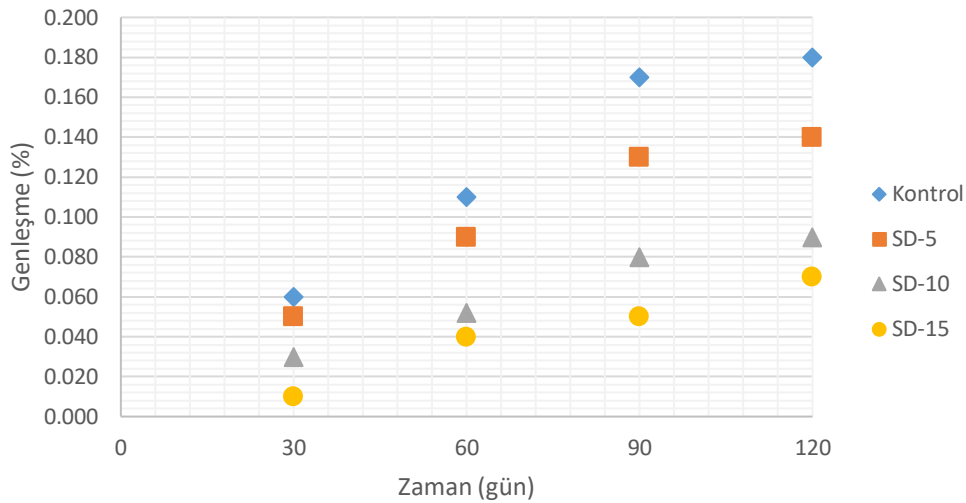
%3, %5 ve %10 konsantrasyona sahip sodyum sülfat çözeltilerinde bekletilen silis dumanı içerikli betonların genleşme değerleri sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmektedir. %3 Na₂SO₄ çözeltisinde bekletilen numunelerde en yüksek genleşme değerleri kontrol numunesinden elde edilmiştir. Kontrol numunesinin genleşme oranları 0.035 ile 0.092 aralığında değişmiştir. Karışımlardaki SD oranı arttıkça genleşme oranları azalmıştır. 30 günlük periyod sonrası en düşük genleşme oranı SD-15 serisinden elde edilmiştir. SD-15 serisinin genleşme oranları 0.008 ile 0.04 arasında değişmiştir. Bu durum, çimentonun bir kısmının SD ile ikame edilmesiyle birlikte karışımlardaki hem C₃A hem de kalsiyum hidroksit miktarının azalmasına atfedilebilir. Sonuçta, tüm alüminat taşıyan fazlarda azalma meydana gelecek ve bu da etrenjit oluşumunu azaltacaktır. Ayrıca çimentonun hidrasyonu ile üretilen CaOH₂'in önemli bir bölümünün SD tarafından tüketilmesi ve bu nedenle karışımın pH'ının düşmesinden dolayı etrenjit daha az genleşir (Dulajjan ve ark., 2003).



Şekil 6. Beton numunelerinin %3 Na₂SO₄ çözeltisindeki genleşme oranları

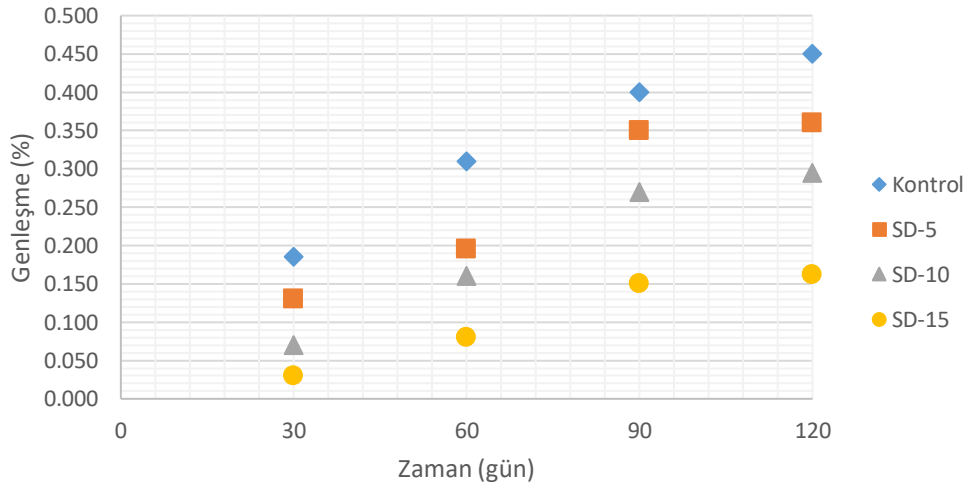
Konsantrasyon oranı arttıkça (%5) karışımların genleşme oranları da artmıştır. %5 Na₂SO₄ çözeltisine maruz bırakılan numunelerde en fazla genleşme oranı kontrol numunesinden elde edilmiştir. Kontrol numunesinin çözeltiliye 30 gün maruz bırakılması durumunda genleşme oranı 0.06 iken, 120 gün sonunda bu değer 0.18'e yükselmiştir. Sezer (2012) çalışmalarında kontrol numunesinin 30 günlük genleşme oranını yaklaşık 0.016 olarak hesaplamıştır. SD oranı arttıkça beton numunelerinin genleşme oranı azalmıştır. SD-5 serisinin genleşme oranları 0.05 ile 0.14 arasında değişmiştir. SD oranı %15'e yükselmesiyle birlikte bu aralık 0.01 ile 0.07 arasında ölçülmüştür. Lv (2022) SD'nin sülfat direncinin yüksek olmasını portlanditin puzolanik reaksiyonla uzaklaştırılmasından ziyade, toplam gözenekliliği ve zararsız gözenek yüzdesini korumasına atfetmiştir.

Farklı Konsantrasyonlarda Sodyum Sülfata Maruz Kalan Silis Dumani İçerikli Betonların Sülfat Direncinin İncelenmesi



Şekil 7. Beton numunelerin %5 Na₂SO₄ çözeltisindeki genişleme oranları

%10 konsantrasyona sahip sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan numunelerin genişleme oranları önemli miktarda artmıştır. Kontrol numunesinin genişleme oranı 0.06 ile 0.18 arasında değişmiştir. Diğer konsantrasyon oranlarına benzer şekilde SD oranı arttıkça genişleme oranı azalmıştır. Tüm konsantrasyon oranlarında erken yaşlarda özellikle 30 günlük süreçte genişleme oranları arasındaki fark az iken, bekletme süresi arttıkça genişleme oranları arasındaki fark artmıştır. Karışımlar arasında en düşük genişleme diğer konsantrasyon oranlarına benzer olarak SD-15 serisinde tespit edilmiştir.



Şekil 8. Beton numunelerin %10 Na₂SO₄ çözeltisindeki genişleme oranları

SONUÇ

Bu çalışmada, çimento yerine %5, %10 ve %15 oranında silis dumani ikame edilmiş karışımların sülfat direnci araştırılmıştır. Karışımlar %3, %5 ve %10'luk konsantrasyona sahip Na₂SO₄ çözeltisinde 30, 60, 90 ve 120 gün bekletilerek basınç dayanımı kaybı ve genişleme oranları belirlenmiştir. Çalışmada aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Karışımların işlenebilirliğini düzenleyebilmek için süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu nedenle silis dumani ikameli karışımlarda kayda değer çökme kayıpları meydana gelmemiştir. Ayrıca karışımların çökme değerleri 15-17 cm aralığında ölçülmüştür.

• Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılmadan önceki başlangıç basınç dayanımı SD ilavesi arttıkça artmıştır. En yüksek basınç dayanımı değeri SD-15, en düşük basınç dayanım değeri ise kontrol numunesinden elde edilmiştir.

• %3 konsantrasyonlu Na_2SO_4 çözeltisine maruz bırakılan numunelerin erken yaşta (30 ve 60. gün) bağıl artık basınç dayanım oranlarında artış tespit edilmiştir. Bu durum, gözenek boşluklarının genişleyen ürünler tarafından doldurulmasına ve harç matrisinin yoğunlaştırılmasına atfedilmiştir.

• SD ikamesi arttıkça basınç dayanım kayıpları Na_2SO_4 çözeltisinin tüm konsantrasyon oranlarında azalmıştır. Tüm konsantrasyon ve yaşlarda en az dayanım kaybı SD-15 serisinde hesaplanmıştır. Ayrıca tüm karışımlarda konsantrasyon oranı ve zaman arttıkça dayanımda ki düşüşlerde artmıştır.

• Özellikle %10 konsantrasyona maruz bırakılan kontrol örneklerinde kayda değer dayanım kayıpları olmuştur. Bununla birlikte, üç farklı SD oranı için dayanım kaybı miktarı önemli ölçüde farklı değildi ve yaklaşık 120 gün Na_2SO_4 saldırısına maruz kaldıktan sonra, dayanım kaybı, %5-15'lik SD içerikleri için yaklaşık %8-12'de nispeten sabit kalmıştır.

• Beton numunelerin genleşme oranları dayanım kayıpları ile benzerlik göstermiştir. Tüm konsantrasyon oranlarında ve yaşlarında SD oranı arttıkça genleşme oranları azalmıştır. Özellikle %10 konsantrasyonda numuneleri tamamında önemli genleşmeler kaydedilmiştir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Al-Amoudi, O. S. B. (1998). Sulfate attack and reinforcement corrosion in plain and blended cements exposed to sulfate environments. *Building and Environment*, 33(1), 53-61.
- Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M. M., Sharif, A. M., Shameem, M., & Ibrahim, M. (2003). Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 429-437.
- ASTM C 1012-02.(2002). Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution. United States of America: *ASTM International*, 1-6.
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and concrete research*, 35(6), 1233-1246.
- Brown, P. W., & Badger, S. (2000). The distributions of bound sulfates and chlorides in concrete subjected to mixed NaCl , MgSO_4 , Na_2SO_4 attack. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1535-1542.
- Çelik, Z., Bingöl, A. F., & Ağsu, A. S. (2022). Fresh, mechanical, sorptivity and rapid chloride permeability properties of self-compacting concrete with silica fume and fly ash. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-11.
- El-Hachem, R., Rozière, E., Grondin, F., & Loukili, A. (2012). New procedure to investigate external sulphate attack on cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 34(3), 357-364.
- Figg, J. (1999). Field studies of sulfate attack on concrete. *Materials Science of Concrete: Sulfate Attack Mechanisms*, Ed. J. Marchand and JP Skalny. American Ceramic Society, Westerbok, Ohio, 315-323.

- Hekal, E. E., Kishar, E., & Mostafa, H. (2002). Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances. *Cement and Concrete Research*, 32(9), 1421-1427.
- Ikumi, T., & Segura, I. (2019). Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review. *Cement and Concrete Research*, 121, 91-105.
- Lee, S. T., Moon, H. Y., & Swamy, R. N. (2005). Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 65-76.
- Liu, T., Zou, D., Teng, J., & Yan, G. (2012). The influence of sulfate attack on the dynamic properties of concrete column. *Construction and Building Materials*, 28(1), 201-207.
- Lv, X., Yang, L., Li, J., & Wang, F. (2022). Roles of fly ash, granulated blast-furnace slag, and silica fume in long-term resistance to external sulfate attacks at atmospheric temperature. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104696.
- Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G. İ., & Ramyar, K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17-25.
- Mazloom, M., Ramezani-pour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and concrete composites*, 26(4), 347-357.
- Park, C. K., Noh, M. H., & Park, T. H. (2005). Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures. *Cement and concrete research*, 35(5), 842-849.
- Planel, D., Sercombe, J., Le Bescop, P., Adenot, F., & Torrenti, J. M. (2006). Long-term performance of cement paste during combined calcium leaching–sulfate attack: kinetics and size effect. *Cement and Concrete Research*, 36(1), 137-143.
- Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2003). Effects of gypsum formation on the performance of cement mortars during external sulfate attack. *Cement and concrete research*, 33(3), 325-332.
- Sezer, G. İ. (2012). Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars. *Construction and Building Materials*, 26(1), 613-618.
- Skalny, J., & Pierce, J. (1999). Sulfate attack issues. *Material Science of Concrete—Sulfate Attack Mechanisms*, American Ceramic Society, Westerville, OH, 49-64.
- Şahmaran, M., Kasap, O., Duru, K., & Yaman, I. O. (2007). Effects of mix composition and water–cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. *Cement and Concrete composites*, 29(3), 159-167.
- TS EN 12350-2, (2019). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. *Türk Standardları Enstitüsü*. Ankara.
- TS EN 12390-3, (2019). Beton – sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Wang, H., Chen, Z., Li, H., & Sun, X. (2021). Numerical simulation of external sulphate attack in concrete considering coupled chemo-diffusion-mechanical effect. *Construction and Building Materials*, 292, 123325.
- Wang, D., Zhou, X., Meng, Y., & Chen, Z. (2017). Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 147, 398-406.
- Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., & Karabulut, A. Ş. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and building materials*, 23(3), 1223-1231.