



Ca²⁺ SALINIMI YARDIMIYLA SİLİS DUMANLI VE UÇUCU KÜLLÜ HARÇLARIN H₂SO₄ DİRENCİNİN İNCELENMESİ

Paki TURGUT^{1*}, Kazım TÜRK², Feridun DEMİR³, Nuray KARADAŞ⁴

¹ İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

² İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

³ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

⁴ Şanlıurfa Büyükşehir Belediyesi, Arıtma Tesisleri Daire Başkanlığı

Anahtar Kelimeler

Silis Dumanı,
F Sınıfı Uçucu Kül,
Harç,
Ca²⁺ Salınımı,
Asit Direnci.

Öz

Literatürde F sınıfı uçucu külün asit direncini artırdığı konusunda fikir birliği bulunmasına karşın, silis dumanının asit direncini artırıp artırmadığı konusunda bir fikir birliği oluşmamıştır. Bu çalışmada, seyreltilmiş H₂SO₄ çözeltisi kullanılarak silis dumanlı ve F sınıfı uçucu küllü kendiliğinden yerleşen harçların asit dirençleri, Ca²⁺ iyon salınımı dikkate alınarak incelenmiştir. Uçucu küllü numunelerde, Portland çimentosu ile F sınıfı uçucu külün yer değiştirme oranları ağırlıkça %25, %30 ve %35'tir. Silis dumanlı numunelerde, Portland çimentosu ile silis dumanın ağırlıkça yer değiştirmeleri %5, %10 ve %15'tir. Tüm yer değiştirme oranlarında F sınıfı uçucu kül içeren harçların asit dirençleri, silis dumanı içeren harçlardan daha iyi olmuştur. %30 F sınıfı uçucu kül içeren harçın asit direnci, hem silis dumanlı hem de F sınıfı uçucu kül içeren diğer numunelerden daha yüksektir. %5 ve %10 silis dumanı içeren harçların asit direnci ise, %15 silis dumanlı harç ve Kontrol numunelerinden daha büyük olmuştur. F sınıfı uçucu külden elde edilen sonuçlar ile diğer araştırmacıların sonuçları uyum içerisindedir. Ancak silis dumanlı numunelerin sonuçları kısmen literatürle uyum içerisinde olmuştur.

INVESTIGATION OF H₂SO₄ RESISTANCE OF MORTARS WITH SILICA FUME AND FLY ASH BASED ON Ca²⁺ LEACHING

Keywords

Silica Fume,
Class F Fly Ash,
Mortar,
Ca²⁺ Leaching,
Acid Resistance.

Abstract

Although there is a consensus in the literature that class F fly ash increases acid resistance, there is no consensus on whether silica fume increases acid resistance. In this study, acid resistances of self-compacting mortars with silica fume and class F fly ash were investigated using diluted H₂SO₄ solution based on Ca²⁺ leaching. In the samples with class F fly ash, the replacement ratios of Portland cement with class F fly ash were 25%, 30% and 35% by weight. In the samples with silica fume, the replacement ratios of Portland cement with silica fume were 5%, 10% and 15% by weight. Acid resistances of mortars with class F fly ash at all replacement ratios were better than those of silica fume. The acid resistance of the mortar containing class F fly ash at 30% replacement ratio was higher than other mortars with silica fume or class F fly ash. Acid resistances of mortars with silica fume at 5% and 10% replacement ratios were much higher than those of silica fume at 15% replacement ratio and the control sample. The results obtained with class F fly ash in this study were in agreement with the results of other researchers. However, the results of the samples with silica fume were partially in agreement with the literature.

Alıntı / Cite

Turgut, P., Türk, K., Demir, F., Karadaş, N., (2022). Ca²⁺ Salınımı Yardımıyla Silis Dumanlı Ve Uçucu Küllü Harçların H₂SO₄ Direncinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 180-187.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

P. Turgut, 0000-0002-3711-4605
K. Türk, 0000-0002-9488-1587
F. Demir, 0000-0001-6372-6958
N. Karadaş, 0000-0003-3164-0724

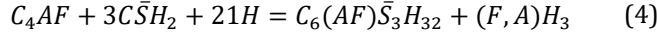
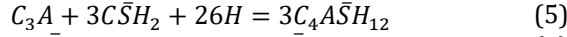
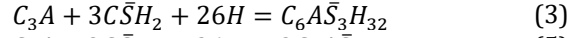
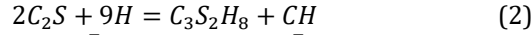
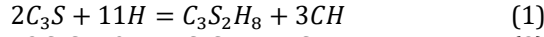
Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	25.04.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	05.09.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	23.09.2021
Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

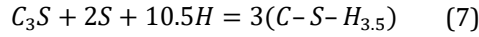
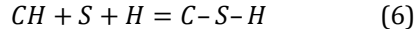
1. Giriş (Introduction)

Hammaddesinin bol miktarda bulunması ve ucuz olması, yerleştirildiği kalıbın şeklini aldıktan sonra sertleşmesi ve yapıların hızlı bir şekilde inşasına olanak sağlaması, teorik olarak dayanımının yüksek ve hizmet ömrünün uzun olması bakımından, beton henüz daha yeri doldurulmamış yapay bir malzemedir. Beton malzemesinin en önemli bileşenlerinden birisi çimentodur ve agregaya yığınlarını bir arada tutmaktadır. Çimentonun bağlayıcılık ve dolayısıyla dayanım kazanması nem, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonudur. Belirtilen bu üç parametreye bağlı olarak çimentonun hidrasyon (kimyasal reaksiyon) olayı devam etmekte ve sertleşmiş çimento hamurunun yapısını teşkil eden ürünler oluşmaktadır.

Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki en önemli ürünlerden birisi Kalsiyum Silikat Hidrattır ($C-S-H$) ve sertleşmiş çimento hamuruna dayanım özelliğini kazandırmaktadır. Beton içerisindeki agregaya yığınlarını bir arada tutan ve betonun genel dayanımını sağlayan da yine bu üründür. Portland çimentosu (PÇ) klinkerinin ana bileşenlerinden C_3S ve C_2S 'nin su ile reaksiyonundan $C-S-H$ oluşmaktadır. $C-S-H$ 'in oluşumuyla eşzamanlı olarak, $C-S-H$ üzerinden salınan bir miktar Ca^{2+} iyonları da boşluk suyu içerisindeki OH^- iyonlarıyla birleşerek kalsiyum hidroksit (CH) ürününü oluşturmaktadır. CH ürünü tabakalı kristal bir yapıya sahiptir ve tabakaları birbirine zayıf bağla bağlıdır. CH ürününün 20 °C sıcaklıktaki pH değeri 12.5'tir. C_3A ana bileşeninin alçıtaşı (kalsiyum sülfat) ve su ile reaksiyonundan etrenjit ürünü oluşmaktadır. Ancak sülfat C_3A 'yı tamamen tüketemezse, etrenjit ürünü bir başka kalsiyum sülfat hidrat olan monosülfata dönüşmektedir. C_4AF ana bileşeninin reaksiyonu da C_3A 'ya benzer olmaktadır. Ana bileşenlerin hidrasyon ürünlerinin oluşumu aşağıda verilmiştir (Mindess vd., 2003).



Beton özelliklerini iyileştirmede bazı mineral katkıları PÇ ile birlikte kullanılmaktadır. Puzolanik özelliklere sahip olan silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK), betonda yaygın bir şekilde kullanılan mineral katkılardır. SD ve F sınıfı UK'nin, C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin hidrasyonu sonucu meydana gelen CH ve ana bileşenlerden C_3S ile reaksiyonları sonucunda aşağıda verilen $C-S-H$ ürünleri oluşur.



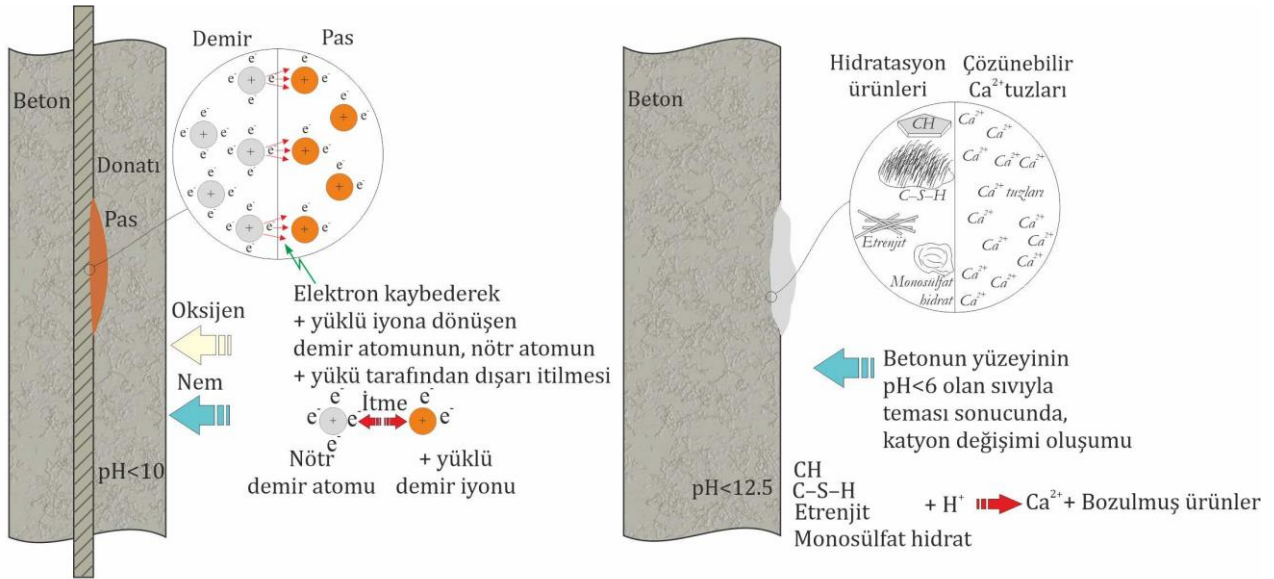
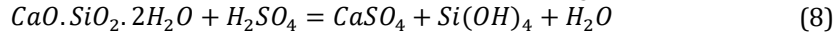
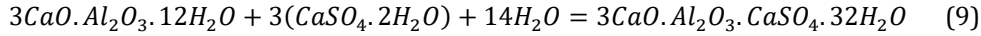
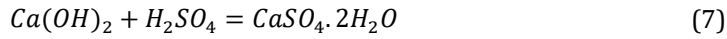
PÇ'nun suyla reaksiyonu ve puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan $C-S-H$ ürünleri birbirinin benzeridir. Ancak PÇ'nun hidrasyonu sonucu oluşan $C-S-H$ üründeki C/S oranı, puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan $C-S-H$ 'nin C/S oranından biraz daha büyüktür. Puzolanik reaksiyondan oluşan $C-S-H$ ürünündeki C/S oranı 1 olmasına karşın, C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin hidrasyonu sonucunda meydana gelen $C-S-H$ 'nin C/S oranı 1.7'dir. C/S oranının azalması, PÇ'nun hidrasyonu sonucunda oluşan $C-S-H$ üzerinde ikincil bir puzolanik reaksiyonun meydana geldiğini gösterir (Mindess vd., 2003). SD ve F sınıfı UK'nin puzolanik reaksiyonu sonucunda oluşan $C-S-H$ ürününden dolayı, boşluk çözeltisinin kompozisyonu değişmektedir. SD ve F sınıfı UK'nin puzolanik reaksiyonundan dolayı, boşluk çözeltisindeki Ca^{2+} iyonları azalmaktadır. Böylece, PÇ hamurunun boşluk miktarı da değişmektedir. Boşluk miktarındaki değişimin nedeni şudur; Kullanılan PÇ miktarı sabit olmasına karşın, SD ve F sınıfı UK kullanıldığından daha fazla $C-S-H$ üretilir. $C-S-H$ 'in hacmi, SD ve CH 'in toplam hacminden daha büyüktür. Çünkü oluşan $C-S-H$ ürünü ayrıca su da içermektedir. Dolayısıyla, sertleşmiş hamurdaki boşluk etkili bir şekilde azalmaktadır.

Hidrasyonunu tamamlamış PÇ hamurundaki $C-S-H$, CH ve kalsiyum alüminat-silikat hidrat ($C-A-S-H$) çözünemeyen hidrasyon ürünleri ile bu ürünlerin içerisindeki ya da etrafındaki boşluk sıvısının pH değerinin yüksek olması durumunda denge oluşmaktadır. Çimento hamurunun boşluklarında bulunan CH (yani OH^-) ve etrafındaki Na^+ , K^+ iyonlarının miktarına bağlı olarak, sertleşmiş çimento hamurunun pH değeri 13 ile 14 arasında değişmektedir. Sertleşmiş çimento hamuru içerisine sızan suların ortamın pH değerini düşürmesiyle, kimyasal denge bozulmakta ve hidrasyon ürünlerini oluşturan bazı atomlar iyonlaşarak salınmaktadır (Taylor, 1997).

Sertleşmiş çimento hamurunun bozulması, pratikte donatının paslanması olayına benzemektedir. Beton içerisindeki donatının paslanması ile yine betonun bileşenlerinden sertleşmiş çimento hamurundaki hidrasyon ürünlerinin bozulması Şekil 1'de gösterilmektedir. Donatının paslanması olayında, değişik nedenlerden dolayı betonun pH azalır, donatının üzerindeki koruyucu oksit tabakası yırtılır (pH<10 olduğunda), oksijen ve nem beton içerisine sızarak anot ve katot bölgeleri oluşur, nötr haldeki demir atomları elektron kaybederek pozitif yüklü demir iyonuna dönüşür ve nihayetinde nötr haldeki demir atomlarının pozitif yüklü çekirdekleri tarafından

itilerek dışarıda pas olarak birikir. Böylece, betonun içerisindeki orijinal donatıyı oluşturan demir atomları koparak uzaklaşır ve donatı bozunmuş olur (Şekil 1a) (Torraca, 2009). Betonun bozunması olayında, pH değeri düşük ($pH < 6$) sıvılar beton içerisine sızar ve sertleşmiş çimentonun Ca atomu içeren hidratasyon ürünlerine ulaşır, H^+ iyonları tarafından katyon değişimleri meydana gelir. H^+ iyonları tarafından hidratasyon ürünlerinden Ca atomlarını kopardıktan sonra, Ca^{2+} iyonları betonun dış yüzeyinde kalsiyum tuzları olarak biriktirilir (Şekil 1b) (Taylor, 1997). Böylece, betonun içerisindeki hidratasyon ürünleri bozunarak işlevini zamanla kaybederek, betonda içerisinde boşluk meydana getirir. Gerek donatının paslanması olayında, gerekse sertleşmiş çimento hamurunun bozulmasından dolayı malzemelerde dayanım kaybı meydana gelir. Her iki olayın önlenmesi veya kısmen yavaşlatılması üretilen betonun geçirimsiz olmasına bağlıdır.

H_2SO_4 ile hidratasyon ürünleri arasındaki reaksiyondan oluşan ilk ürün alçıtaşıdır ve betonun içerisinden dışarı doğru sızarak yüzeyde birikmektedir. Beton yüzeyinde biriken alçıtaşı geçirimsiz bir tabaka oluşturarak, H_2SO_4 'ün dışarıdan içeri doğru sızmasını zorlaştırmakta ve daha ileri düzeyde bozulmasını engellemektedir. Ancak yumuşak ve zayıf bir yapıya sahip olduğundan yıkanarak kolayca yüzeyden uzaklaşabilmektedir. Hidratasyon ürünlerinin alçıtaşı ve H_2SO_4 ile reaksiyonu sonucu oluşan ürünler aşağıda verilmiştir (Monteny vd., 2000). Oluşan hidratasyon ürünleri betonda hacim artışı yaparak çatlamalara neden olur. Etreanjit ürününden kaynaklanan hacim artışı, alçıtaşının yapacağı hacim genişlemesinden çok daha fazladır. H_2SO_4 ile C-S-H'nin reaksiyonu sonucunda, C-S-H bozunarak sulu amorf silikata dönüşmektedir.



a) Donatının paslanması
(Corrosion of rebar)

b) Çimento hamurunun bozunması
(Deterioration of cement paste)

Şekil 1. Donatı ve çimento hamurunun bozunması (Deterioration of rebar and cement paste)

Yumuşak su içerisindeki karbondioksit, deniz sularındaki sülfat ve klor iyonları, yeraltı suları ve endüstriyel atık sularda bulunan hidrojen iyonları, suyun pH değerini 6'dan daha az bir değere düşürebilmektedir. Bu durum sertleşmiş çimento hamuru için oldukça zararlıdır. Bu tür suların sertleşmiş çimento hamuru ile temas etmesi durumunda, bazı hidratasyon ürünleri içerisindeki Ca^{2+} iyonları çözülmeye başlar. Sertleşmiş çimento hamuru içerisinde bu tür suların basınçlı bir şekilde akışı durumunda, sertleşmiş çimento hamurunun bozulması çok daha hızlı olmaktadır. Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki Ca^{2+} iyonunun salınımı, çoğunlukla hidratasyon ürünlerinden birisi olan CH'de meydana gelmektedir. Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki Ca^{2+} iyonlarının salınımı dayanım azalmasına neden olmaktadır. Örneğin, sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki Ca^{2+} iyonlarının üçte birinin ayrılması, basınç dayanımı değerinin yarıya düşmesine neden olmaktadır (Hewlett, 2003).

Bu çalışmada, içerisinde SD ve F sınıfı UK kullanılmış harçların (daha doğrusu çimento hamurunun) Ca^{2+} iyonlarının salınımına etkisi incelenmiştir. Literatürde F sınıfı uçucu külün asit direncini artırdığı konusunda fikir birliği bulunmasına karşın, silis dumanının asit direncini artırıp artırmadığı konusunda bir fikir birliği oluşmamıştır. PÇ hamuru içerisindeki ağırlıkça %15 SD'nın, %1 H_2SO_4 çözeltisine karşı direnci bir miktar artırdığı Mehta (1985) tarafından bulunmuştur. Monteny vd. (2003) ağırlıkça %8.6 SD içeren beton üretmişler ve bu betonun %0.5 H_2SO_4 çözeltisine direncini incelemişlerdir. SD'nın sertleşmiş PÇ hamuru içerisinde çok küçük

boşluklar oluşturarak, asidin etkiyeceği temas yüzeyini artırdığını ve böylece aside direncin azaldığını ileri sürmüşlerdir. Kawai vd. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada ise, ağırlıkça %20 SD'lı ile %30 UK'lü çimento hamuru ve harç numuneler üretilmiş, pH değerleri 1 ve 2 olan H₂SO₄ çözeltileri içerisinde bekletilmişlerdir. Deneyden önceki ve sonraki CH miktarları ölçülmüştür. SD içeren numunelerin aside karşı direncinin, hem kontrol hem de F sınıfı UK'lü numunelerden çok daha iyi olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda, %30 UK'lü numunenin asit direncinin kontrol numunesine kıyasla çok daha iyi olduğu belirtilmiştir. Uchikawa (1986) ise, mineral katkı içeren sertleşmiş çimento hamurunun iyon geçirgenliğini boşluk boyutu dağılımının mükemmel olması nedeniyle azalttığını ileri sürmüştür. Bunun nedenini çimento hamuru içerisindeki CH'in azalmasına bağlamıştır. Çünkü CH'in çimento hamuru içerisinden salınımı, sertleşmiş hamurun iyon geçirgenliğini artıracaktı. Rozière ve Loukili (2011) PÇ ile ağırlıkça %30 yer değiştirmiş F sınıfı uçucu külden üretilmiş sertleşmiş çimento hamurunun pH değeri 5 olan asit içerisinde Ca²⁺ iyonu salınımının azaldığını bulmuşlardır. Durning ve Hicks (1991) ise, ağırlıkça %7.5, %15 ve %30 SD'lı betonlar üretmiş ve bunları %1 H₂SO₄ çözeltisine maruz bırakmışlardır. Kullanılan tüm SD oranlarında aside karşı direncin kontrol betonuna kıyasla azaldığını görmüşlerdir. Ancak düşük pH değerine sahip bir ortamda C-S-H yapısının dengesinin SD sayesinde iyileştiğini de ileri sürmüşlerdir. Monteny vd. (2003) ağırlıkça %8.6 SD içeren beton numunenin %0.5 H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki direncinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Chang vd. (2005) da, %7 SD ve %33 UK içeren betonların %1 H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki dayanıklılığının arttığını ileri sürmüşlerdir.

Bu çalışmada, SD ve UK'lü PÇ harçlarının, pH değeri 3.5 olan H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki Ca²⁺ iyon salınımları incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Numune Hazırlama (Sample Preparation)

Bu çalışmada, hazırlanan numunelerin üretimi ve özellikleri Türk (2012) tarafından detaylı bir şekilde verilmiştir. Harç numune karışımlarında, CEM I 42,5N tipi PÇ, F sınıfı UK ve SD kullanılmıştır. Malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri (Chemical and physical properties of materials)

Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl ⁻	LOI	Yoğunluk	Özgül yüzey (cm ² /g)
PÇ	20.2	5.8	3.23	64.1	-	2.66	0.006	2.58	3.10	3484
UK	58.82	19.65	10.67	2.18	3.92	0.48	-	0.91	2.08	3812
SD	91	0.58	0.24	0.71	0.33	-	-	1.84	2.20	96.5%<45µm

Harç numunelerin karışımında kullanılan malzemelerin miktarları da Tablo 2'de verilmiştir. Bu çalışmada, beton sektöründe en çok kullanılan SD ve UK oranları seçilmiştir. Kontrol karışımı sadece PÇ içermiştir. Diğer karışımlarda ise, PÇ+UK ve PÇ+SD bağlayıcılar kullanılmıştır. Mineral katkı içeren karışımlarda, PÇ miktarı azaltılmış ve azaltılan bu PÇ miktarı yerine mineral katkı kullanılmıştır. Kontrol karışımında 640 kg/m³ PÇ kullanılmıştır. F sınıfı UK'nın PÇ ile yer değiştirmeleri ağırlıkça %25, 30 ve 35 ve SD'nin %5, 10 ve 15'tir (Türk, 2012). Kendiliğinden yerleşen harç numunelerinin hazırlanması işleminde ASTM C109 (2013) standardı takip edilmiş ve taze karışım testleri ise, EFNARC (2005)'a göre yapılmıştır. EFNARC (2005)'ta istenilen taze karışım özellikleri, karışımların su/bağlayıcı oranı (W/B) ya da süper akışkanlaştırıcı (SA) miktarları değiştirilerek deneme-yanılma yöntemiyle sağlanmıştır. Karışımlarda dere kumu kullanılmış olup, en büyük tane çapı 2 mm'dir. EFNARC (2005)'ın belirttiği özellikleri sağlayan taze harç karışımlarıyla 50×50×25 mm'lik numuneler üretilmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve 90 gün boyunca su içerisinde kür edilmiştir. Bu süre sonunda, numuneler 60 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar, 48 saat süreyle kurutulmuş ve iyon salınımı deneyine hazır duruma getirilmiştir.

Tablo 2. Numunelerde kullanılan malzemelerin miktarları (The amount of materials used in samples)

Karışımlar	W/B (%)	PC (%)	UK (%)	SD (%)	Binder (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	SA (kg/m ³)
Kontrol	0.45	100	0	0	640	1227	6.75
UK25	0.43	75	25	0	640	1194	6.75
UK30	0.43	70	30	0	640	1181	6.75
UK35	0.43	65	35	0	640	1168	6.75
SD5	0.44	95	0	5	640	1230	8
SD10	0.45	90	0	10	640	1203	8
SD15	0.47	85	0	15	640	1159	8

2.2. Ca²⁺ İyon Salınımı Deneyi (Ca²⁺ Leaching Test)

Beton ya da çimento hamurunda iyon salınımının ölçülmesiyle ilgili olan herhangi bir standart bulunmadığından, bu çalışmada basit bir kimyasal yöntemle iyon salınımı deneyi yapılmıştır. Deneyde kavanoz, saf su, H₂SO₄, karıştırıcılar ve sıcaklık kontrollü bir oda kullanılmıştır. Deneyde kullanılan sıvıların sıcaklığı 23 °C'dir. Kavanozlar içerisinde pH değeri 3.5 olan çözeltiler hazırlamak için, tüm kavanozlar belirli bir seviyeye kadar eşit miktarda saf suyla dolduruldu. Çözeltinin pH değerinin 3.5'e ayarlanması işleminde H₂SO₄ kullanıldı.

Hazırlanmış olan numuneler içerisinde çözelti bulunan kavanozlara yerleştirildi ve 24 saat bekletildi. 24 saatin sonunda, kavanozların içerisindeki sıvı karıştırıldıktan sonra 5 ml çözelti alındı ve tüpler içerisine doldurularak buzdolabında saklandı. Eksilen çözelti miktarı kadar saf su tekrar kavanozlar içerisine eklendi ve çözeltilerin pH değerleri tekrar H₂SO₄ kullanılarak 3.5 değerine ayarlandı. Bu işlemler 6 gün boyunca devam etti. Tüm numuneler için toplamda 42 adet çözelti elde edildi. Toplanan numuneler Perkin Elmer Optima 5300DV ICP-OES marka bir cihaz kullanılarak Ca²⁺ iyonlarının miktarı mg/L olarak bulundu.

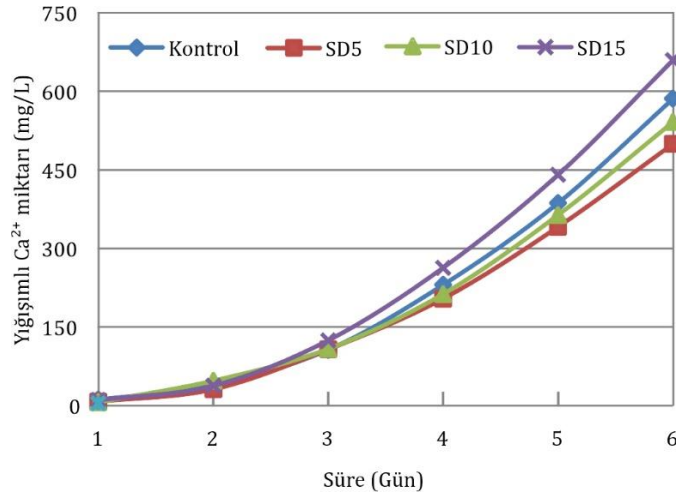
3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Numunelerin süreye bağlı yığılımlı Ca²⁺ iyon salınımları Şekil 2 ve 3'te gösterilmektedir. Bu çalışmada, beton teknolojisinde en çok kullanılan SD ve UK oranları dikkate alınarak numuneler üretilmiştir. Numunelerin hepsinde de Ca²⁺ iyonu salınım miktarları süreye bağlı olarak üstel bir şekilde artmıştır. 6 günlük toplam Ca²⁺ iyonu salınım miktarları da Şekil 4'te gösterilmiştir. %25, %30 ve %35 oranlarında UK içeren numunelerin Ca²⁺ iyon salınım miktarları, kontrol numunesine kıyasla etkili bir şekilde azalmıştır. Ancak %30 UK içeren UK30 numunesindeki iyon salınımı miktarı, UK25 ve UK35 numunelerinden daha az olmuştur.

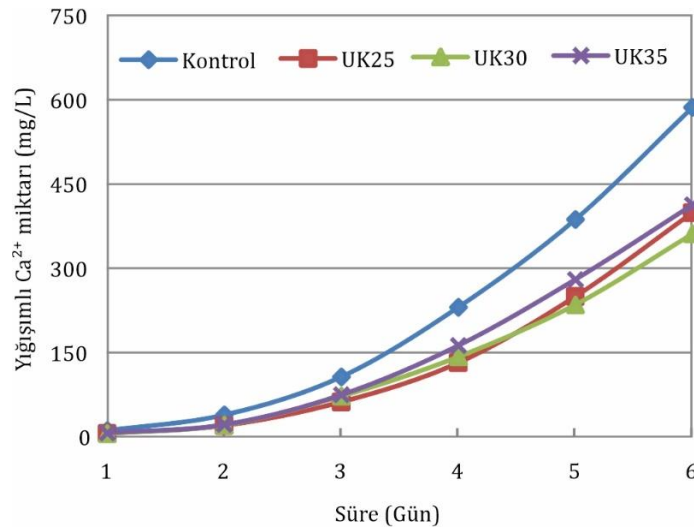
SD'lı numunelerde, sırasıyla %5 ve %10 SD içeren SD5 ve SD10 numunelerindeki Ca²⁺ iyon salınım miktarları, kontrol numunesinden daha az olmuştur. Ancak %25 SD içeren SD25 numunesindeki Ca²⁺ iyon salınım miktarı, kontrol numunesine kıyasla daha fazla olmuştur. Kontrol, SD5, SD10 ve SD15 numunelerinden, % 5 SD içeren SD5 numunesindeki Ca²⁺ iyon salınımı değeri en az olmuştur. Çimento hamuru içerisinde kullanılan SD'nın Ca²⁺ iyon salınımına, dolayısıyla, H₂SO₄ asidi çözeltisine gösterdiği direnç kullanılan SD miktarına göre değişmektedir. SD'lı ile UK'lü numuneler karşılaştırıldığında, UK'lü numunelerin Ca²⁺ iyonu salınım miktarlarının, SD'lı numunelerdeki salınımlardan daha az olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, UK içeren numunelerin SD'lı numunelere kıyasla genel olarak Ca²⁺ iyonu salınımını etkili bir şekilde azalttığı söylenebilir.

Bu çalışma sonuçları ile literatürdeki çalışmaların sonuçları arasında SD'nın etkisiyle ilgili olarak bazı çelişkiler olmasına rağmen, genel itibariyle özellikle UK'ün etkisiyle ilgili durum uyuşmuştur. Bu çalışma ve literatürdeki mevcut çalışmaların sonuçları Tablo 3'te düzenli bir şekilde verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan SD ve UK'ün ağırlıkça % miktarları Tablo 3'ün 2. ve 3. sütununda verilmiştir ve 4. sütunda da asit direnci İyi/Kötü olarak belirtilmiştir. Aside karşı direncin iyi ya da kötü olması durumu, her bir çalışmanın kendi kontrol numunesiyle karşılaştırmalar yapılarak belirlenmiştir.

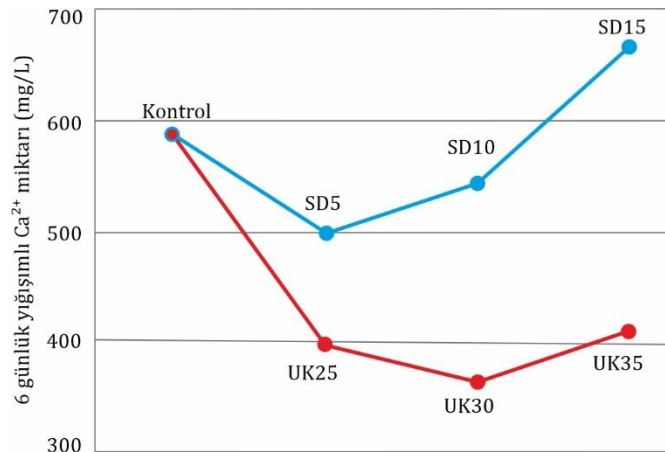
Tablo 3'te görüldüğü gibi, ağırlıkça %15 SD oranında asit direncinin iyi olduğu Mehta (1985) tarafından belirtilmiştir. Ancak Durning ve Hicks (1991) ağırlıkça %15 SD oranının aside karşı direnci kötüleştirdiği bulunmuştur. Ağırlıkça %20 SD oranında asit direncinin iyi olduğunu Kawai vd. (2008) tarafından ileri sürülmüştür. Durning ve Hicks (1991) ise, ağırlıkça %30 SD oranında aside karşı direncin kötü olduğunu bildirmiştir.



Şekil 2. Kontrol ve SD numunelerinde iyon salınımı (Ion leaching of Control and SD samples)



Şekil 3. Kontrol ve UK numunelerinde iyon salınımı (Ion leaching of Control and UK samples)



Şekil 4. 6 günlük yığılımlı iyon salınımı miktarları (Cumulative ion leaching for 6 days)

Monteny vd. (2003) ağırlıkça %8.6 SD oranında, Durning ve Hicks (1991) ağırlıkça %7.5 SD oranında asit direncinin kötü olduğu ileri sürmesine karşın, bu çalışmada ağırlıkça %5 ve %10 SD oranlarında asit direncinin iyi olduğu bulunmuştur. Chang vd. (2005) ağırlıkça %7 SD ve %33 UK içeren ikili karışımın asit direncini iyi yönde artırdığını ileri sürmüşlerdir. Görüldüğü gibi, SD'lı numunelerin asit direnciyle ilgili var olan sonuçlar birbirleriyle çelişkilidir. Konuyla ilgili olan geçmişteki çalışmalarda genellikle beton ya da harç numuneler kullanılmıştır. SD'lı numunelerin aside karşı direncinin belirlenmesinde, çimento türü, su/çimento oranı ve boşluk miktarı gibi parametreler de dikkate alınarak değişik kombinezonlarda PÇ-SD hamurlarının üretilmesi, üretilen bu numunelerin mikro-düzeyde incelenmesinin daha gerçekçi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Kawai vd. (2008) ile Roziere ve Loukili (2011), ağırlıkça %30 UK oranında asit direncinin iyi olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada da ağırlıkça %30 UK oranının asit direncini etkili bir şekilde iyileştirdiği bulunmuştur. Chang vd. (2005) %33 UK içeren karışımın asit direncini iyi yönde artırdığını ileri sürmüşlerdir. Görüldüğü gibi, literatürde F sınıfı UK'le ilgili var olan çalışmaların sonuçlarıyla, bu çalışmada elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyusmaktadır.

Tablo 3. Kontrol numunelerine kıyasla SD ve UK'lü numunelerin asit direnci.

No	% SD	% UK	Asit Direnci	Kaynaklar
1	15	-	İyi	(Mehta, 1985)
2	20	-	İyi	(Kawai vd., 2008)
3	8.6	-	Kötü	(Monteny vd., 2003)
4	7.5;15;30	-	Kötü	(Durning ve Hicks, 1991)
5	7	33	İyi	(Chang vd., 2005)
6	5;10	-	İyi	Bu çalışmada
7	15	-	Kötü	Bu çalışmada
8	-	30	İyi	(Roziere ve Loukili, 2011)
9	-	30	İyi	(Kawai vd., 2008)
10	-	25;30;35	İyi	Bu çalışmada

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışmada, UK ve SD içeren harç numunelerin aside karşı göstermiş olduğu dirençlerle ilgili olarak aşağıdaki önemli bulgular elde edilmiştir.

F sınıfı UK içeren numunelerin aside karşı göstermiş olduğu direnç, SD'lı numunelerin asit dirençlerinden çok daha iyi olmuştur. Numuneler içerisinde ağırlıkça %25, %30 ve % 35 F sınıfı UK kullanımı, asit direncinin bir göstergesi olan Ca^{2+} iyon salınımını önemli ölçüde azaltmıştır. Ağırlıkça %30 UK durumunda, Ca^{2+} iyon salınımı en az olmuştur. UK'ün asit direnciyle ilgili olarak bu çalışmada bulunan sonuçlar ile literatürdeki çalışmaların sonuçları uyum içerisinde dir.

Ağırlıkça %5 ve %10 SD içeren numunelerin Ca^{2+} iyon salınımı, kontrol numunesinden daha az olmuştur. Ancak ağırlıkça %15 SD kullanımı aside karşı direnci oldukça kötüleştirmiştir. SD'lı numune grubu içerisinde, ağırlıkça %5 SD içeren numunede Ca^{2+} iyonu salınımı en az olmuştur. Literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında, SD'nın asit direncine etkisi halen tartışmalıdır. Asit direnciyle ilgili geçmişte yapılan çalışmalarda, ya SD'lı beton ya da harç numuneler kullanılmıştır. Bunların yerine, SD'lı çimento hamurlarının kullanılması ve durumun mikro-düzeyde incelenmesi daha gerçekçi sonuçlar verecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Birimi (HÜBAK) tarafından, 16197 numaralı proje ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı HÜBAK'na teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM International, 2013.
- Chang, Z.T., Song, X.J., Munn, R., Marosszeky, M., 2005. Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulfuric acid attack, *Cem Concr Res* 35(8), 1486-1494.
- Durning, T.A., Hicks, C., 1991. Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemicals, *Concr Inter* 13(3), 42-48.
- EFNARC (2005). The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use.
- Hewlett, P., Lea's chemistry of cement and concrete. Elsevier, 2003.
- Kawai, S., Williams, M. Y., Nishoni, W., 2008. Deterioration of cement hydrates containing mineral admixtures due to sulphuric acid attack, in: 11DBMC Int. Conf. Durab. Mater. Components, pp. 1203-1205.
- Mehta, P.K., 1985. Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes, *Cem Concr Res*. 15, 969-978.

- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. Concrete. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- Monteny, J., Belie De, N., Taerwe, L., 2003. Resistance of different types of concrete mixtures to sulfuric acid, *Mater Struct* 36(4), 242–249.
- Monteny, J., Vincke, E., Beeldens A., De Belie N., Taerwe L., Van Gemert D., 2000. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulphuric acid corrosion of concrete, *Cem Concr Res.* 30 (4), 623–634.
- Rozière, E., Loukili, A., 2011. Performance-based assessment of concrete resistance to leaching, *Cem Concr Compos* 33, 451–456.
- Taylor, H.F.W., *Cement Chemistry*. Thomas Telford, London, 1997.
- Torraca, G., *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2009.
- Turk, K., 2012. Viscosity and hardened properties of self-compacting mortars with binary and ternary cementitious blends of fly ash and silica fume. *Constr Build Mater*, 37, 326–334.
- Uchikawa, H., 1986. Effect of blending components on hydration and structure formation. *8th Int. Congr Chem Cem* 1, 250–280.