

KONYA II. ORGANİZE SANAYİ BÖLGESİNDE SÜLFATLI SU İÇEREN ZEMİNLERDE OLUŞTURULAN BETONARME KAZIKLARDA BETON TAŞIMA GÜCÜNE SÜLFATIN ETKİSİ

¹Mustafa YILDIZ, ²Elvan ÜRÜN

¹Selçuk Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, KONYA

²Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Öğrencisi, KONYA

musyildiz@selcuk.edu.tr , elvanurun@msn.com

ÖZET: Betonarme yapısal elemanlar deniz ortamlarında veya sülfatlı su içeren zeminlere yerleştirildiği zaman sülfat iyonunun varlığı bu tür elemanlarda bozulmalara neden olur. Türkiye’de İç Anadolu’nun güneyinde Konya’dan başlayan Kayseri, Sivas, Erzurum üzerinden Iğdır ilinin iç kesimlerine kadar uzanan sülfatlı bir hat mevcuttur. Konya II. Organize sanayi Bölgesinde jips içerikli ve yer altı suyunda bol miktarda sülfat bulunan kil zeminler üzerine inşa edilen çok katlı yapılarda taban basıncına bağlı olarak üstteki kil zemin tabakalarının zayıf taşıma gücünden dolayı yapı yükleri, kazıklı temel vasıtasıyla genelde 22 metre derinlikteki sert kil veya çakıl tabakalarına oturtulmaktadır. Yer altı su seviyesi 6-9 m derinlikte olup imal edilen kazıklar sülfat içerikli su içerisinde kalmakta ve beton bu su içerisinde prizini almaktadır. Bu çalışmada Portland ve Yüksek fırın cürüflü çimento kullanarak mevcut yer altı suyu koşullarında ve uzun dönemde kazıklarda beton taşıma gücünde ne tür değişiklik olacağı araştırılmıştır. Betonun sülfata dayanımı ile ilgili günümüzde yapılan çalışmaların çoğunluğunda, prizini almış ve mukavemetini kazanmış betonun sülfatlı sulara dayanımı araştırılmıştır. Sülfatlı su içeren zeminlerde oluşturulan betonarme kazıklarda ise beton prizini sülfatlı ortamda almaktadır. Yapılan çalışmada bu şekildeki bir ortamda portland çimentosundan ve yüksek fırın cürüflü çimentodan oluşturulan beton numunelerinde önemli mukavemet kayıpları olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yüksek fırın cürüflü çimento, Betonarme kazıklar, Konya II.Organize Sanayi Bölgesi, Sülfat etkisi, Portland çimentosu

Sulfate Effect on the Bearing Capacity of Concrete Used for the Reinforced Concrete Piles Constructed on the Soils Involving Sulfate at the Second Industrial Region of Konya

ABSTRACT: Structural reinforced concrete members deteriorate, when they are used in marine environments or placed inside the soils involving sulfated water. In Turkey, a sulfated soil line beginning from the Central Anatolia (South of Konya City) and lying on the line of Kayseri, Sivas and Erzurum cities ends at the inner parts of Iğdır. The structural loads of the multi-storey buildings constructed in Konya 2nd Organized Industrial Region were transferred to the soil layers of hard clay and gravel using the pile foundation system of 22 m deep due to the weak load carrying capacity of the upper soil layers involving gypsum and large amount of sulfate. Since the groundwater level was at about 6-9 m depth, the concrete of the constructed piles completed its setting period inside the sulfated water. In this study, Portland Cement and Blast Furnace Cement were used to determine the variations of the bearing capacity of concrete for the piles under groundwater conditions in a long period of time. Most of the recent studies performed on the resistance of concrete against sulfate were applied on the concrete specimens that have completed their setting periods and gained their strengths. However, concrete completed its setting period inside the sulfated medium for the cases where the reinforced concrete piles were constructed on the soils involving sulfated water. This study showed that the

concrete specimens produced under aforementioned conditions using Portland Cement and Blast Furnace Cement had considerable strength losses.

Keywords: Blast Furnace Cement, Reinforced Concrete Piles, Second Organized Industrial Region of Konya, Sulfate effect, Portland Cement.

GİRİŞ

Betonarme yapısal elemanlar deniz ortamlarında veya sülfat tuzları bulaşmış yer altı suyu ve zeminlere yerleştirildikleri zaman sülfat iyonlarının varlığı, betonda yapısal bozulmalara neden olur. Sülfat iyonlarının varlığından dolayı beton bozulması üzerine çalışmalar uzun yıllardır devam etmektedir.

Yapılan çalışmaların çoğunluğunda, çeşitli çimento sınıflarından elde edilmiş harçların ve betonların prizini alması ve mukavemetini kazanması sağlandıktan sonra farklı sülfat türleri ve konsantrasyonlarına maruz bırakılarak yapıda ve mukavemette meydana gelen değişimler incelenmiştir (Amin ve diğ, 2000; Tosun ve diğ, 2009).

Beton üzerinde sülfatın etkisi karmaşık bir işlemdir ve çimento tipi, sülfat katyon tipi, sülfat yoğunluğu ve maruz kalma süresi sülfat direncini etkileyebilir (Cohen, 1991; Neville, 2004).

Sülfat nüfusunun zararlı etkisi, sülfat iyonlarının sertleşmiş betondaki alüminli (C_3A) ve kalsiyumlu $Ca(OH)_2$ bileşenlerle kimyasal reaksiyona girerek, hacmi çok artan etrenjit ve alçı oluşturmaktan kaynaklanmaktadır. Reaksiyon ürünleri, sertleşmiş betonda genleşme yaratarak agrega-çimento hamuru aderansının olumsuz yönde etkilenmesine, çatlak oluşumuna ve geçirimsizliğin artmasına yol açar. İleri derecedeki etkilenmelerde ise betonun tamamen dağılması söz konusudur. Sülfat saldırısı gibi dış kaynaklı iyon girişi sebebiyle oluşan kimyasal reaksiyonlarda çimentonun kimyasal bileşiminin kontrolü kadar, betonun geçirimsizliği de önem kazanmaktadır (ASTM C 1012, 1995; Baradan ve diğ, 2002; Yazıcı, 2006).

Katı, kuru tuzlar betona zarar vermezler ancak su ile birlikte bulunmaları sonucu, sertleşmiş çimento harcıyla reaksiyona girerler. Bazı killer alkali magnezyum ve kalsiyum sülfat

gibi kimyasal maddeler içerir, bunlar yer altı suyuyla birleşince zararlı etki ortaya çıkar.

Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri çoğunlukla sodyum sülfattır. Ancak magnezyum sülfata da birçok bölgede rastlanır. Na_2SO_4 , $Ca(OH)_2$ ve C_3A ile, $CaSO_4$ ise yalnızca C_3A ile reaksiyona girer. Deniz suyunda da bulunabilen $MgSO_4$, $Ca(OH)_2$ ve C_3A 'nın yanı sıra kalsiyum silikat hidrate (CSH) yapıyla da reaksiyona girebilmektedir (Neville, 1997; Baradan ve diğ, 2002).

Betonarme yapıların sülfat direnci sülfatın betona girmesi kontrol edilerek ve sülfat etkisi engellenerek geliştirilebilir. Betonda sülfat etkisinin engellenmesi ise ASTM tip I çimentosunun Tip II'ye veya tip V'e veya çimento içine uçucu kül, yüksek fırın cürufu, volkanik kül ve ince öğütülmüş puzzolanların katılması ile sağlanabilir (Dikeon, 1975; Hossain, 1999).

Puzzolanlar, $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önlerler ve sadece Portland çimentosu kullanımı ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki $Ca(OH)_2$ ve C_3A oranının azaltılmasını sağlar (Akman, 1992; Mehta ve Monteiro, 1997; Yeğinobalı, 1999).

Düşük C_3A 'lı ASTM tip V çimentosu sülfatlı çevrelerde oluşturulan betonarme yapılarda tavsiye edilir. ASTM tip I çimentosu %8 ve %12 arasında C_3A , tip II çimentosu %8'den az C_3A , ve tip V çimentosu %5'den daha az C_3A içerir (Rasheeduzzafar ve diğ, 1990).

Uçucu kül, silika dumanı, yüksek fırın atığı gibi malzemelerin çimento ile karıştırılarak kullanılması sülfatlı ortamlarda tavsiye edilir. Bu tür oluşturulmuş çimento betonlarının sülfat direnci betonun fiziksel özellikleri ve bileşimine bağlı olduğu kadar, sülfat iyonunun konsantrasyonuna bağlıdır. Uçucu kül ve silika dumanı karıştırılmış çimento betonlarının sülfat direncinin yüksek olduğu çeşitli araştırmacılarca ifade edilmiştir (Frigione ve Sersal, 1989; Al-Amoudi, ve diğ, 1994).

Sülfat penetrasyonu, beton yoğunluğunun artırılması, suyun çimento oranına göre azaltılması, uygun kür, yüzey işlemi ve yerinde dökme beton yerine prefabrik beton kullanılması ile önlenebilir (Miyagawa, 1991).

Konya II Organize Sanayi Bölgesinde konu ile ilgili yapılan çalışmalar

Ağacık (1986), tarafından yapılan bir çalışmada; bölge zemininde sülfat miktarının 5000mg/kg, zemin suyunda sülfat miktarının 3000 mg/l, magnezyum miktarının ise 1500 mg/l nin üzerinde olduğunu tespit etmiş, ortamın beton üzerine çok kuvvetli zararlı etki yapacağını belirtmiştir.

Bölge yeraltı suyunda ve bölge zemininde bulunan sülfat, magnezyum ve klor iyonlarının standartlarda belirtilen değerlerin çok üzerinde olduğunu belirten Yılmaz (1989) bölgede drenaj sorunun çözülmediği takdirde fiziki yapıların inşaatında çeşitli sorunlarla karşılaşılacağını bildirmiştir.

Bölge topraklarının bol miktarda jips ve sülfat iyonu içerdiğini belirten Akçelik (1986), zeminin konsolide olmadığını ve konsolidasyon oturmalarının sorun olacağını işaret etmiştir. Onüçyıldız (1989), bölgede yer alan yapıların korozyona uğramasında, bölge zemini ve yer altı suyunda bulunan sülfat, magnezyum ve klor iyonlarının etkili olduğunu bildirmiştir.

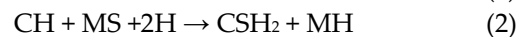
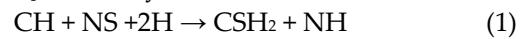
Bu çalışmada sülfatlı su içeren zeminlerde oluşturulan betonarme kazıklarda beton taşıma gücüne sülfatın etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla II. Organize Sanayi Bölgesinden 30*30*35cm' lik çelik kaplar ile örselenmemiş zemin örnekleri alınmıştır. Alınan bu örnekler içerisine D=15 cm H=30 cm olan silindirik çaplı delikler açılmıştır. Bu örnekler laboratuvar ortamında havuzlara yerleştirilmiş, araziden alınan sülfatlı su bu havuzlara konulmuş, zemin örnekleri içerisinde hazırlanan standart deliklere, Portland ve Yüksek fırın cürufu çimentodan hazırlanan betonlar dökülmüştür. Numunelerin bu ortamda priz almaları ve mukavemet kazanmaları sağlanarak, dışarıda su küründe bekletilen eş numunelere göre basınç dayanımlarındaki değişim incelenmiştir. Burada silindir çaplı beton numuneler geometrik olarak mini kazık

tipini yansıttığından gerçeğe yakın bir model deney olarak düşünülmüştür.

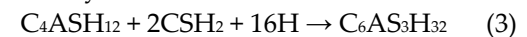
Sülfat Etkisi Karşısında Betonda Yer Alan Reaksiyonların Mekanizması:

Portland çimentosu klinkerinin küçük bir miktar alçıtaşı ile öğütülmesi sonucunda elde edilen portland çimentosunda, C₂S, C₃S, C₃A ve C₄AF gibi ana bileşenler yer almaktadır. Çimento ve suyun birleşmesiyle, bu ana bileşenler su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve değişik hidratasyon ürünlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Çimentodaki C₂S ve C₃S ana bileşenlerinin hidratasyonu, çimento hamuruna bağlayıcılık sağlayan kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin yanı sıra, kalsiyum hidroksit (CH) oluşmasına yol açmaktadır. C₄AF ve özellikle C₃A ile çimento içerisinde yer alan alçının ve suyun arasındaki reaksiyonlar ise, etrenjit (C₆AS₃H₃₂), ve kalsiyum - alumino - monosülfhidrat (C₄ASH₁₂) gibi ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çimento ve su arasındaki reaksiyonlar sonucunda, çimento hamurunun yapısında yer alan başlıca hidratasyon ürünleri, C-S-H, CH, ve kalsiyumalumino- sülfhidratlardır. Hem C₄ASH₁₂, hem de C₆AS₃H₃₂, çimento hamurunun genişmesine yol açmaktadır, özellikle, C₆AS₃H₃₂, çok büyük genişleme yaratma kapasitesine sahiptir. Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularda sodyum sülfat (Na₂SO₄) veya magnezyum sülfat (MgSO₄) gibi sülfatlar bulunduğu takdirde, betonda iki tür (veya iki aşamalı) reaksiyonların yer almasına neden olmaktadır;

1. Sertleşmiş çimentonun bünyesinde hidratasyon ürünü olarak yer almakta olan kalsiyum hidroksit ile sülfatlar arasındaki reaksiyonlar sonucunda alçıtaşı oluşmasına yol açan reaksiyonlar,



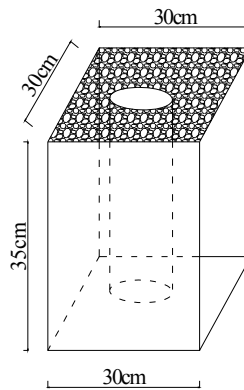
2. Sertleşmiş çimentonun bünyesinde bulunan yarı-kararlı yapıdaki C₄ASH₁₂ ile sülfat etkisiyle oluşmuş olan alçıtaşı arasındaki reaksiyonlar sonucunda C₆AS₃H₃₂ oluşmasına yol açan reaksiyonlar.



(Yukarıdaki formüllerdeki CH, NS, H, CSH₂, MS, NH, MH, C₄ASH₁₂ ve C₆AS₃H₃₂, sırasıyla, kalsiyum hidroksitin, sodyum sülfatın, suyun, alçıtaşının, magnezyum sülfatın, sodyum hidroksitin, magnezyum hidroksitin, kalsiyumalümino – monosülfhidratın ve etrenjitin çimento, kimyasındaki sembollerle gösterilmiş halidir.) Sertleşmiş betonun içerisinde alçıtaşı oluşması bir miktar genişlemeye yol açmaktadır. Ancak, asıl genişleme, alçıtaşı ve yarı kararlı durumdaki kalsiyumalümino – monosülfhidrat arasındaki reaksiyonlar sonucunda yer almaktadır. Sertleşmiş betonun içerisinde etrenjit kristallerinin oluşması, çok büyük genişlemeler yaratmakta, betonun çatlayıp parçalanmasına yol açmaktadır

Sodyum Sülfatın ve Magnezyum Sülfatın Etkilerinin Karşılaştırılması:

Yukarıda bahsedildiği gibi, hem sodyum sülfat, hem de magnezyum sülfat, betonun içerisinde alçıtaşı oluşmasına ve yarı-kararlı durumdaki C₄ASH₁₂ ürünlerinin etrenjit durumuna gelmesine yol açmaktadırlar. Ancak, magnezyum sülfatın beton içerisindeki reaksiyonları alçıtaşının oluşmasına yol açan reaksiyonlarla sınırlı değildir. Magnezyum sülfat, çimento hamurunun bağlayıcılığını sağlayan kalsiyumsilika – hidrat (C₃S₂H₃) jelleri ile de reaksiyona girmekte, bu jellerin bir miktarının çözünmesine neden olmaktadır:



Bu reaksiyon sonucunda oluşan SHX (silis jeli), magnezyum hidroksit (MH) ile reaksiyona girerek bağlayıcılık değeri olmayan kristal magnezyum silikat oluşmasına yol açmaktadır. Sonuç olarak, betonun içerisine sızan sularda bulunan magnezyum sülfat, sodyum sülfat gibi genişleme yaratmakta ve ayrıca betondaki çimentonun bağlayıcılık değerini azaltabilmektedir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, Sülfatlı su içerikli zemin içerisinde dökülen betonun mukavemetinde meydana gelen değişiklikleri belirlemek amacıyla II. Organize sanayi bölgesinden yaklaşık 4 m derinlikte 30*30*35cm lik çelik kaplar ile örselenmemiş zemin örnekleri alınmıştır (Şekil 1). Alınan bu örnekler içerisine standart silindirik çaplı numuneler için (D=15 cm H=30 cm) delikler açılmıştır (Şekil 2).

Arazide sondaj kuyusundan alınan sülfatlı su, laboratuara taşınmış (Şekil 3), galvanizli sacdan oluşturulan havuzların içerisine dökülmüştür. Araziden alınan zemin örnekleri numaralandırılmış ve su almaları sağlanacak şekilde havuzlara yerleştirilmiş, bu örnekler içerisine açılan (D=15 cm H=30 cm) deliklere portland ve yüksek fırın curufllu çimentodan hazırlanan betonlar dökülmüştür (Şekil 4). Betonların üzeri örtülerek bu sülfatlı su içerisinde piriz almaları sağlanmıştır. Aynı betonların standart dayanımını belirlemek amacıyla eş silindir numuneler alınıp su küründe bekletilmiştir (Şekil 5).

Şekil 1. Araziden Numune Alınması.



Şekil 2. Kalıp içerisindeki zeminin örneklerine standart silindir beton numuneler için delik açılması.



Şekil 3. Arazide sondaj kuyusundan sülfatlı suyun çekilmesi ve laboratuara taşınması.



Şekil 4. Zemin örnekleri içerisinde açılan deliklere hazırlanan betonun dökülmesi.



Şekil 5. Eş silindir beton numunelerin hazırlanması.

Araziden alınan sülfatlı suya ait kimyasal özellikler belirlenmiş ve TS – 3440 değerleri ile karşılaştırılmış, sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2 de verilmiştir. Ayrıca belirli dönemlerde havuzlardan ve depodan sülfatlı suya ait numuneler alınarak sülfat konsantrasyonundaki değişim incelenmiştir.

Laboratuar incelemesinden zemin suyunun yüksek oranda Magnezyum, Sülfat ve Klorür içerdiği ve TS3440'a göre betonu çok kuvvetli etkileyecek derecede olduğu tespit edilmiştir.

Araziden çelik kalıplar içerisinde alınan zemin örneklerine ait laboratuar deney sonuçları Tablo 3'de, mineralojik analiz sonuçları Tablo 4'de verilmiştir. Zemin düşük plastisiteli kil olup içerisinde jips mevcuttur. Beton numune

hazırlamada maksimum dane çapı 22 mm olan 4 çeşit kırma taş agregası kullanılmıştır. Karışımlarda % 25 oranında 0–2 mm kırma kum, %23 oranında 0–4 mm kırma kum, %25 oranında 4–15 mm ince çakıl ve %27 oranında 15–22 iri çakıl seçilmiştir. Portland çimento tipi için 300 kg/m³ çimento dozaj, Yüksek fırın curuflu çimento tipi için 350 kg/m³ çimento dozajı kullanılmış olup su/çimento oranı 0,5 seçilerek ve 21 cm çökme hedeflenerek karışım hesapları yapılmıştır. Karışımlarda normal çeşme suyu kullanılmıştır. Deneyde kullanılan portland ve Yüksek fırın curuflu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler ile ana bileşenleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 1. Konya II. Organize Bölgesinde Yeraltı Suyunun Kimyasal Analiz Deney Raporu (Laboratuarda kullanılan su).

| Numunenin Alındığı Yer | Konya II. Organize Sanayi Bölge Müdürlüğü | | | |
|---|---|--------|---------------|------------------|
| | Formülü | Birimi | Analiz sonucu | Analiz metotları |
| pH (25°C) | | | 6,8 | TS-3440 |
| Kireç Çözücü (serbest Karbondioksit) | CO ₂ | mg/l | 9,0 | TS-3440 |
| Amonyum | NH ₄ ⁺ | mg/l | 0,1 | TS-3440 |
| Magnezyum | Mg ⁺⁺ | mg/l | 2583,7 | TS-3440 |
| Sülfat | SO ₄ ⁼ | mg/l | 3720,0 | TS-3440 |
| Klorür | CL ⁻ | mg/l | 12656,5 | TS-3440 |

Tablo 2. Beton Temas Sularının Zararlı Etkinlik Dereceleri İçin Sınır Değerleri TS – 3440.

| Parametreler | | Zayıf | Kuvvetli | Çok kuvvetli |
|--------------|------|---------|----------|--------------|
| pH | | 6,5–5,5 | 5,5–4,5 | <4,5 |
| Kireç Çözücü | mg/l | 15–30 | 30–60 | >60 |
| Amonyum | mg/l | 15–30 | 30–60 | >60 |
| Magnezyum | mg/l | 100–300 | 300–1500 | >1500 |
| Sülfat | mg/l | 200–600 | 600–3000 | >3000 |

Tablo 3. Zemin numunelerine ait Laboratuar deney sonuçları.

| Derinlik (m) | ωn (%) | γ _n kN/m ³ | LL (%) | PL (%) | PI (%) | 4 (%) | 200 (%) | USC | Ø _u | Cu (kN/m ²) | e _o | Cc |
|-----------------|-----------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|-----|----------------|----------------------------|----------------|-----------|
| 4 | 25,6-28,4 | 19,0-19,24 | 33,1-44,5 | 18,2-18,9 | 14,9-25,6 | 98-100,0 | 82-94,6 | CL | 1-3 | 35-65 | 0,6-0,8 | 0,10-0,20 |

Tablo 4. Zemin numunelerine ait Mineralojik analiz sonuçları.

| Tüm Kayaç | | | | | Kil Fraksiyonu | | | | |
|------------|-------------|---------------|----------------|------------------|----------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Kil (%) | Mika (%) | Kalsit (%) | Dolomit (%) | Feldispat (%) | Kuvars (%) | İllit (%) | Simektit (%) | Kaolonit (%) | Klorit (%) |
| 39-56 | 11-27 | 9-18 | 5-13 | 7-9 | 3-7 | 38-50 | 11-28 | 21-29 | 9-12 |

Tablo 5. Kullanılan Portland ve YFC çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

| | SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) | K ₂ O (%) | Na ₂ O (%) | SO ₃ (%) | Kızdırma Kaybı | İncelik cm ² /g | Özgül Ağırlık | C ₃ A (%) | C ₄ AF (%) |
|----------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|
| YFC | 29,50 | 8,75 | 2,25 | 51,72 | 5,01 | 0,45 | 0,50 | 1,67 | 0,1 | 4500 | 2,95 | - | - |
| Portland | 21,0 | 5,0 | 4,2 | 65,0 | 3,0 | 0,60 | 0,20 | 1,5 | 0,50 | 4280 | 3,10 | 6,5 | 11,5 |

Tablo 6. Sülfatlı su içerikli zemin içerisinde ve dışarıda oluşturulan beton numune sayısı ve bekleme süresi.

| Numune çap ve yüksekliği D=15 cm H= 30 cm | Portland çimentolu beton 300 dozajlı | | YFC çimentolu beton 350 dozajlı | |
|---|---|----------|---|----------|
| | Sülfatlı su içerikli Zemin örneği içinde | Dışarıda | Sülfatlı su içerikli zemin örneği içinde | Dışarıda |
| 7 günlük için | 4 adet | 3 adet | 4 adet | 3 adet |
| 28 günlük için | 4 adet | 3 adet | 4 adet | 3 adet |
| 90 günlük için | 4 adet | 3 adet | 4 adet | 3 adet |
| 180 günlük için | 4 adet | 3 adet | 4 adet | 3 adet |

Portland ve Yüksek fırın curufllu çimento bileşimli hazırlanan beton karışımları, havuzlara yerleştirilen sülfatlı su içeren zemin örnekleri içinde daha önceden hazırlanan silindir şeklindeki (D=15cm H=30cm) deliklere ve dışarıdaki silindir numune alma (D=15cm H=30cm) kaplarına aşağıdaki Tablo 6'ya göre dökülmüştür. Bu şekilde sülfatlı su içerikli zemin içerisindeki oluşturulan beton numunelerinin 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük ve 180 günlük dayanımları araştırılmıştır. Sülfatlı su içerikli zemin örnekleri içindeki beton numunelerin birer tanesinin içine donatı konularak donatının korezyona uğrayıp uğramadığı kontrol edilmiştir.

Sülfatlı su içeren zemin örnekleri içindeki beton numunelerinin bu ortamda piriz almaları ve mukavemet kazanmaları, dışarıdaki numunelerin ise pirizini aldıktan sonra su küründe bekletilerek mukavemet kazanmaları sağlanmıştır. Belirli sürelerde havuzdaki sülfatlı suyun kimyasal analiz yapılmış, buharlaşmaya bağlı olarak sudaki sülfat, klor ve magnezyum miktarının arttığı görülmüştür. Araziden getirilen suyun depolandığı depodan havuzlara buharlaşan su yerine ilave su konulmuş, havuzların üzerine naylon örtü örtülerek buharlaşma önlenmeye çalışılmıştır.

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

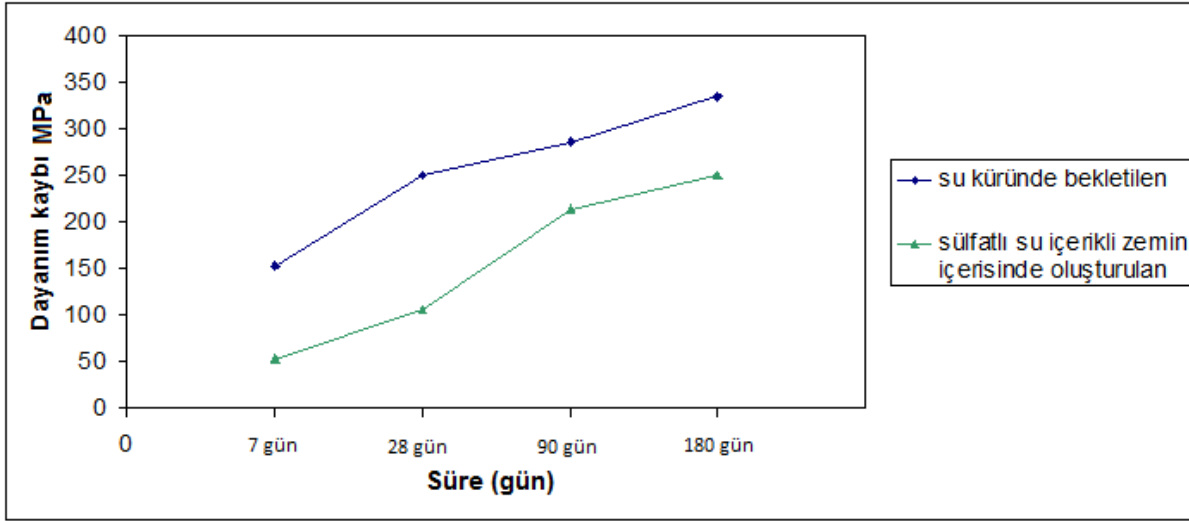
Yapılan deneysel çalışmada 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük ve 180 günlük sürelerde sülfatlı su içerikli zemin örnekleri içerisinde ve

dışarıda su küründe bekletilen numuneler çıkarılarak basınç dayanımları belirlenmiştir.

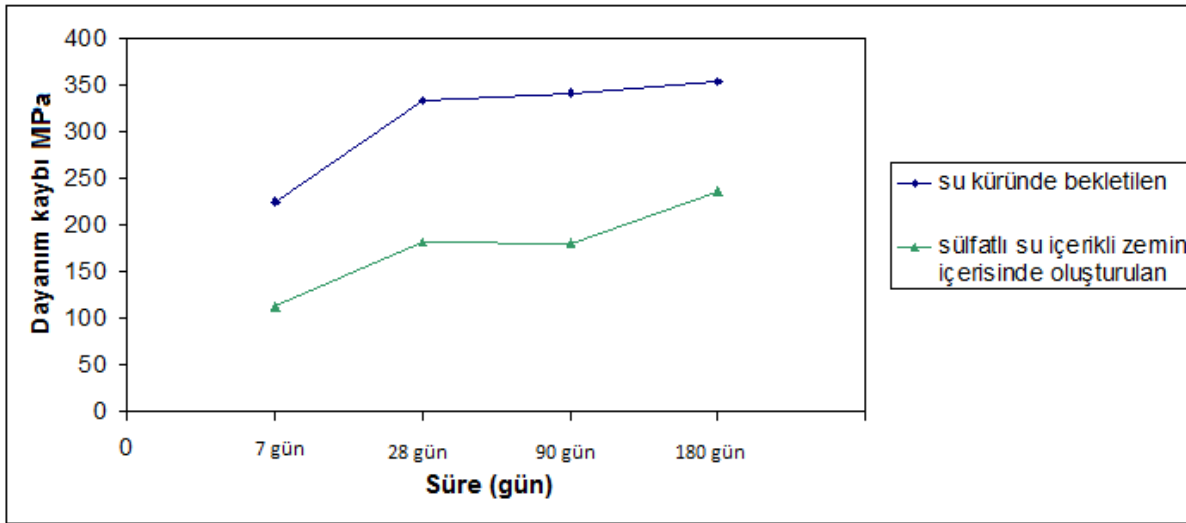
Portland çimentolu ve 300 dozajlı betonların dayanımları Şekil 6'da, YFC çimentolu ve 350 dozajlı betonların dayanımları Şekil 7'de verilmiştir.

Sülfatlı su içerikli zemin örnekleri içerisinde Portland çimentolu (300 dozajlı) ve YFC çimentolu (350 dozajlı) oluşturulan (bekletilen) beton örneklerinin, su küründe bekletilmiş kontrol örneklerine göre dayanım kayıpları ve bağıl basınç dayanımları Şekil 8'de verilmiştir.

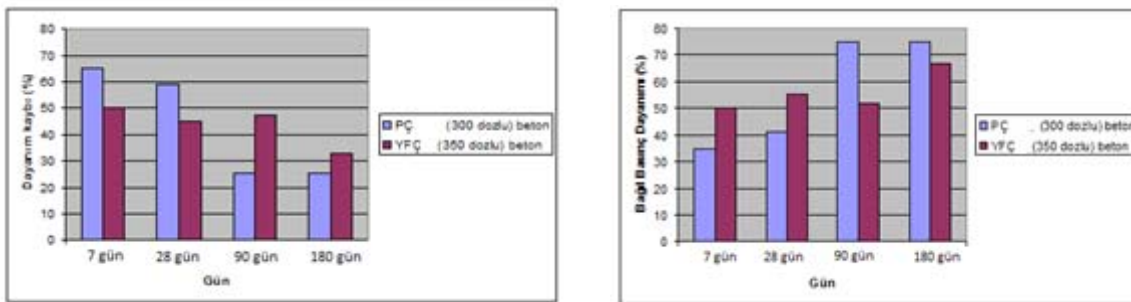
Deney sonuçları değerlendirildiğinde, Portland ve YFC çimentodan hazırlanan ve su küründe saklanan silindir numunelerin standart basınç dayanımlarını sağladıkları görülmüştür. Bu numuneler için standart silindir limit basınç değeri Portland çimentolu beton için 25 MPa, YFC çimentolu beton için 30 MPa'dır. Sülfatlı su içerikli zemin içerisinde oluşturulan ve bu ortamda piriz artması ve mukavemet kazanması sağlanan Portland çimentodan hazırlanan silindir beton numunelerinde, su küründe bekletilen numunelere göre basınç dayanım kaybı 7 günlük numunelerde %65, 28 günlük numunelerde %60, 90 günlük numunelerde %30, 180 günlük numunelerde ise %26 civarında olmuştur. Aynı ortamda piriz alması ve mukavemet kazanması sağlanan YFC çimentodan hazırlanan silindir beton numunelerinde su küründe bekletilen numunelere göre basınç dayanım kaybı 7 günlük numunelerde %50, 28 günlük numunelerde %58, 90 günlük numunelerde %50 ve 180 günlük numunelerde %32 olmuştur.



Şekil 6. Sülfat su içerikli zemin örnekleri içerisinde ve su küründe bekletilen Portland çimentolu betonların dayanım değerleri.



Şekil 7. Sülfatlı su içerikli zemin örnekleri içerisinde ve su küründe bekletilen YFÇ çimentolu betonların dayanım değerleri.



Şekil 8. Sülfatlı su içerikli zemin içerisinde oluşturulan (bekletilen) beton örneklerinin su küründe bekletilmiş kontrol örneklerine göre dayanım kayıpları ve bağıl basınç dayanımları.

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinden sülfatlı ortamlarda bekletilen numunelerin su küründe bekletilenlere göre her iki beton türü içinde nihai dayanım kaybı %30 olmuştur.

Deney sonuçları konu ile ilgili yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, sülfatlı su içerikli ortamlarda piriz alması ve mukavemet kazanması sağlanan betonların, mukavemetini kazandıktan sonra sülfatlı sulu ortamlara maruz bırakılan betonlara göre daha fazla hasar gördüğü tespit edilmiştir.

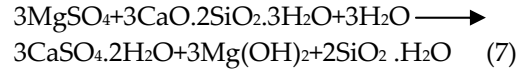
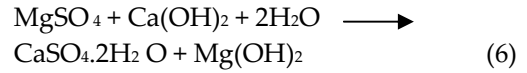
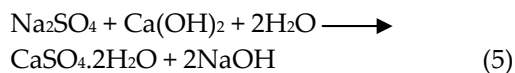
Literatür incelemesinde, genellikle portland çimentosu kullanılarak hazırlanan harç ve beton örneklerinin piriz aldıktan ve mukavemet kazandıktan sonra sülfatlı su içerikli ortamlara maruz bırakıldığı zaman mukavemetlerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Fakat YFÇ çimentodan hazırlanan harç ve betonların ise sülfatlı su içeren ortamlara maruz bırakıldıklarında beton mukavemetlerinde herhangi bir azalmanın olmadığı ifade edilmiştir. (Tosun ve diğ. 2009; Hossain ve diğ. 2006; Amin ve diğ. 2008).

Çalışmalarda sülfatın kimyasal etkisinin yanı sıra fiziksel etkisinin de betonda ciddi hasarlar oluşturabileceği ıslanma-kuruma çevriminin bu etkide çok önemli olduğu belirtilmiştir.

Sülfatlı su içerisinde piriz alması ve mukavemet kazanması sağlanan portlan çimentosu ve YFÇ çimentosundan elde edilen beton örneklerinde meydana gelen mukavemet kaybı şu şekilde açıklanabilir.

Konya II Organize Sanayi Bölgesi Yer altı suyunda TS3440 standardına göre yüksek oranda NaSO_4 ve MgSO_4 bulunması ve bunların birlikte etkimesi beton örneklerinin yalnız NaSO_4 etkisine maruz kalması veya MgSO_4 etkisine maruz kalmasından daha fazla bir etki meydana getirmiştir.

Sülfatın betona etkisi hidrate Portland çimentosu ile sülfat iyonları arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar yoluyla olur. Sülfat eriyiklerinde CaSO_4 dışında çoğunlukla mevcut olan iki katyonun (Na ve Mg) kireç ve silikatlarla reaksiyonu aşağıdaki şekildedir.



Yukarıda gösterilen iyon değiştirme reaksiyonlarında, reaksiyon ürünü olarak alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) çıkmaktadır. Hacim genişlemesi ile meydana gelen alçıtaşı sülfat etkimesinin birinci aşamasıdır; alçıtaşı sonradan daha büyük bir hacim genişlemesine yol açan etrenjite dönüşebilir. Alçıtaşının su içerisinde nispeten çözülebilir karaktere sahip olması ve sağlam yapı silikatların dahi MgSO_4 durumunda çözünür bir maddeye dönüşmeleri ve çimentonun esas taşıyıcı öğelerinin bozulması hasarın nedenleridir.

Öte yandan MgSO_4 ile CSH arasındaki reaksiyondan meydana çıkan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ beton yüzeyini ve gözenekleri erimeyen bir jel meydana getirerek tıkar ve zararlı sülfat sularının beton içerisine nüfuzunu önlemek suretiyle etrenjit oluşumunu önler. Fakat uzun vadede $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (Diğer adıyla brüsit) reaksiyonunun ortaya çıkardığı $2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (silis jeli) ile birleşerek magnezyum silikata dönüşür. Magnezyum silikat ise, kalsiyum silikatın aksine bağlayıcı nitelikten yoksundur.

(6) nolu reaksiyondan da görülebileceği gibi MgSO_4 , kireçle reaksiyona girerek alçıtaşı oluşturmaktadır. Ancak kirecin az olduğu ortamlarda MgSO_4 kireç yerine direkt olarak silikatlarla reaksiyona girebilecek ve esas yapıyı bozmak suretiyle betona zarar verecektir. Örneğin, puzolanlı çimentolarda, puzolan kireci bağladığından dolayı, kendiliğinden kireç fakiri bir ortam doğar. Bu da MgSO_4 'ün silikatlarla reaksiyona girmesine sebep olacağından, MgSO_4 'ün var olduğu ortamlarda puzolanlı çimentonun kullanılması kaçınılması gereken bir husus kabul edilmelidir.

İstanbuluoğlu (1988), yapmış olduğu çalışmada beton yoğurma suyundan en tehlikeli faktör olarak sülfat iyonlarının varlığını göstermiştir. Su içerisinde Magnezyum sülfat bulunuyorsa bu bileşik çimentonun serbest kireci ile reaksiyona girdiğini ve $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ve jips oluştuğunu belirtmiştir. Buradan da

görüldüğü üzere YFÇ çimentosundan hazırlanan betonların $MgSO_4$ eriyikleri karşısında sülfata karşı yeterli mukavemeti sağlayamamıştır. Portland çimentolarından hazırlanan betonların sülfatlı ortamlarda mukavemetlerinin azaldığı bilinen bir gerçektir.

Sülfatlı su içerikli zemin içerisinde oluşturulan silindir beton numunelerinin basınç deneyinde betondaki kırılmanın ilk önce kabuk kısmında olduğu görülmüştür. Sülfat etkisinden dolayı mukavemetini tam kazanamamış kabuk kısım çekirdek kısmından ayrılarak kırılma oluşmaktadır (Şekil 9). Buradan sülfat difüzyonu piriz süresince beton numunelerinin dış yüzeyinde çok etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca zemin örneği içerisinde dökülen beton numuneleri yeteri kadar sıkıştırılmadığından beton içinde boşluklu bir yapı oluşmakta, bu durum beton mukavemetini etkilemektedir (Şekil 10). Sülfatlı su içerisindeki klorürün donatıya olan etkisi 180 günlük donatılı numunelerin kırılması ile incelenmiş, beton yüzeyinde 5 cm içeriye yerleştirilen donatıların korezyona uğramadığı görülmüştür.



Şekil 9. 180 gün sülfatlı ortamda bekletilen YFÇ çimentolu beton numunelerinde kabuk kısmın çekirdek kısmından ayrılarak oluşan kırılma ve numune içinde oluşan boşluklar.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma alanı olarak belirlenen II. Organize Sanayi Bölgesinde araziden alınan ve laboratuara getirilen sülfatlı suyun kimyasal analizinde su içerisindeki magnezyum 2500 mg/l, sülfat 3720 mg/l ve Klorür miktarı 12656 mg/l'dir. Bu miktarların TS 3540'a göre betonun kuvvetli- çok kuvvetli etkileyecek derecede olduğu tespit edilmiştir.

4 m derinlikten alınan zemin örnekleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinde zeminin genelde taşıma gücü düşük ($C_u=35-65$ kN/m²), oturma potansiyeli yüksek ($C_c=0,1-0,20$) olan CL sınıfı kil olarak belirlenmiştir. Zemin numuneleri üzerinde tüm kayaç analizi ve kil fraksiyon analizleri yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan çimento örnekleri üzerinde yapılan kimyasal analizde betonda alçı taşı ve etrejenit oluşumu için önemli olan C_3A ve C_4AF miktarı portland çimentoda sırasıyla 6,5 ve 11,5 olup bu değer TS 10157'ye göre sülfata dayanıklı çimento için belirlenen kriterin üzerindedir. Aynı değer YFÇ çimentosu için sıfır değerinde olup, bu çimentonun sülfata dayanıklı olduğu kabul edilir.

Araziden getirilen sülfatlı su kullanılarak oluşturulan bir ortamda piriz alması ve mukavemet kazanması sağlanan Portland ve YFÇ çimentosundan hazırlanan beton numunelerinin, su küründe saklanan eş numunelere göre mukavemetinde, 28 günlük numunelerde %60, 180 günlük numunelerde ise % 30'a avaran azalma olmuştur.

Deney sonuçları literatürle karşılaştırıldığında, sülfat içerikli ortamlarda piriz alması ve mukavemet kazanması sağlanan betonların, mukavemetini kazandıktan sonra sülfatlı sulu ortamlara maruz bırakılan betonlara göre daha fazla hasar gördüğü tespit edilmiştir.

Portland çimentodan hazırlanan beton örneklerinin sülfatlı ortamda hasar görmesi ve mukavemet kaybına uğraması literatürle uyumlu bir sonuçtur.

Literatürde, YFÇ çimentodan hazırlanan harç ve beton örneklerinin sülfatlı su içeren ortamlara bırakıldığında genelde harç ve beton mukavemetlerinde herhangi bir azalmanın olmadığı belirtilmiştir. Burada çimento içindeki puzzolan, C_3A miktarını ve beton içindeki

serbest kireci azaltarak beton içinde alçıtaşı ve etrejenit oluşumunu engellediği ifade edilmiştir. Bu deneyler genelde pirizini almış ve mukavemetini tamamlamış numunelerin NaSO_4 'lı veya MgSO_4 ortamlara bırakılması ile yapılmıştır. Betonun kimyasal reaksiyonunda, MgSO_4 kireçle reaksiyona girerek alçıtaşı oluşturmaktadır. Ancak puzzolanik çimentonun kullanıldığı ortamlarda puzzolan kireci bağladığından dolayı kendiliğinden kireç fakiri bir ortam doğmaktadır. Bu durumda MgSO_4 ortamda mevcut olan MgSO_4 kireç yerine direkt olarak silikatlarla reaksiyona girmekte ve esas yapıyı bozarak betonun mukavemetini düşürmektedir. Yaptığımız çalışmada YFÇ 42.5N çimentodan oluşturulan ve sülfatlı ortamda bekletilen beton numunelerindeki mukavemet azalmasının nedeni, beton numunelerinin piriz süresini bu ortamda tamamlaması ve yukarıda bahsedilen nedenden dolayı olmuştur.

Sülfat su içerisinde bekletilen silindir beton numunelerinin basınç deneyinde kırılma kabuk kısmın çekirdek kısmından ayrılması şeklinde oluşmaktadır. Buradan sülfat difizyonunun piriz

süresinde beton numunelerinin dış yüzeyinde çok etkili olduğunu göstermiştir.

Çalışmada örnek beton numuneleri sadece 300 dozajlı Portland ve 350 dozajlı YFÇ çimento kullanılmış olup farklı beton sınıfları ve dozajları için deneyler yapılabilir.

Sülfata dayanıklı beton oluşturmada kullanılan çimento sınıfı, granülometri, su/çimento oranı kadar betonun uygun şekilde yerine yerleştirilmesi ve uygun sıkıştırma uygulanması ve gerekli bakım (kür) koşullarının sağlanması önemli husustur. Fakat zemin içerisinde oluşturulan kazık türü yapıların betonlarında bu hususun sağlanması mümkün olmamaktadır.

Bu çalışma Y. Lisans çalışması olup Çalışmamızda 180 günlük bir süreç değerlendirilmiştir. Halen sülfatlı su içerikli zemin içerisinde bir yıllık sürede değerlendirilmek üzere beton numuneler bekletilmektedir.

TEŞEKKÜR: Bu çalışmayı destekleyen Konya Organize Sanayi Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Ağacık, G., 1986. Konya II. Organize Sanayi Bölgesi Sülfat Problemi ile ilgili rapor. D.S.İ. Genel Müd. Ankara.
- Akçelik, N., 1986. Konya İkinci Organize Sanayi Bölgesi Ayaklı su deposu ve sosyal tesisler temel zemininin etüdü, TCK Genel Müd. Ankara.
- Akman, M.S., 1992. Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, R.M., Abduljauwad, S.N., 1994. Influence of chloride ions on sulphate deterioration in plain and blended cements, Mag. Concr. Res. 46 (167), pp.113–123.
- Amin, M. M., Jamaludin, S. B., Pa, F. C., Chuen, K. K., 2008. Effects of Magnesium Sulfate Attack on Ordinary Portland Cement (OPC) Mortars, Portugaliae Electrochimica Acta 26, pp. 235-242.
- ASTM C 1012, 2004. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2002. "Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)", D.E.Ü. Müh. Fak. Yayın No 298, İzmir.
- Cohen, M.D., Mather, B., 1991. Sulphate attack on concrete—research needs, ACI Mater. J. 88 (1) pp 62–69.
- Dikeon, J.T., 1975. Fly ash increases resistance of concrete to sulfate attack, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Research Report No 23, US Government Printing Office.
- Frigione, G., Sersale, R., 1989. The action of some aggressive solutions on Portland, pozzolanic and blast furnace slag cement mortars, Cem. Concr. Res. 19 (6) pp. 885–893.

- Hossain, K.M.A., 1999. Performance of volcanic ash concrete in marine environment, Proce. of 24th OWICS Conference, "21st Century Concrete and Structures" 25-26 August, Singapore, vol. XVIII, pp. 209-214.
- İstanbuluoğlu, S.,1988. Betonun basınç dayanımını etkileyen faktörler ve Ramble betonun seçimi ile ilgili bir çalışma, Madencilik dergisi, Vol 27 No:3.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 1997. "Concrete Microstructure, Properties and Materials", Indian Edition, India.
- Miyagawa, T., 1991. Durability design and repair of concrete structures: chloride corrosion of reinforcing steel and alkali-aggregate reaction, Mag. Concr. Res. 43 (156) pp. 155-170.
- Neville, A., 2004. The confused world of sulfate attack on concrete, Cem. Concr. Res. 34 (8) pp 1275-1296.
- Neville, A.M., 1997. Properties of Concrete. Final Edition, Longman Ltd., England.
- Onüçyıldız, M., 1991. Konya İkinci Organize Sanayi Bölgesi zemin ve yer altı suyunun beton üzerine etkisi. TMMOB İMO Konya Şubesi dergisi pp. 1-43.
- Rasheeduzzafar, F.A. Dakhil, A.S., Al-Gahtani, S.S., Al-Saadoun, M.A., 1990. Influence of cement composition on the corrosion of reinforcement and sulfate resistance of concrete, ACI Mater. J. 87 (2) pp. 114-122.
- Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B., Altun, A. İ., 2009. Portland Kalkerli Çimento Bölüm II-Sülfat Dayanıklılığı, İMO Teknik Dergi, s.4737-4757.
- Yazıcı, H., 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi. Deü Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 8 Sayı: 1 s. 51-58.
- Yeğınobalı, A., 1999. "Betonun Dayanıklılığı II, Kimyasal Etkenler", TCMB Çimento Araştırma Enstitüsü Seminer Notları, Ankara.
- Yılmaz, T., 1989. Konya Çumra Ovası Sulama proje alanında drenaj sorunu, Konya Ovası Projeleri Paneli, Konya.