

## **VI. OTURUM**



# BETONARME DENİZ YAPILARINDA KLORÜR DİFÜZYONUNUN DONATI KOROZYONUNA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Nabi YÜZER

Yard.Doç.Dr.

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi  
İstanbul, Türkiye

Fevziye AKÖZ

Doç.Dr.

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi  
İstanbul, Türkiye

## ÖZET

Silis dumanı katkılı ve katkısız beton ile üretilmiş betonarme elemanlarda klorür difüzyonunun donatı korozyonuna etkileri hızlandırılmış korozyon deneyi ile araştırılmıştır. Numuneler, prefabrike betonarme kazıkları temsilen 28. güne kadar suda, 180 gün süre ile  $Cl^-$  konsantrasyonu 0 (su), 1500, 10000 ve 40000 mg/L olan NaCl çözeltilerinde tutulmuştur. Hızlandırılmış korozyon deneyinde, betonarme elemandaki donatıya sabit gerilim ve sabit aderans gerilmesi uygulanmıştır. Donatıdaki akım şiddetinin ve betondaki deformasyonların zamana bağlı değişimi kaydedilmiş, donatıdaki pas ürünü nedeni ile beton yüzeyinde çatlağın olduğu an tespit edilmiştir. Klorür difüzyonunun donatı korozyonuna etkileri araştırılmış, silis dumanının betonarme elemanların performansını artırdığı görülmüştür.

## 1. GİRİŞ

Deniz yapıları, çelik, beton, betonarme, öngerilmeli beton veya çelik lifli beton ile inşa edilirler. Farklı iklim koşullarında, farklı konsantrasyonlardaki klorür, sülfat, nitrat vb. içeren suların etkisinde kalan bu yapılarda, dayanıklılığı dolayısı ile servis ömrünü etkileyen en önemli faktör korozyon hasarıdır. Zararlı etkilere maruz yapı elemanlarında dayanıklılık (durabilite), yapıda ve laboratuarda yapılan zahmetli ve uzun süren deney ile

araştırılır. Deneylerden hızlı sonuç alınması için numuneler, laboratuarda benzeşimi yapılan hızlandırılmış ve şiddetlendirilmiş etkenlerin etkisinde bırakılır.

Korozyon, çevrenin elektro-kimyasal etkisi ile oluşan ve özellikle metallerde önemli hale gelen malzeme kaybı olarak tanımlanır (1). Su veya çözeltiye daldırılan metalin çözelti ile temas eden yüzeyinde elektriksel yük dengesizliği oluşur, bu yük dengesizliğini karşılamak için, çözeltideki yüklü iyonların dağılımı değişir, bu durum metal-çözelti arayüzünde yüksek bir potansiyel gradyentinin oluşumuna neden olur. Arayüzdeki küçük bir potansiyel değişimi, elektronların metale veya metalden çözeltiye geçişini kolaylaştırır. Elektron alışverişi şeklinde gelişen bu reaksiyonlara elektro-kimyasal reaksiyonlar denir (2). Elektro-kimyasal süreç, birbirinden ayrı fakat aynı zamanda meydana gelen oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarından oluşur. Anot reaksiyonu adı verilen oksidasyon, metalin sulu ortamda elektron kaybederek katyona dönüşmesidir, elektron kaybeden metal elemana anot adı verilir. Katot reaksiyonu adı verilen redüksiyon ise ortaya çıkan elektronların sarfedilmesidir.

Korozyon sonucu demir yüzeyinde oluşan demirhidroksitin hacmi, demire göre yaklaşık 1.5 ~ 6 kat daha büyüktür. Bu hacim artışı betonarme elemanlarda donatıda meydana gelir ise betonun çekme dayanımı düşük olduğu için betonda çatlak oluşumuna ve parça atmasına neden olur (3, 4). Gevrek bir malzeme olan betonun çekme mukavemeti, basınç mukavemetinin 1/8 ile 1/14'ü arasında değişir. Basınç etkisindeki kısalma oranı 2000-4000  $\mu D$  değerini alırken, çekmede kopma uzama oranı ~300  $\mu D$  mertebesinde (5). Betonun çekme dayanımının ve çekmede kopma uzama oranının çok düşük olması nedeni ile korozyon ürününün hacim artışı sonucu, betonun çatlaması kaçınılmazdır. Donatı yüzeyinde oluşan demiroksit veya demirhidroksit tabakasının bünyeden ayrılması kütlede çok küçük mertebelerde ağırlık kaybına neden olur (6). Kütledeki dolayısı ile donatı kesitindeki ihmal edilebilir kayıpların bile demirhidroksit hacminin çok büyük olması nedeni ile betonu çatlattığı, deneysel çalışmalar ile de gösterilmiştir (7). Betonda çatlak oluşması, korozyon hasarı başlangıç süresi için esas alınan önemli bir parametredir. Çünkü donatının çapına bağlı olarak metalde 10-50 $\mu$ 'luk kayıp sonucu oluşan demiroksit, 2-3 cm'lik beton örtünün çatlaması için yeterlidir. Bu, 10-30  $\mu$ /yıl gibi küçük korozyon hızında beton örtünün 1-3 yıl içinde çatlayacağı anlamına gelir (8). Andrade ve diğerleri (7) tarafından yapılan bir çalışmada, donatıdaki 10-20  $\mu$  gibi çok küçük kayıpların betonda,

0.05-0.1 mm gibi gözle görülebilir genişlikte çatlak oluşumuna neden olduğu tespit edilmiştir.

Betonarme elemanlarda donatı korozyonunun araştırılması amacı ile yapılan hızlandırılmış korozyon deneylerinde, sisteme ya sabit gerilim uygulanarak, beton içinden geçen akım şiddeti ölçülür ya da akım şiddeti sabit tutularak gerilim ölçülür. Bu tür çalışmalarda ayrıca donatıda ağırlık kaybı, yarı hücre potansiyelinin değişimi ve betonda çatlak oluşumu gibi ölçüm ve gözlemler değerlendirilir (7, 9, 10).

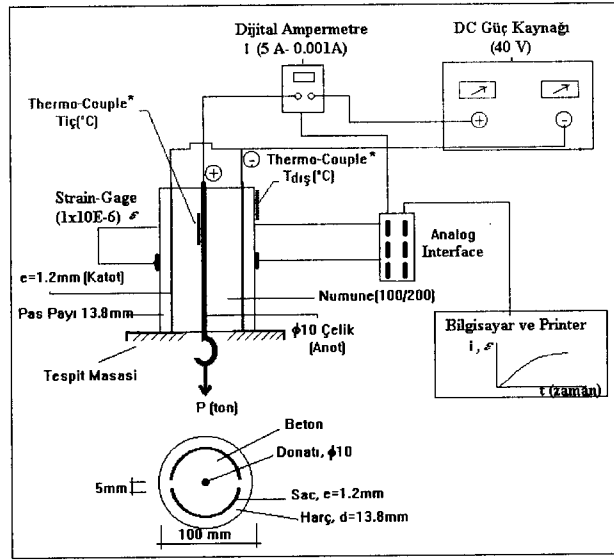
## 2. AMAÇ

Bu çalışmada, donatıya sabit gerilim ve betonarme yapıyı temsilen sabit aderans gerilmesi uygulanmış, akım şiddetinin ve betondaki deformasyonların zamana bağlı değişimi kaydedilmiştir. Donatı korozyonuna klorür etkisi, beton ve betonarme elemanlarda serbest  $Cl^-$  tayini, akım şiddeti ve deformasyon ölçümleri yapılarak araştırılmıştır.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Betonarme elemanlarda korozyonun araştırılması amacı ile düzenlenen deneysel çalışma, numunelerin üretimi, kürü, eskitme süreci ve kontrol deneyleri olmak üzere başlıca dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

Betonarmeye  $Cl^-$  iyonlarının dışarıdan difüzyonunu temsil etmek üzere numuneler, farklı konsantrasyonlarda  $Cl^-$  iyonu içeren çözeltilerde bekletilmiş, klorürün donatı korozyonuna etkisi, beton ve betonarme elemanlarda serbest  $Cl^-$  tayini, akım şiddeti ve deformasyon ölçümleri yapılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen Şekil 1'deki hızlandırılmış korozyon deney düzeneğinde, donatıya sabit aderans gerilmesi ve sabit gerilim uygulanmış, akım şiddeti ve betondaki deformasyonlar ölçülmüş, kaydedilmiş ve etkiler zamanın fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Daha önceki benzer çalışmalarda ise sisteme ya sabit gerilim uygulanarak akım şiddeti ölçülmüş ya da akım şiddeti sabit tutularak donatıda korozyon oluşumu hızlandırılmış ve betonda çatlak oluşumu sadece gözlenmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi  
\* Zamana bağlı sıcaklık değişimi ön deneylerle belirlenmiştir

Beton üretiminde özellikleri Tablo 1’de verilen PÇ 42,5 çimentosu ve silis dumanı, özellikleri ve karışım oranı Tablo 2’de verilen agregalar, katı madde oranı %30 olan melamin formaldehit esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Klorür difüzyonunu temsilen numuneler 0, 1500, 10000 ve 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> içeren farklı konsantrasyonlardaki NaCl’li çözeltiler içinde saklanmıştır. Silis dumanı, betona üretim aşamasında çimento ağırlığının %0, %10 ve %20’si oranında çimento ile yer değiştirmeli olarak katılmış, su/bağlayıcı oranı 0.45 ile sabit tutulmuştur. Kesiti Şekil 1’de verilen 36 adet silindir numuneye, anot olarak özellikleri Tablo 3’te verilen 10 mm çapında 36 cm uzunluğunda I-a inşaat çeliği ve katot olarak 1.2 mm kalınlığında 2 adet sac yerleştirilmiştir. Serbest klorür miktarı ayrıca 36 adet 10/20 silindir numunede araştırılmıştır.

Numuneler üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, çözeltilere konulacağı 28. güne kadar 20±1 °C sıcaklıktaki suda saklanmıştır. Eskitme süreci için 28. gün başlangıç kabul edilmiş, 180. günde çözeltiden çıkarılan numuneler hızlandırılmış korozyon deney setine yerleştirilmiştir. Numuneler, silis dumanı katkı oranına ve klorür konsantrasyonuna bağlı olarak; silis dumanı katkısızlar SF0, %10 silis dumanı katkılılar SF1, %20 silis dumanı katkılılar SF2; suda saklananlar W0, çözeltisi 1500 mg/L Cl<sup>-</sup> içerenler W1, 10000 mg/L Cl<sup>-</sup> içerenler W2 ve 40000 mg/L Cl<sup>-</sup> içerenler W3 olarak kodlanmıştır.

Tablo 1. Çimento ve silis dumanının kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

| Kimyasal Özellikler (%)                  | Portland Çimentosu | Silis Dumanı |
|------------------------------------------|--------------------|--------------|
| CaO                                      | 65.24              | 5.36         |
| SiO <sub>2</sub> (Çözünen)               | 21.28              | 88.70        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 3.96               | 1.05         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 4.19               | 1.95         |
| MgO                                      | 1.28               |              |
| SO <sub>3</sub>                          | 1.73               |              |
| Kızdırma Kaybı                           | 1.14               | 1.95         |
| Çözünemeyen Kalıntı (max)                | 0.42               |              |
| Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )       | 3.14               | 2.00         |
| Özgül yüzey, Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | 3101               | -            |
| Priz süresi, Vicat (dak.)                |                    |              |
| - Başlangıç                              | 200                | -            |
| - Bitiş                                  | 310                | -            |
| Mineralojik Bileşimler (%)               |                    |              |
| C <sub>3</sub> S                         | 63.03              |              |
| C <sub>2</sub> S                         | 13.45              |              |
| C <sub>3</sub> A                         | 3.40               |              |
| C <sub>4</sub> AF                        | 12.75              |              |

Çizelge 3.2 Çimento ve silis dumanının kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri ve karışım oranları

| Agregalar                           | Kırmaş I<br>(kalker esaslı) | Kırmaş II<br>(kalker esaslı) | Kum<br>(silisesaslı) |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------|
| Yoğunluk (kg/dm <sup>3</sup> )      | 1,36                        | 1,41                         | 1,50                 |
| Özgül ağırlık (kg/dm <sup>3</sup> ) | 2,62                        | 2,69                         | 2,54                 |
| Karışım oranları (%)                | 30                          | 30                           | 40                   |

Tablo 3. Donatının mekanik ve kimyasal özellikleri

| Mekanik özellikler |                          |                          |                       | Kimyasal özellikler |          |           |           |          |          |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| Φ<br>(mm)          | f <sub>sy</sub><br>(MPa) | f <sub>su</sub><br>(MPa) | ε <sub>u</sub><br>(%) | Fe<br>(%)           | C<br>(%) | Si<br>(%) | Mn<br>(%) | P<br>(%) | S<br>(%) |
| 10                 | 294                      | 485                      | 32                    | 98.79               | 0.140    | 0.132     | 0.539     | 0.0097   | 0.0246   |

### 3.1. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi

Hızlandırılmış korozyon deneyinde beton içinden geçen akım şiddeti ve donatının korozyonu nedeni ile meydana gelen hacim artışının betonda oluşturduğu deformasyonlar, belirli zaman aralığı ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Bu deney grubu için üretilen kesiti Şekil 1’de görülen 100/200 mm boyutlu 36 adet silindir numunenin tam ortasına, 10 mm çapında donatı ve donatıdan 30 mm dışarıya 1.2 mm kalınlığındaki yarım silindir biçiminde iki adet sac, aralarında 5 mm boşluk kalacak şekilde karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Silindir saclar arasında 5 mm’lik boşluk bırakılmasının nedeni; anot durumundaki donatının korozyonu ile meydana gelecek hacim artışının betonda oluşturacağı çatlağın bu bölgeye yönlendirilmesi ve deformasyonların bu bölgede ölçülebilmesidir. Sisteme sabit gerilim

uygulayan doğru akım kaynağı, donatı anot, sac elemanlar katot olacak şekilde bağlanmıştır. Mikhailov & Taylor-Broms'a göre adezyonun geçmesine neden olan aderans gerilmesi 0.5-1.5 MPa değerleri arasındadır (11). Bu değerler dikkate alınarak, donatı-beton arayüzünde 0.5 MPa'lık aderans gerilmesi oluşturulmak üzere donatıya Şekil 1.'de görüldüğü gibi sabit kuvvet uygulanmıştır.

Uygulanan 40 V'luk sabit gerilim değeri ön deneylerde farklı gerilimler uygulanarak seçilmiştir. Ön deneylerde donatı-beton arayüzüne ve numunenin yanal dış yüzeyine birer tane termo-couple yerleştirilmiş (Şekil 1) ve 40 V'luk sabit gerilim altındaki sıcaklık artışları zamana bağlı olarak ölçülmüş, arayüzde maksimum sıcaklığın 40 °C'ye ulaştığı görülmüştür. Bu sıcaklık betonda ve donatıda yapısal değişikliğe neden olmayacağından, 40 V'luk gerilim uygun bulunmuş, numunenin dış yüzeyindeki deformasyonu ölçmek için, 40 °C sıcaklıkta deformasyonu sıfıra çok yakın olan ve birbirine dik doğrultularda ölçüm yapabilen Strain-gauge seçilmiştir.

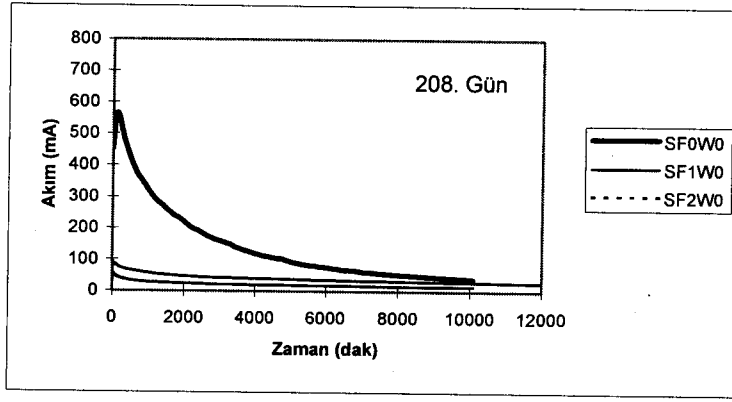
Hızlandırılmış korozyon deneylerinde deney düzeneğine aynı anda 3 numune yerleştirilmiş, akım şiddeti 1 mA, deformasyonlar ise  $2.25 \times 10^{-6}$  duyarlık ile başlangıçtan itibaren 1'er dakika ara ile ölçülmüş, yedinci güne kadar bilgisayara kaydedilmiştir. Betonun çatlamasına izin verilen bölgelerin tam ortasına karşılıklı iki yüzeye yerleştirilen strain-gauge'ler ile ilk çatlağın yüzeye ulaştığı an 1 dakika duyarlık ile belirlenebilmiştir. Başlangıçtan çatlağın tespit edildiği ana kadar geçen süre kritik süre (tcr) olarak adlandırılmıştır..

### 3.2 Serbest Cl<sup>-</sup> Tayini

Serbest klorür miktarının zamanla değişiminin araştırıldığı numuneler eskitme sürecinden sonra iki yarım silindir parçaya ayrılmış, yüzeyden itibaren 45-50 mm'lik derinlikten belirli noktalardan matkap yardımı ile toz numuneler çıkarılmıştır. Çıkarılan toz 600 µ elekten elenmiş, toz:su oranı ağırlıkça 1:5 olmak üzere destile su içinde 30 dakika karıştırılmış, 60 dakika dinlendirilmiş, süzgeç kağıdından filtre edilmiştir. Hazırlanan çözeltiden alınan numunede Argentometrik titrasyon yöntemi ile serbest Cl<sup>-</sup> miktarı tayin edilmiş (12), deney sonuçları Tablo 4'te verilmiştir.

#### 4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

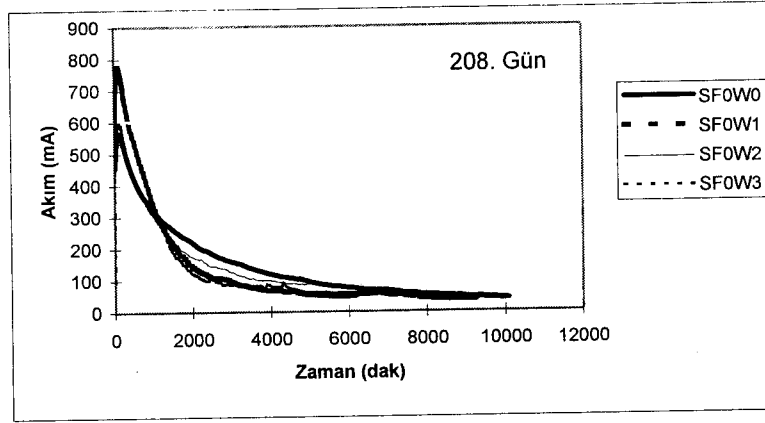
Suda bekletilen gruplara uygulanan hızlandırılmış korozyon deneyi sonuçlarından Şekil 2.'de görüldüğü gibi, silis dumanı oranının artması ile akım şiddeti azalmıştır. Örneğin, şahit grubun akım şiddetinin en yüksek değeri 570 mA iken, %10 silis dumanı katılı numunelerde 100 mA; %20 katılı numunelerde 50 mA değerindedir. Silis dumanı katılı gruplarda akım şiddetinin silis dumanı oranına bağlı olarak düşmesi, silis dumanının serbest kireci bağlaması ve  $\text{OH}^-$  iyonu miktarını azaltmasının bir sonucu olabilir.



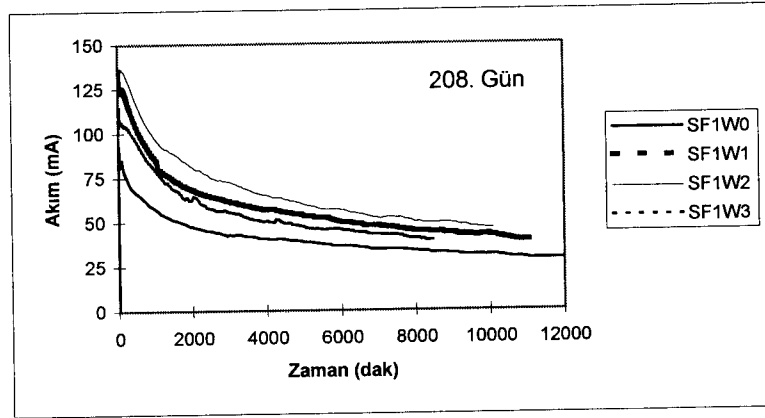
Şekil 2. Suda 208 gün bekletilen numunelerde (i-t) ilişkisi

Farklı klorür konsantrasyonlarındaki çözeltilerde 180 gün süre ile bekletilen silis dumanı katılmamış (kontrol) grubun hızlandırılmış korozyon deneyinde ölçülen akım şiddeti-zaman değişimi Şekil 3.'te gösterilmiştir. Ortamda bulunan serbest  $\text{Cl}^-$  iyonlarının elektriği daha kolay iletmesi, betonun iletkenliğinin artmasına ve akım şiddetinin daha büyük değerler almasına neden olmuştur. Ancak akım şiddeti ile  $\text{Cl}^-$  konsantrasyonu arasında anlamlı bir ilişki gözlenmemiştir. Bu olay, numunede katot oluşturmak üzere yerleştirilmiş olan yarı silindir biçimindeki sac elemanın  $\text{Cl}^-$  difüzyonunu önlemesine, iyonların bu bölgede birikmiş olmasına bağlanabilir.

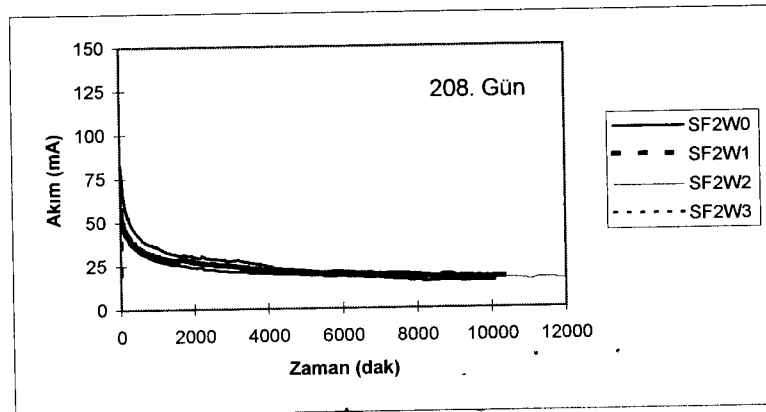
Silis dumanı katılı numunelerde klorürlü çözeltilerin dışarıdan difüzyonunda, silis dumanının betonun geçirimsizliğini artırması nedeni ile akım şiddetinde kontrol numunesine göre yaklaşık 6 kat azalma olmuştur (Şekil 4, 5), örneğin %20 silis dumanı katılı numunelerde  $\text{Cl}^-$  etkisi yok denecek kadar az olmuş, bu grupta akım şiddeti en çok 75 mA'ye ulaşmıştır.



Şekil 3. Suda 208 gün bekletilen numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi

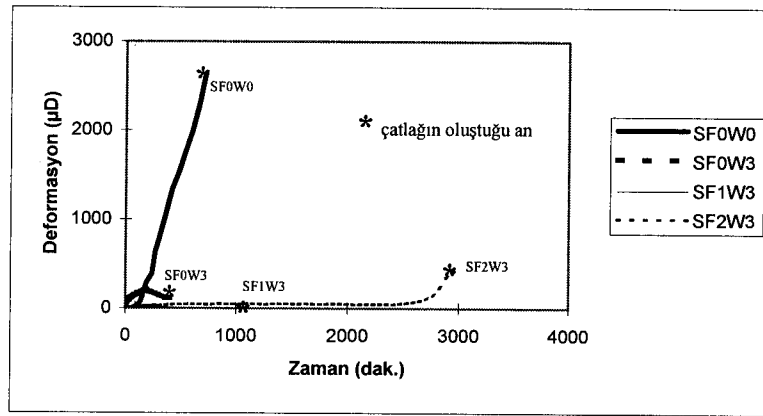


Şekil 4. %10 silis dumanı katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi



Şekil 5. %20 silis dumanı katkılı numunelerin (i-t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi

Hızlandırılmış korozyon deneylerinde akım şiddetinin silis dumanı oranı ile azaldığı görülmektedir. Bunu etkileyen önemli parametreler, betonun kuruması ile elektriksel direncin artması ve silis dumanının elektriksel iletkenliği azaltmasıdır. Ortamda klorürün bulunması, akım şiddetinin düşük değerlerinde bile, donatının korozyona uğramasına ve betonun daha kısa sürede çatlamasına neden olmaktadır. Bu nedenle, hızlandırılmış korozyon deneylerinde, sadece akım şiddetinin ölçülmesi yeterli değildir, donatı korozyonunun betonda oluşturduğu yatay ve düşey deformasyonlar ( $\mu D$ ) belirli aralıklarla ölçülmeli ve kaydedilmelidir. Bu amaçla Şekil 1’de verilen deney setinde, çatlağın oluşması ve gelişmesi numunelerin yan yüzeylerine yapıştırılan strain-gauge’ler yardımı ile yatay deformasyonlardan izlenmiştir. Beton yüzeyinde oluşan çatlak, strain-gauge’nin 20000  $\mu D$  olan limit değerini zorladığında, deformasyon-zaman grafiğinde bir pik oluşmuş, bu süre kritik çatlama süresi olarak belirlenmiştir. Kritik çatlama süresini gösteren deformasyon-zaman grafiklerine ait bir örnek Şekil 6’da, kritik çatlama süreleri ise toplu olarak Tablo 4’te gösterilmiştir.



Şekil 6. Suda 208 gün bekletilen numunelerde ( $\epsilon$ -t) ilişkisine  $Cl^-$  etkisi

Tablo 4. Kritik çatlama süreleri( $t_{cr}$ ) ve serbest  $Cl^-$  miktarı

| Numune Kodu     | SF0W0 | SF0W1 | SF0W2 | SF0W3 | SF1W0 | SF1W1 | SF1W2 | SF1W3 | SF2W0 | SF2W1 | SF2W2 | SF2W3 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $t_{cr}$ (dak.) | 780   | 1260  | 780   | 480   | *     | **    | 5400  | 1140  | *     | *     | *     | 3000  |
| $Cl^-$ (mg/L)   | 0     | 0     | 112   | 850   | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |

\* Çatlak yok.

\*\* Çatlak var ancak strain-gauge’ye ulaşmamış

Şahit numunede (SF0W0) donatı korozyonu nedeni ile oluşan deformasyonda, ilk 150 dakikadan başlayarak hızlı bir artış meydana gelmiş ve 780. dakikada oluşan gerilmeler

betonun çekme dayanımını aşmış, donatıya paralel doğrultuda çatlak oluşmuştur. %10 ve %20 silis dumanı katkılı numunelerde (SF1W0, SF2W0), 7 gün sürdürülen hızlandırılmış korozyon deneyi sonunda akım şiddeti 10 mA'in altına düşmüş, çatlak gözlenmemiştir. Buradan silis dumanının donatı korozyonuna karşı olumlu etkisi, açıkça görülmektedir. Silis dumanının bu olumlu etkisi, betonun elektriksel direncini ve çekme dayanımını artırması ile açıklanabilir. Bilindiği üzere betonda oluşan çekme gerilmelerinin, betonun çekme dayanımını aşması sonucu gerilmelere dik doğrultuda çatlak oluşur. Silis dumanı içeren betonun çekme dayanımındaki artış, donatı korozyonu ile ilgili hasarın başlangıç süresini geciktirir.

180 gün süre ile (208. günde) 1500 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltiye maruz bırakılan silis dumanı katılmamış grup (SF0W1) 1260. dakikada çatlamıştır. SF1W1 grubunda 5. günde beton üst yüzeyinde ince çatlak oluşmuş ancak strain-gauge'ye ulaşmamıştır. SF2W1 grubunda ise 7 günlük hızlandırılmış süreçte hiç çatlak gözlenmemiştir (Tablo 4). 10000 mg/L  $Cl^-$  içeren çözeltinin 180 günlük etkisindeki SF0W2 grubu 780 dakikada, SF1W2 grubu 5400 dakikada çatlamış, SF2W2 grubunda ise 7. günün sonuna kadar çatlak oluşmamıştır. 208 gün 40000 mg/L  $Cl^-$  çözeltisinin etkisindeki SF0W3 grubu, hızlandırılmış korozyon deneyi ile sadece 480. dakikada çatlatılırken, SF1W3 grubu 1140 dakikada, SF2W3 grubu 3000 dakikada çatlatılabilmektedir. Buradan silis dumanının 40000 mg/L gibi yüksek  $Cl^-$  konsantrasyonunda bile, çatlama süresi ile belirlenen korozyonu, katkısız gruba göre yaklaşık 6 kat geciktirdiği görülmektedir.

Toz numunelerde ölçülen ve Tablo 4'te gösterilen serbest klorür miktarı çözeltinin konsantrasyonu ile artmıştır. Örneğin SF0W3 grubunda yüzeyden itibaren 45-50 mm derinlikte tespit edilen serbest  $Cl^-$  miktarı 850 mg/L iken, SF0W2 grubunda aynı derinlikte 112 mg/L'dir. Aynı konsantrasyonlardaki çözeltilerde bekletilen %10-%20 silis dumanı katkılı numunelerde belirlenen serbest  $Cl^-$  miktarı yok denecek kadar azdır, çünkü konu ile ilgili çalışmalarda da belirtildiği gibi, silis dumanı katkılı betonlarda  $Ca(OH)_2$  kristalleri azalmakta, yoğun ve üniform yapıda C-S-H jeli oluşmaktadır. Silis dumanı çok ince olduğu için, çimento hamuru matrisinde ve agrega-çimento hamuru arayüzünde oluşturduğu mikroyapısal değişiklikler nedeni ile, klorür iyonu geçirgenliğini önemli ölçüde azaltmaktadır (13, 14, 15, 16, 17).

## 5. SONUÇLAR

Farklı oranlarda silis dumanı katılarak üretilen beton ile üretilen ve farklı konsantrasyonlardaki Cl<sup>-</sup> etkisinde bırakılan betonarme numunelerde yapılan hızlandırılmış korozyon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre,

1. Silis dumanı katkılı betonlardan geçen akım miktarı şahidinkinden çok daha düşük değer almıştır, bu olay silis dumanının betonun elektriksel direncini artırdığının ve korozyon akım yoğunluğunu azaltarak donatı korozyonunu geciktirdiğinin bir göstergesidir.
2. Klorür difüzyonuna maruz silis dumanı katksız betonlarda, beton içinden geçen akım miktarı Cl<sup>-</sup> konsantrasyonu ile artmış ve daha yüksek değerler almıştır. Silis dumanı katkılı betonlar, yaklaşık kuru betonun gösterdiği direnci göstermiş, silis dumanı akım şiddetini önemli oranda düşürmüştür.
3. Silis dumanı, betonun çekme dayanımını ve elektriksel direncini artırarak, donatı korozyonu nedeni ile betonda çatlak oluşumunu engellemiştir. Sadece 40000 mg/L gibi yüksek Cl<sup>-</sup> konsantrasyonundaki çözeltilerin etkisinde kalan numunelerde, betonda donatıya paralel doğrultuda çatlak oluşmuştur.

Sonuç olarak, silis dumanı betonun geçirimliliğini önemli ölçüde azaltmış, elektriksel direncini artırmıştır. Klorür geçirimliliği son derece düşük ve elektriksel direnci çok yüksek olan silis dumanı, donatıda makro ve/veya mikro korozyon hücrelerinin oluşmasını önleyerek elemanın dayanıklılığını artırmıştır.

## KAYNAKLAR

1. VanVlack, L.H. Elements of Materials Science and Engineering, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1980.
2. Çakır, A.F. "İnşaat Endüstrisinde Korozyon ve Katodik Koruma Yöntemi ile Korunma", İTÜ İnşaat Fakültesi Malzeme Semineri, 1984
3. Mehta, P.K., Concrete, Structure Properties and Materials, Printice-Hall, USA, 1986, pp.152-158.

4. Neville, A.M. and Brooks, J.J., Concrete Technology, Longman Scientific and Technical, New York, 1987, pp.275-282.
5. Akman, M.S., Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1992.
6. Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., "Betonarme Çeliğinin Korozyonuna Sodyum Klorür ve Magnezyum Klorürün Etkileri", V.Korozyon Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi Adana, 1996, s.114-123.
7. Andrade, C., Alonso, C. and Molina, F.J., "Cover Cracking as a Function of Bar Rebar Corrosion : Part I-Experimental Test", Materials and Structures, Vol :26, 1993, pp.453-464.
8. Gonzalez, J.A., Andrade, C., Alonso, C. and Feliu, S., , "Comparison of Rates of General Corrosion and Maximum Pitting Penetration on Concrete Embedded Steel Reinforcement", Cement and Concrete Research, Vol:25, 1995, 257-264.
9. Rodriguez, P., Ramirez, E. and Gonzalez, J.A., "Methods for Studying Corrosion in Reinforced Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol:46, 1994, pp.81-90.
10. Khedr, S.A. and Idriss, A.F., "Resistance of Silica Fume Concrete to Corrosion-Related Damage", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol:7, 1995, pp.102-107.
11. Karakoç, C., Aderansta Mekanik Etkileşim Olayı, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1985
12. APHA, Standard Method for the Examination of Water and Waste Water, 17th Edition, AWWA, WPEF, Washington, 1989, pp.4.66- 4.74.
13. Gautefall, O. and Havdahl, J., "Effect of Condensed Silica Fume on the Mechanism of Chloride Diffusion in to Hardened Cement Paste", III. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp.849-860.
14. Cabrera, J.G. and Claisse, P.A., "Measurement of Chloride Penetration into Silica Fume Concrete", Cement and Concrete Composites, Vol:12, 1990, pp.157-161.
15. Azari, M.M., Mangat, P.S. and Tu, S.C., "Chloride Ingress in Microsilica Concrete", Cement and Concrete Composite, Vol:15, 1993, 215-221.
16. Torii, K. and Kawamura, M., "Pore Structure and Chloride Ion Permeability of Mortars Containing Silica Fume", Cement and Concrete Composites, Vol:16, 1994, pp.279-286.
17. Mangat, P.S., Khatip, J.M. and Molloy, B.T., "Microstructure Chloride Diffusion and Reinforcement Corrosion in Blended Cement Paste and Concrete", Cement and Concrete Composites, Vol:16, 1994, pp.73-81.

## **THE EFFECTS OF CHLORIDE DIFFUSION ON REINFORCEMENT CORROSION IN MARINE CONCRETE STRUCTURES**

**Nabi YÜZER**

**Fevziye AKÖZ**

### **SUMMARY**

The effect of  $\text{Cl}^-$  diffusion on reinforcement corrosion is investigated in reinforced concrete samples that have different properties. Silica fume is added during the production in the ratios of %0, %10 and %20 to prepare reinforced samples that have different strength and properties. To represent the prefabricated reinforced piles, the samples are kept in water until the 28<sup>th</sup> day and in NaCl solution that have 1500, 10000 and 40000 mg/L  $\text{Cl}^-$  concentration for 180 days. After this process, at the 208<sup>th</sup> day, the samples are placed in to the accelerated corrosion test set. The rebar in the reinforced concrete sample is subjected to constant voltage and constant bond stress. The change in the current intensity in the rebar and the deformations in concrete by time is recorded. The time of the initial crack on the concrete surface was determined and called as critical time. By comparing the critical crack time of different samples, the performance of silica fume against corrosion was determined. According to the test results, silica fume increased the performance of reinforced concrete samples that are exposed to chloride diffusion. By using this test procedure, rapid results can be taken for the determination of the durability of reinforced concrete structures against corrosion.



## ÇİMENTO SÜLFAT DİRENCİNİN DEĞİŞİK TEST METOTLARIYLA İNCELENMESİ

Kambiz RAMYAR  
Doçent Doktor  
Ege Ün. İnşaat Müh. Böl.  
İzmir, TÜRKİYE

Gözde İNAN  
Araştırma Görevlisi  
Ege Ün. İnşaat Müh. Böl.  
İzmir, TÜRKİYE

### ÖZET

Değişik tip çimentoların sülfata dayanıklılığı ASTM C452, ASTM C1012 ve ASTM C1038 yöntemleri ile incelenmiştir. Deneylerde, bir tip portland çimentosu, bir sülfata dayanıklı çimento ve üç tip katkılı çimento kullanılmıştır. Sülfata dayanıklı çimento dışındaki çimentolar aynı klinkerden fakat farklı oranlarda ve/veya değişik mineral katkı kullanılarak üretilmiştir. ASTM C1012 yönteminde, standardın öngördüğü %5 konsantrasyonlu sodyum sülfat çözeltisine ilaveten, %3 ve %1 konsantrasyonları da uygulanmıştır. Deney sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

### GİRİŞ

Sülfat içeren nemli ortamların betonun başlıca yıpranma nedenlerinden olduğu uzun süreden beri bilinmektedir. Sülfat iyonlarının beton performansına olan etkisi günümüzde de araştırılmaktadır. 150 seneyi geçen bu sürekli araştırmanın başlıca nedenleri aşağıda sıralanmıştır (1):

- i) Son 40 senede, çimento üretim teknolojisinde oluşan gelişmelerden kaynaklanan, çimento fiziko-kimyasal özelliklerindeki değişimler.
- ii) Çimento ve beton sanayiinde mineral katkıların artan bir hızla kullanılması.
- iii) Çimento içeriği ve çimento kompozisyonunun ( $C_3A$  ve  $C_4AF$  içeriği,  $C_3S/C_2S$  oranı gibi) betonun sülfat direncine olan etkileri ile ilgili çelişkili veriler.

Yapılan araştırmalar sonucunda, betonun sülfat direncinin imento tipine, sülfat tipi ve konsantrasyonuna, beton kalitesine ve ortam koşullarına bağlı olduğu bilinmektedir (2,3). Bu faktörlerden araştırma konusu ile ilgili olan imento tipine aşağıda değinilmiştir.

Sülfatların betonu yıprattığı tüm mekanizmalarda kullanılan imento tipi büyük rol oynamaktadır. Hidratasyon ürünlerinden, kalsiyum hidroksit (CH) ve alümina içeren fazlar sülfatlardan en fazla etkilenenlerdir. %5'in üstünde  $C_3A$  içeren çimentoların hidratasyon ürünlerinde alüminanın büyük bölümü monosülfat hidrat ( $C_3A.C\bar{S}.H_{18}$  veya  $C_3A.C\bar{S}.H_{12}$ ) şeklinde oluşur (4).  $C_3A$  içeriği %8'in üstünde olursa hidratasyon ürünleri hidrogarnet ( $C_3A.CH.H_{18}$  veya  $C_3A.CH.H_{12}$ ) de içerir (1).

CH de içeren hidrate imento hamuru, sülfat iyonları ile birleştiğinde, alümina içeren yukarıdaki her iki faz etrenjit'e ( $C_3A.3C\bar{S}.H_{32}$ ) dönüşür. Etrenjit oluşumunun ise aşırı genleşmelere yol açtığı bilinmektedir. Ancak, genleşme mekanizması tam olarak açıklığa kavuşmamıştır. Etrenjit'in kristalleşmesinden kaynaklanan basınç; veya zayıf kristal yapıdaki etrenjit'in alkalın ortamda su emerek genleşmesi, öne sürülen hipotezlerden ikisidir (5). Bundan dolayı sülfatlı ortamlarda düşük  $C_3A$  içerikli çimentoların kullanımı tavsiye edilmektedir. Fakat, bu tip çimentolarda genelde  $C_3S/C_2S$  oranı ve bundan dolayı da hidratasyon ürünlerinin CH içeriği yüksektir. CH, sülfat iyonları ile alçı oluşturabilir. Alçı oluşumunda ise hidrate imento genleşir, çatlar, rijidite ve dayanım kaybına uğrar ve sonuçta kohezyonsuz bir malzeme haline gelebilir (1,5).

Raseeduzzafar v.d. (6) imentonun  $C_3A$  içeriğine ilaveten  $C_3S/C_2S$  oranının da sülfat direncinde önemli rol oynadığını belirtmiştir. Araştırmada %14  $C_3A$  içerikli bir portland imentosu yerine %20 silis dumanı kullanımı ile oluşan katkılı imentonun, %1.88  $C_3A$  içerikli sülfata dirençli bir çimentodan 1.4 kat daha fazla sülfata dirençli olduğu bildirilmiştir. Çok sayıda başka araştırmada da mineral katkıların bu konuda etkin olduğu vurgulanmıştır (5,7,8). Araştırmacılar, mineral katkıların imento sülfat direncini artırmasını aşağıdaki nedenlere bağlamıştır:

- i) Puźolanik reaksiyon sonucu CH'in ikincil C-S-H'a dönüřmesi nedeniyle sülfatlı ortamda alçı oluřumunda azalma.
- ii) imentonun bir kısmı yerine mineral katkının kullanılması ile bağlayıcı sistemde  $C_3A$  oranı azalması (katkıda aşırı  $C_3A$  bulunmadığı takdirde), bundan dolayı hidrate sistemde alüminat içeren fazların azalması.

- iii) Pozolanik reaksiyon sonucu ortamın pH değerinin azalması ( $\text{pH} < 12$ ) ve oluşabilen etrenjit'in bu gibi ortamda daha az genleşmesi.
- iv) Oluşan ikincil C-S-H'n alümina içeren hidratasyon ürünlerinin üzerini kaplaması ve bunların sülfat iyonları ile temasını ve ikincil etrenjit oluşumunu engellemesi.
- v) Oluşan ikincil C-S-H ve mineral katkının fiziksel olarak ęimento hamuru boşluklarını doldurup, geğirgenliği azaltması ile sülfatların betona sızmasının zorlaşması.

Fakat bazı araştırmalarda, hidrate ęimento hamuru boşluk sisteminde mineral katkı etkisi ile oluşan azalmanın, sülfat genleşmesi sonucu oluşan içsel basıncı arttırarak daha büyük hasara neden olduğu öne sürölmüştür. Rosheeduzzafar v.d. (6), magnezyum sülfat içeren ortamda silis dumanı (SD) ve yüksek fırın cürufu (YFC) içeren katkılı ęimentoların normal ve uçucu küllü ęimentolardan daha fazla yıprandığını göstermiştir. XRD ve SEM incelemeleri bu ęimentolarda büyük oranda alçı oluşumunu göstermiştir. Araştırmacılar, pozolanik reaksiyon sonucu CH'ten yoksun ortamda koruyucu brusit (MH) katmanının oluşamadığını, magnezyum ve sülfat iyonlarının direkt C-S-H ile reaksiyona girip amorf yapıya sahip, bağlayıcı özeliği olmayan M-S-H oluşturduğunu bildirmiştir (1,9).

Sodyum sülfatlı ortamda ise, katkılı ęimentoların, özellikle SD iğerenlerin, çok daha üstün performans gösterdiği, S/Ç oranının azalmasıyla bu etkinin daha da belirginleştiği bildirilmiştir (1,5,7,9). Sodyum sülfata dirençli ęimento üretiminde ęimentonun  $\text{C}_3\text{A}$  ve  $\text{C}_4\text{AF}$  iğeriği ile ilgili kısıtlamaların yanısıra,  $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$  oranının azaltılmasının da etkili olduğu bildirilmiştir (1,5,6).

Betonun sülfat direncini belirtmek için herhangi bir ASTM deney yöntemi mevcut değildir. Mevcut yöntemler harç numuneler üzerinde yapıldığından ve saha koşullarını yansıtmadığından eleştirilmektedir (5,8). Buna rağmen, ASTM C1012 yöntemi, iyi hidrate olmuş ęimento harcının sülfat ęözeltilsinde genleşmesini dikkate alarak, özellikle farklı bağlayıcı malzemenin sülfat direncini belirtmekte kullanılmaktadır. Numuneleri sülfat ęözeltilsinde bekletmek yerine, ASTM C452, harç karışımında  $\text{C}_3\text{A}$  reaksiyonunu hızlandırmak amacıyla belirli miktarda alçı eklenmesini önermektedir. Bu yöntemin katkılı ęimentolarda, bağlayıcı sistem yeterli mertebede hidrate olmadan sülfat etkisinde kaldığından, yanıltıcı sonuçlar verdiği bilinmektedir. ASTM C1038 ise portland ęimentořosu

bünyesindeki sülfatların etkisini incelemek amacıyla önerilen harç numunelerinin suda genleşmesine dayanan bir yöntemdir (8).

## AMAÇ

Araştırmada çimento sülfat direncini belirlemede kullanılmakta olan üç ASTM yönteminin karşılaştırılması, aynı zamanda mineral katkı türü ve içeriğinin sülfat direncine olan etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. ASTM C1012 yönteminde belirtilen %5 sülfat çözeltisi konsantrasyonuna ilaveten %3 ve %1 olmak üzere iki farklı sülfat konsantrasyonunun da çimento performansına olan etkileri araştırılmıştır.

## DENEYSEL ÇALIŞMA

### Malzeme

Deneysel çalışmada kullanılan çimentoların ve portland kompoze çimentolarda katkı olarak kullanılan uçucu kül ve trasın kimyasal analizleri ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Sülfata dayanıklı çimento dışındaki çimentolar aynı klinkerden fakat farklı oranlarda ve/veya değişik mineral katkıları kullanılarak üretilmiştir. Katkı olarak PKÇ/A 42.5 çimentosunda %3.5 uçucu kül ve %6.3 tras, diğer kompoze çimentolarda ise yalnız tras kullanılmıştır.

### Deney Yöntemleri

ASTM C452, ASTM C1012 ve ASTM C1038 deney yöntemlerine uygun olarak hazırlanan harç numunelerinin boy değişimleri standartlarda öngörülen zamanlarda belirlenmiştir. ASTM C1012 deney yönteminde belirtildiği şekilde harç küpleri 20 MPa dayanım seviyesine ulaştıktan sonra numuneler sülfat çözeltisine bırakılmıştır. Numunelerin %1, %3 ve %5 sodyum sülfat çözeltisindeki genleşmeleri, 26 hafta boyunca ölçülmüştür. ASTM C452 ve ASTM C1038 yöntemleri katkılı çimentolar için önerilmemesine rağmen, etkisinin görülmesi amacıyla çalışma programına dahil edilmiştir.

### Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Uygulanan üç deney yöntemi için, standartların öngördüğü zamanlarda elde edilen genleşme değerleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Kullanılan çimentoların fiziksel ve kimyasal özellikleri

| Özellikler                        | PÇ<br>42.5 | PKÇ/A<br>42.5 | PKÇ/A<br>32.5R | PKÇ/B<br>32.5 | SDÇ<br>32.5 | Uçucu<br>kül | Tras  |
|-----------------------------------|------------|---------------|----------------|---------------|-------------|--------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                  | 19.69      | 23.52         | 27.72          | 29.28         | 22.7        | 41,32        | 63,76 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 5.19       | 6.51          | 6.74           | 7.3           | 3.91        | 19,58        | 17,74 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 3.56       | 3.87          | 3.8            | 3.9           | 4.74        | 5,21         | 4,97  |
| CaO                               | 63.62      | 58.18         | 52.86          | 50.2          | 65.98       | 24,42        | 3,02  |
| MgO                               | 0.92       | 0.98          | 0.91           | 0.95          | 0.75        | 1,93         | 0,71  |
| K <sub>2</sub> O                  | 0.80       | 1.03          | 1.18           | 1.27          | 0.39        | 1,42         | 3,16  |
| SO <sub>3</sub>                   | 2.54       | 2.64          | 2.47           | 2.53          | 0.23        | 3,52         | 0,07  |
| Kızdırma Kaybı                    | 1.36       | 1.75          | 2.72           | 2.78          | 0.35        | 1,08         | 1,44  |
| Özgül Ağırlık                     | 3.15       | 3.06          | 2.98           | 2.94          | 3.17        | 2,49         | 2,64  |
| Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)  | 3390       | 3590          | 3790           | 3810          | 2930        | 2940         | 6160  |
| Basınç (MPa) – 2 gün              | 26.90      | 23.3          | 20             | 18.3          | 19.8        |              |       |
| Basınç (MPa) – 7 gün              | 41.20      | 39.4          | 33.5           | 31.2          | 33.7        |              |       |
| Basınç (MPa) – 28 gün             | 50.50      | 52            | 43.7           | 37.7          | 45.9        |              |       |
| Priz Başlangıcı (dak.)            | 150        | 145           | 180            | 180           | 145         |              |       |
| Priz Sonu (dak.)                  | 260        | 265           | 320            | 325           | 205         |              |       |
| % Katkı Maddesi                   | -          | 9.73          | 21.82          | 25.59         | -           |              |       |
| <b>Bileşenler(%)</b>              |            |               |                |               |             |              |       |
| C <sub>3</sub> S                  | 57.41      | 51,82         | 44,88          | 42,72         | 60.91       |              |       |
| C <sub>2</sub> S                  | 13.12      | 11,84         | 10,26          | 9,76          | 19.13       |              |       |
| C <sub>3</sub> A                  | 7.73       | 6,98          | 6,04           | 5,75          | 2.35        |              |       |
| C <sub>4</sub> AF                 | 10.82      | 9,77          | 8,46           | 8,05          | 14.41       |              |       |
| C <sub>3</sub> S/C <sub>2</sub> S | 4,38       | 4,38          | 4,38           | 4,38          | 3,18        |              |       |

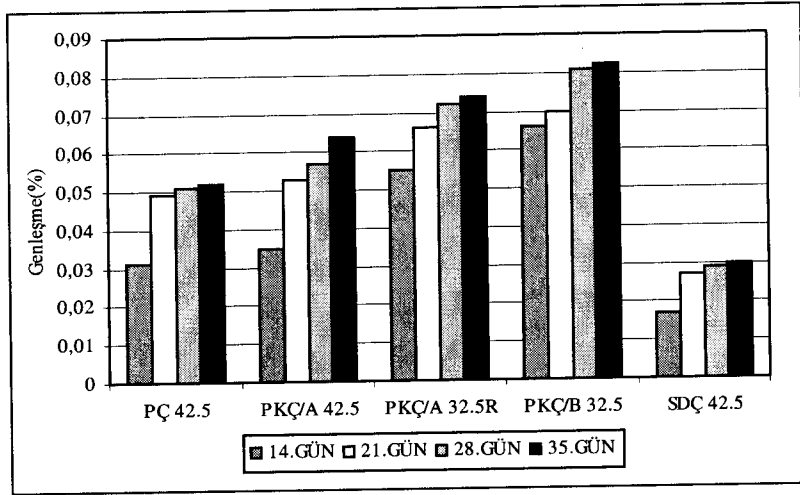
Tablo 2. Uygulanan üç standart için elde edilen genleşme değerleri

| Deney Yöntemi | Ölçüm<br>Zamanı            | % Genleşme |             |               |                |               |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|---------------|----------------|---------------|
|               |                            | PÇ<br>42.5 | SDÇ<br>32.5 | PKÇ/A<br>42.5 | PKÇ/A<br>32.5R | PKÇ/B<br>32.5 |
| ASTM C452     | 14. gün                    | 0,031      | 0,017       | 0,035         | 0,055          | 0,066         |
| ASTM C1038    | 14. gün                    | 0,004      | 0,002       | 0,006         | 0,003          | 0,004         |
| ASTM C1012    | %5 NaSO <sub>4</sub> kons. | 15. hafta  | 0,039       | 0,024         | 0,028          | 0,028         |
|               | %3 NaSO <sub>4</sub> kons. | 15. hafta  | 0,024       | 0,024         | 0,025          | 0,025         |
|               | %1 NaSO <sub>4</sub> kons. | 15. hafta  | 0,024       | 0,020         | 0,023          | 0,023         |

## a) ASTM C452 Deney Sonuçları

ASTM C452 yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 1’de gösterilmiştir. Standartta belirtilen 14 günlük genleşme değerlerine ek olarak 21., 28. ve 35. günlerde de ek ölçümler alınmıştır. Görüldüğü gibi sülfata dayanıklı çimento (SDÇ 32.5), diğer çimentolara göre en düşük genleşmeyi göstermiştir. ASTM C150’ nin öngördüğü performans limitlerine bakıldığında SDÇ 32.5 ve PÇ 42.5, %0.04’ den daha düşük genleşme gösterdiği için sülfat dirençli kabul edilmektedir. PÇ 42.5’un %8’in altında C<sub>3</sub>A içermesi burada etkin olmuştur.

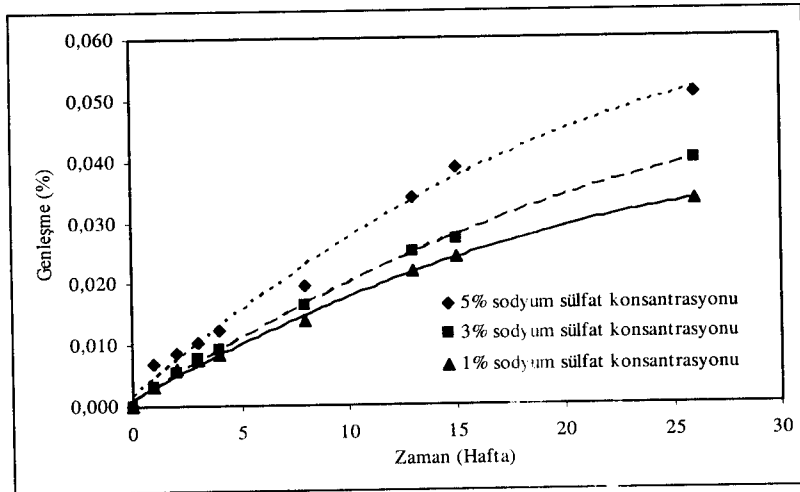
Katkılı çimentolar ise, normal portland çimentosundan daha fazla genleşme göstermiştir. Genleşme katkı miktarına bağlı olarak artış göstermiştir. 14. günden sonraki ölçümlerde de katkı çimentoların performansında iyileşme görülmemiştir. Bu deney yöntemi, çimento hamurunun hidrate olmuş bileşenleri ile dıştan etki eden sülfat çözeltisi arasındaki kimyasal etkileşim yerine, hidrate olmamış çimento bileşenleri ve içten eklenmiş sülfat iyonları kaynağı arasındaki kimyasal etkileşime neden olmaktadır. Böylece, katkının faydalı etkilerinin ortaya çıkması bu deney yönteminde mümkün değildir.



Şekil 1. Çimento tipi genleşme ilişkisi

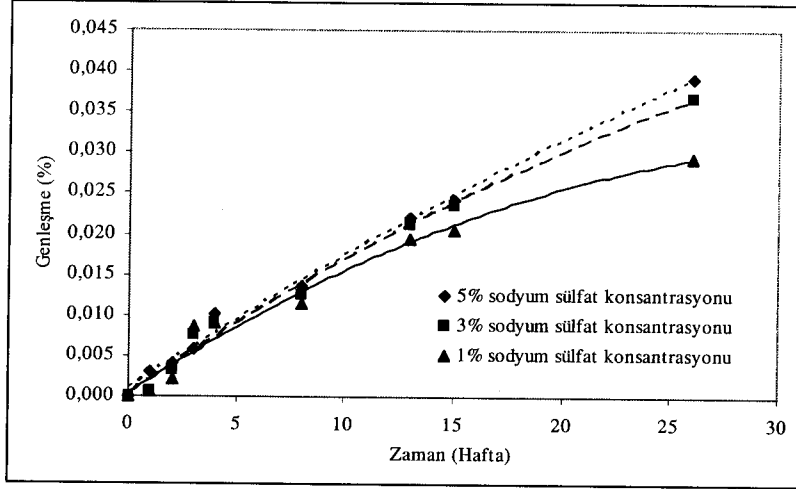
#### b) ASTM C1012 Deney Sonuçları

Şekil 2-6'da görüldüğü gibi, tüm çimentolarda sülfat konsantrasyonunun artışıyla genleşme artmıştır.

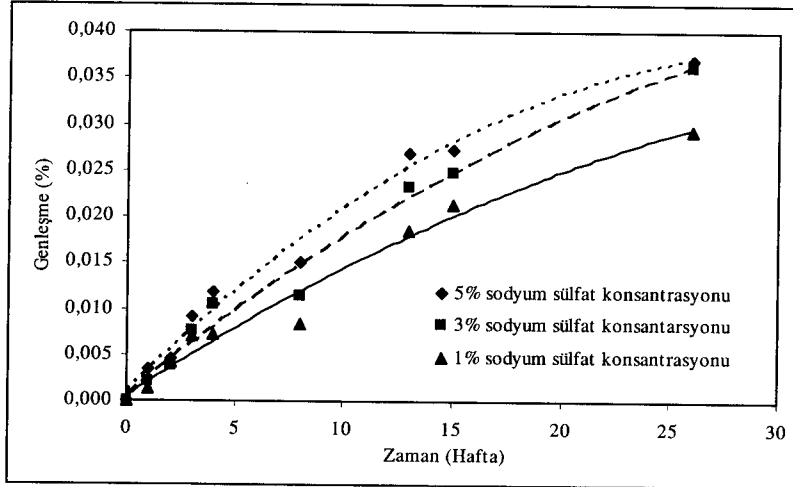


Şekil 2. PÇ 42.5 genleşme değerleri

Tüm sülfat konsantrasyonlarında, sülfata dayanıklı çimento (SDÇ 32.5) diğer çimentolara göre en düşük genleşmeyi göstermektedir (Şekil 3). Deneylerde kullanılan bu çimentonun  $C_3A$  değeri %5 den düşük (2.35),  $C_4AF+2(C_3A)$  değeri ise %20' nin altındadır (19.11). Ayrıca Tablo 1'de görüldüğü gibi SDÇ 32.5'nin  $C_3S/C_2S$  oranı da diğer çimentolara kıyasla daha düşüktür.



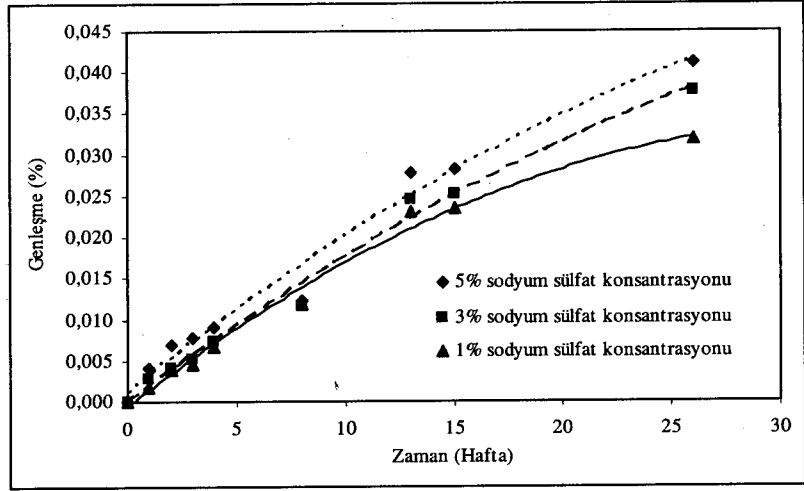
Şekil 3. SDÇ 32.5 genleşme değerleri



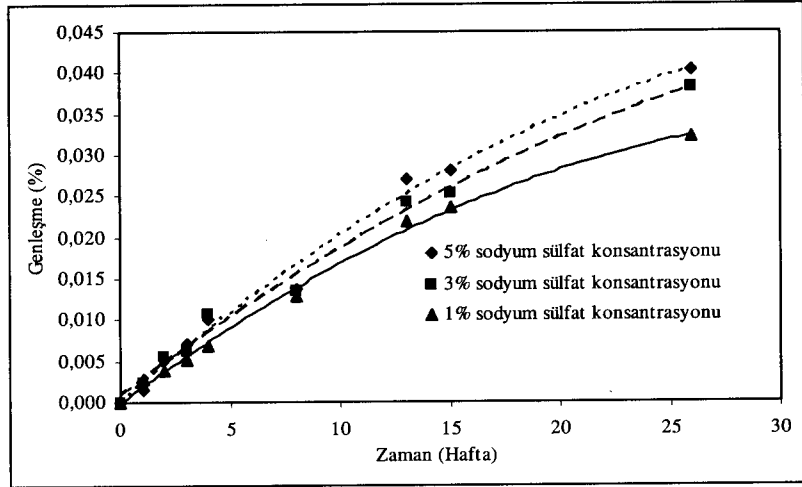
Şekil 4. PKÇ/B 32.5 genleşme değerleri

Katkılı çimentolar arasında ise PKÇ/B 32.5 en iyi performansı göstermiştir. Katkı kullanımının sülfat direncini iyileştirmedeki etkisi gözönünde tutulduğunda bu sonucun, PKÇ/B 32.5 çimentosunun en yüksek katkı oranına sahip olmasından ve daha az  $C_3A$  içermesinden kaynaklanabileceği düşünülebilir. Ayrıca, bu çimento deneylerde kullanılan tüm çimentolar arasında en düşük  $C_3S$  oranına sahip çimentodur.  $C_3S$  miktarının azalması

olması ile puzolanik reaksiyondan dolayı oluşan CH miktarı da azalmaktadır. Dolayısıyla sülfat etkisi ile alçı oluşumu riski de azalmış olmaktadır.



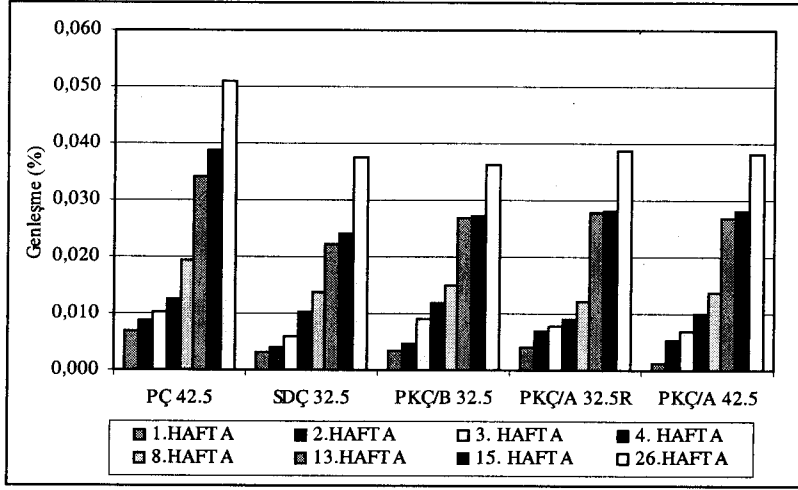
Şekil 5. PKÇ/A 32.5R genleşme değerleri



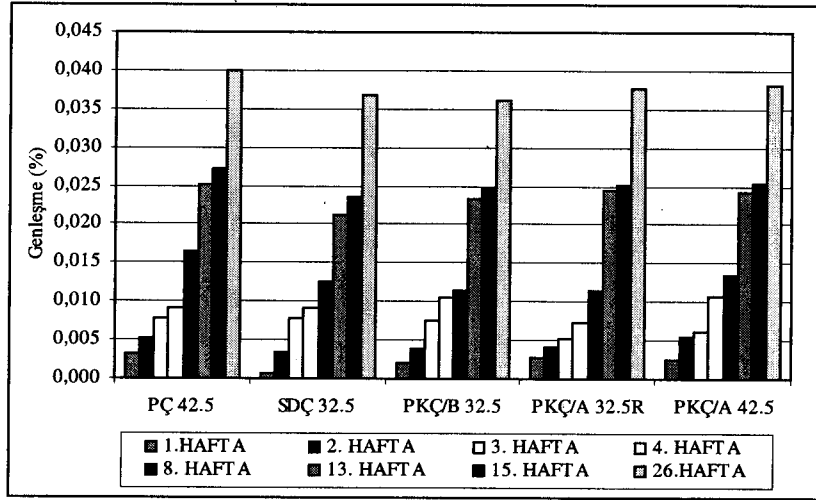
Şekil 6. PKÇ/A 42.5 genleşme değerleri

Tüm konsantrasyon değerleri için en yüksek genleşmeyi, en fazla  $C_3A$  ve  $C_3S$  içeren normal portland çimentosu (PÇ 42.5) göstermiştir.

ASTM C01.29 altkomitenin verdiği limitlere göre PÇ 42.5, %5 sülfat çözeltisi konsantrasyonunda (Şekil 7) 6. ayda %0.10'dan daha az genleşme gösterdiği için orta düzeyde sülfat dirençli, SDÇ 32.5 ve diğer katkılı çimentolar ise %0.05'den daha az genleşme gösterdikleri için yüksek sülfat dirençli kabul edilmektedir.



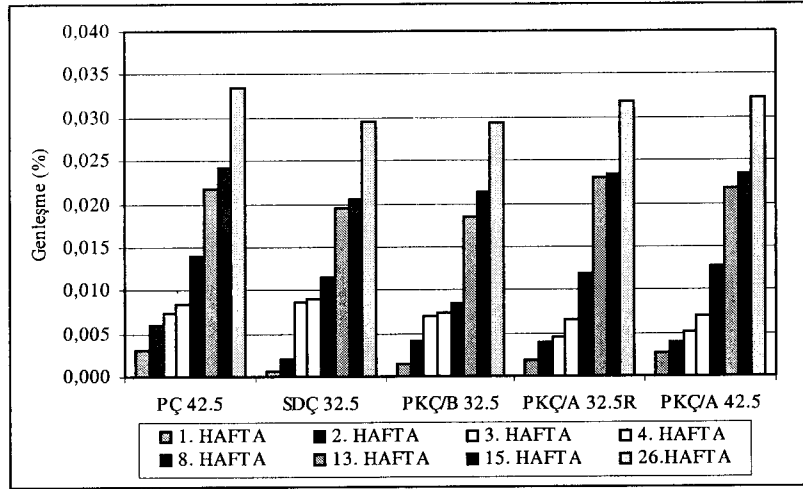
Şekil 7. %5 sülfat çözeltisi konsantrasyonu için genişleme değerleri



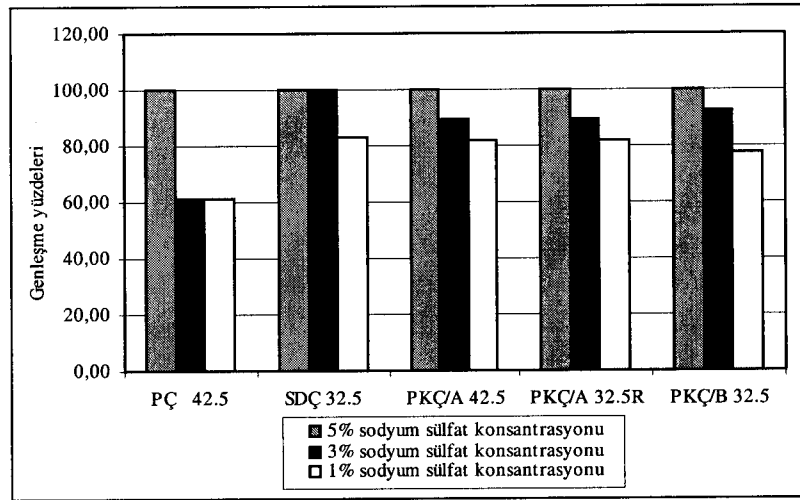
Şekil 8. %3 sülfat çözeltisi konsantrasyonu için genişleme değerleri

Katkılı çimentolar arasındaki genişleme sırasına bakılacak olursa, PKÇ/A 42.5>PKÇ/A 32.5R>PKÇ/B 32.5 şeklindedir. Bu genişleme miktarlarındaki sıralama bu çimentoların  $C_3S$  ve  $C_3A$  miktarlarıyla doğru, katkı yüzdeleriyle ise ters orantılı olarak değişmektedir.

%5' lik sülfat konsantrasyonunda PÇ 42.5 ile diğer çimentolar arasındaki fark açıkça görülürken (Şekil 7), konsantrasyon miktarının azalmasıyla genişleme miktarları da birbirine yaklaşmaktadır.



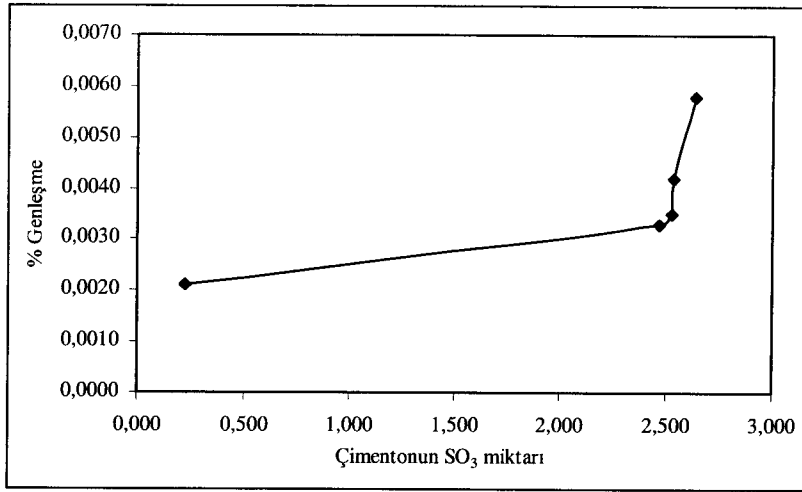
Şekil 9. %1 sülfat çözeltisi konsantrasyonu için genleşme değerleri



Şekil 10. 5% sodyum sülfat konsantrasyonuna göre genleşme yüzdeleri

### c) ASTM C1038 Deney Sonuçları

ASTM C1038 deney yöntemiyle elde edilen genleşme değerleri ister kendi aralarında ister ASTM C1012 sonuçlarına kıyasla düzgün bir dağılım göstermemiştir. Ancak, Şekil 11'de görüldüğü gibi çimentonun  $SO_3$  içeriğine bağlı olarak genleşme miktarıda artmaktadır. Belirli bir  $SO_3$  içeriği üstünde,  $SO_3$  miktarındaki küçük bir artış genleşmede büyük artışlara yol açabilmektedir. Mineral katkıların bu deney sonucuna kayda değer etkisi görülmemektedir.



Şekil 11. ASTM C1038 deney yöntemine göre genleşme değerleri

## SONUÇLAR

Kullanılan malzeme ve uygulanan deney yöntemlerine göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- ❖ ASTM C452 deney yöntemi, normal portland çimentosu ile sülfata dayanıklı çimento arasındaki genleşme farkını açıkça göstermiştir. Bunun yanı sıra, beklendiği gibi bu yöntemin katkılı çimentolar için uygun olmadığı görülmüştür. Katkılı çimentolar belirli performansı göstermek için normal portland çimentosuna göre daha uzun süreli kürlenmelidir. Oysa bu yöntemde, harçlar belirli bir dayanım seviyesini sağlamaları beklenmeden sülfat etkisine maruz kalmaktadır.
- ❖ ASTM C1038 deney yöntemine göre elde edilen sonuçlar düzgün bir dağılım göstermemiştir. Belirli bir limitin üstünde, SO<sub>3</sub> içeriğindeki küçük artış, genleşmede kayda değer artışa yol açmaktadır. Mineral katkıları, bu deney sonucunu etkilememektedir.
- ❖ ASTM C1012 sonuçlarına göre, katkılı çimentolar iyi performans göstermiştir. Katkı miktarının artışıyla genleşme miktarları da azalmıştır. Katkılı çimentolar sülfata dayanıklı çimento ile hemen hemen aynı performansı göstermiştir.

- ❖ Sülfat çözeltisi konsantrasyonunun artışı, tüm çimento tiplerinde genleşme değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Bu etki PÇ 42.5 çimentosunda daha da belirgindir.

### TEŞEKKÜR

Çalışmanın gerçekleşmesinde büyük katkıları olan Çimenter Kalite Kontrol bölümüne, özellikle Sayın Günseli ERYİĞİT, Sayın Burak AKYOL ve Sayın Ayhan TURAN'a teşekkür edilir.

### KAYNAKLAR

1. Al-Amoudi, O.S.B., "Attack on Plain and Blended Cements Exposed to Aggressive Sulfate Environments", *Cement and Concrete Composites*, 24(2002), pp 305-316.
2. Taylor, H.F.W., Cement Chemistry, Second edition, Thomas Telford, 1997, 727 p.
3. Al-Amoudi, O.S.B., "Performance of Fifteen Reinforced Concretes in Magnesium and Sodium Sulfate Environments", *Construction and Building Materials*, 9(1995), pp 25-33.
4. Mehta, P.K., "Mechanism of Expansion Associated with Ettringite Formation", *Cement and Concrete Research*, 3(1973), pp 1-6.
5. Mehta, P.K. and Monterio, P.J.M., Concrete: Structure, Properties and Materials, Second Edition, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993, 548 p.
6. Rasheeduzafer, D.F.H., Al-Gahtani, A.S., Al-Saadoun, S.S. and Bader, M.A., "Influence of Cement Composition on the Corrosion of Reinforcement and Sulfate Resistance of Concrete", *ACI Materials Journal*, 87(1990), pp 114-122.
7. Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M. and Saadi, M.M., "Effect of  $MgSO_4$  and  $Na_2SO_4$  on the Durability Performance of Plain and Blended Cements", *ACI Materials Journal*, 92(1995), pp 15-24.
8. Neville, A.M., Properties of Concrete, Fourth Edition, Longman Group Limited, 1995, 844 p.
9. Biricik, H., Aköz, F., Türker, F. and Berktaş, İ., "Resistance to Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Attack of Mortars Containing Wheat Straw Ash", *Cement and Concrete Research*, 30(2000), pp 1189-1197.

## ABSTRACT

Using ASTM C452, ASTM C1012 and ASTM C1038 test methods, sulfate resistance of different types of cements was investigated. For the experimental study, an ordinary portland cement, a sulfate resisting cement and three Portland composite cements were used. All of the cements except for sulfate resisting cement, were produced from same clinker but using various mineral admixtures in different proportions. In ASTM C1012 test method, in addition to 5% sodium sulfate concentration, 1% and 3% concentrations were also applied. Test results were investigated comparatively.



## **DZUBGA-SAMSUN (RUSYA-TÜRKİYE) MAVİ AKIM DOĞAL GAZ BORU HATTI GÜZERGAH SEÇİMİNDE JEOFİZİK VE JEOTEKNİK ÇALIŞMALAR**

|                                 |                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Günay ÇİFÇİ</b>              | <b>Derman DONDURUR</b>          | <b>Mustafa ERGÜN</b>            |
| <b>Doç. Dr.</b>                 | <b>Arş. Gör.</b>                | <b>Prof. Dr.</b>                |
| <b>Dokuz Eylül Üniversitesi</b> | <b>Dokuz Eylül Üniversitesi</b> | <b>Dokuz Eylül Üniversitesi</b> |
| <b>Deniz Bilimleri ve</b>       | <b>Jeofizik Mühendisliği</b>    | <b>Deniz Bilimleri ve</b>       |
| <b>Teknolojisi Enstitüsü,</b>   | <b>Bölümü, Buca</b>             | <b>Teknolojisi Enstitüsü,</b>   |
| <b>İnciraltı</b>                | <b>İzmir, Türkiye</b>           | <b>İnciraltı</b>                |
| <b>İzmir, Türkiye</b>           |                                 | <b>İzmir, Türkiye</b>           |

### **ÖZET**

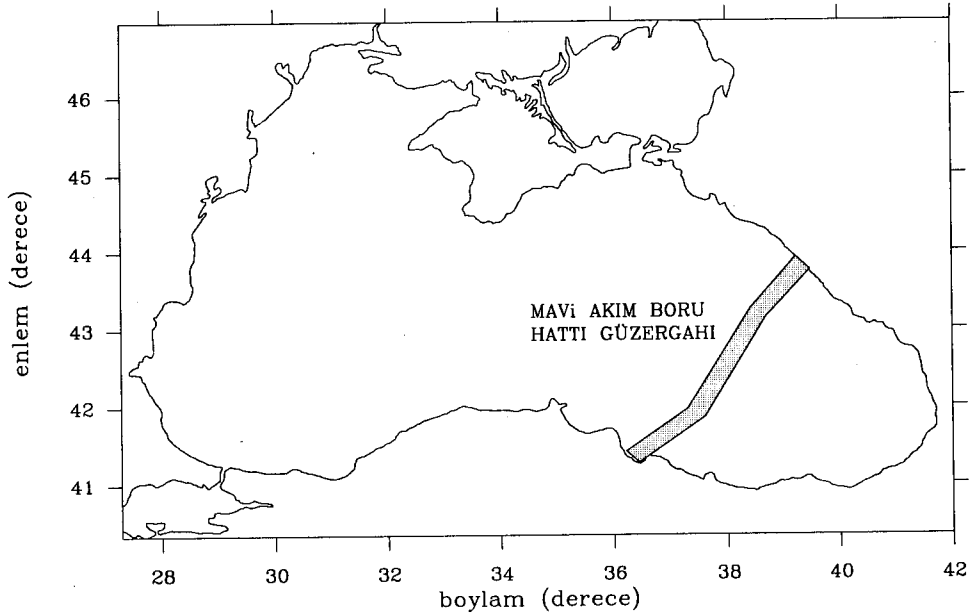
Karadeniz havzasında 2230 m maksimum su derinliğine düşenecek olması nedeni ile dünyada ilk örnek olan, Rusya-Türkiye Mavi Akım (Blue Stream) doğal gaz boru hattı güzergahı 4 km genişlikte ve yaklaşık 400 km uzunlukta bir güzergaha sahiptir. Boruhattının güzergah seçiminde yapılmış olan çalışmalar birkaç evreden oluşmaktadır. Birinci evrede boru hattının koridoru çok belirgin yer tehlikelerini ortaya koymak amacıyla yapılmış; daha ayrıntılı çalışmalar ROV uzaktan kumandalı araç olarak adlandırılan okyanus tabanına kadar inebilen robotla gerçekleştirilmektedir. Bu araştırmalarda temel amaç, boru hattı için uygun güzergah seçimi, ayrıntılı boru hattı güzergah için gerekli veri toplama, potansiyel yer tehlikeleri betimlemek, sismik risk analizinde yer seçimi için belirli bilgileri sağlamada Jeofizik, Jeoteknik çalışmalar ve Oşinografik ölçümler gerçekleştirmektir.

## GİRİŞ

Denizaltı boru hattı olabilirlik çalışması, mühendislikte, boru hattının döşenmesi ve bakımında kullanılmak üzere gerekli bilgilerin derlenmesi amacıyla yapılmakta olup, amaç optimum güzergahın belirlenmesidir. Denizaltı boru hatlarının güzergah seçimi çalışmaları birkaç evreden oluşan ayrıntılı çalışmalar gerektirmektedir (1).

Rusya-Türkiye Mavi Akım (Blue Stream) doğal gaz boru hattı güzergahı 4 km genişlikte ve yaklaşık 400 km uzunlukta olup (Şekil 1), olabilirlik (feasibility) çalışması için birincil amaçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

- 1-4 km 'lık bir koridor için batimetrik, morfolojik, sıg jeoloji ve taban altı özelliklerini betimlemek,
- Boru hattı için güvenli ve ekonomik bir güzergah belirlemek,
- Boru hattının korunması amacıyla uygun yöntemleri belirlemek,
- Boru hattının. döşenmesi, bakımı ve mühendislik çalışmaları için batimetrik bilgi sağlamak.



Şekil 1. Mavi akım doğalgaz boru hattı güzergahı.

Bu amaçlarla yapılacak çalışmalar 3 ana kategoriye ayrılmıştır: (1) 0-10 m su derinliklerindeki kıyısız bölgeler, (2) 10-200 m derinliklerdeki şelf bölgeleri ve (3) 200-2000 m derinliklerdeki derin sular. Kıyı pompa istasyonlarının konumu, kıyıya dik uçurumların konumu, su derinliğindeki ani değişimler ve yer tehlikeleri ile denizaltı kablolarının konumları göz önüne alınarak seçilecek en kısa güzergah üzerinde boru hattı olabilirlik çalışması yapılmıştır.

### **Çalışma Yöntemi**

Boru hattı güzergah seçimi çalışmaları için, ilk aşamada, önerilen boru hattı güzergahı üzerinde olası yer tehlikelerini ortaya koymak amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Daha ayrıntılı çalışmalar ROV uzaktan kumandalı araç olarak adlandırılan okyanus tabanına kadar inebilen robotla gerçekleştirilmektedir. Bu araştırmalarda jeofizik, sedimantolojik ve jeoteknik çalışmalar ile oşinografik ölçümler birlikte gerçekleştirilmektedir. Bu amaçlarla Mavi Akım boru hattı çalışmasında yapılan jeofizik çalışmalar ve kullanılan yöntemler aşağıdaki gibi özetlenebilir (2);

#### **Çok-bimli echosounder:**

- a. Koridor boyunca su derinliğini elde etmek, batimetrik konturları ve güzergah boyunca batimetrik profili elde etmek,
- b. Kıtasal yamaç, denizaltı kanyonları ve kaymalar gibi geniş jeomorfolojik yapıları belirlemek.

#### **Yanal Tarama Sonarı:**

- a. Kayma, çamur akışı, pockmarklar gibi küçük jeomorfolojik yapıları belirlemek,
- b. Gravity core ile birlikte farklı tortul birimlerini ayırt etmek,
- c. Enkaz, denizaltı kabloları gibi yapay denizaltı oluşumlarını belirlemek,

#### **Subbottom Profiler:**

- a. Güzergah boyunca sığ jeolojiyi, tabaka kalınlıklarını ve geçişlerini belirlemek,
- b. Sığ gaz, çamur diyapiri, fay, kayma ve sığ yer tehlikelerini belirlemek,

#### **Sığ ve Derin Sismik:**

- a. Derin stratigrafiyi ve denizaltı jeolojisini belirlemek,
- b. Derin fayları belirlemek.

Sedimentolojik çalışmalar kapsamında, güzergah boyunca Grab Sampler, Gravity Corer, Mega Corer ve ROV Sampler kullanılarak deniz tabanı örneklemeleri yapılmıştır. Bu çalışmalarda amaç, deniz tabanı tortullarını sınıflandırmak, tortulların jeoteknik durumlarını belirlemek ve sonar/profiler verilerinin yorumunu kolaylaştırmaktır.

Jeoteknik ve oşinografik çalışmalarda ise, rüzgar yönü/hızı, dalga yüksekliği, yüzey sıcaklığı, barometrik basınç haritaları çıkarılmış, mevsimsel olarak pH, CTD ölçümleri ve su örneklemeleri yapılarak su yoğunluğu, tuzluluğu ve sıcaklığı ölçülmüş ve tüm güzergah boyunca haritalanmıştır. Su örneklemelerindeki amaç, borunun malzeme seçimini yapabilmek, tortul ve su kolonundaki Sulphate Reducing Bacteria (SRB) konsantrasyonunu belirlemek, tortullardaki Hidrojen Sülfat ( $H_2S$ ) konsantrasyonunu belirlemek, boru malzemesi üzerindeki korozyonu belirlemek, katodik koruma için performans çalışmaları yapmaktır. Bunlara ek olarak, yerinde yer penetrasyon ve kesme deneyleri yapılmıştır. Akıntı ölçerler ile, doğu Karadeniz baseninin içsel akıntıları, yamaç aşağı ve türbiditik akıntılar haritalanmıştır. Teorik boru hattı güzergahı boyunca 7 noktada döşeme testi yapılmıştır. Bu testin amacı, test noktalarında, boru hattının düşey yöndeki durağanlığının doğrudan değerlendirilmesidir. Sonuçlar, test noktaları civarında jeoteknik testlerden elde edilen test sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## SONUÇLAR

Yapılan ayrıntılı çalışmalar sonucunda Rusya-Türkiye Mavi Akım doğal gaz boru hattı için olası yer tehlikeleri ortaya konularak, optimum boru hattı güzergahı önerilmiştir. Boru hattı güzergahı için, dik kıta yamaçları, boruların altında oluşan açıklıklar, kıtasal yamaç bölgelerindeki kayma, kopma, sürüklenme ve gravitasyonel akımlar, olası çamur volkanları, gaz kaçışlarının oluşturduğu kabarcık ve çöküntüler, kanyonlarda yamaç kaymaları, şelf bölgelerinde gaz sızıntıları ve faylanma nedeniyle tortulların duraysızlaşması, yamaç bölgelerinde, heyelan ve kaymalara neden olabilen gaz hidrat birikimleri, abisal düzlük yüzey tortullarının potansiyel duraysızlığı ve düşük taşıma kapasitesi, her türlü faylanma ve çok yumuşak tortullar yer tehlikelerin başında gelmektedirler.

Mavi Akım güzergahı boyunca, 2° den fazla eğime sahip bölgelerde kayma ve sürüklenmeler gözlenmiştir. Kaymada ani bir tortul hareketi söz konusu iken, sürüklenme gravitasyonel etki nedeniyle sürekli bir kayma şeklinde oluşmaktadır. 18.7° max. eğime sahip Rusya kıtasal yamacında ve aprondaki kanyon duvarlarında bu işlemlere rastlanılmıştır (3). Hızı saatte 90 km 'ye ulaşan türbiditik akıntılar da kayma nedeni olmaktadır. Boru hattı boyunca, özellikle Türkiye şelfinde, çok sayıda biyojenik ve hidrotermal gaz çıkış alanına (pockmark) rastlanılmış olup, çapları 10-30 m arasında değişmektedir. Abisal düzlükte ve özellikle Türkiye kıtasal yamacı ile şelf arasında normal faylar gözlenmektedir.

Rusya yamacı ve apron bölgesi geniş çaplı kanyon sistemi tarafından kontrol edilmektedir. Boru hattı bu kanyonlardan ikisi tarafından kesilmektedir. Hattın dik yamaçlardan geçmemesi için kanyon içerisine yönlendirilmesi gereklidir. 2150 m max. derinlikteki abisal düzlükte tortullar çok yumuşak siltten oluşmakta ve yer yer gaz çıkışları gözlenmektedir. 12.6° max. eğime sahip Türkiye yamacında, yumuşak silt içerisinde kayma ve sürüklenme işlemleri oluşmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. Çifçi, G., Dondurur, D. and Ergün, M., "Sonar and High Resolution Seismic Studies in the Eastern Black Sea Basin", International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Region (IESCA-2000), İzmir, Turkey, 2000.
2. Çifçi, G., Ergün, M. ve Dondurur, D., "Denizaltı Boru Hatları Güzergah Seçiminde Yapılması Gereken Jeofizik ve Jeoteknik Çalışmalara Bir Örnek", 13. Türkiye Ulusal Jeofizik Kongresi, Ankara, 2000.
3. Ergün, M., Çifçi, G. and Dondurur, D., "High Resolution Seismic and Sonar Characteristics of the Eastern Black Sea Turkish Continental Slope", 36th CIESM Congress, Monaco, September 2001, In: Rapp. Comm. int. Mer. Medit., 36, s. 22.

# **DZUBGA-SAMSUN (RUSYA-TÜRKİYE) MAVİ AKIM DOĞAL GAZ BORU HATTI GÜZERGAH SEÇİMİNDE JEOFİZİK VE JEOTEKNİK ÇALIŞMALAR**

**Günay ÇİFÇİ**

**Doç. Dr.**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz  
Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü,  
İnciraltı  
İzmir, Türkiye**

**Derman DONDURUR**

**Arş. Gör.**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Jeofizik  
Mühendisliği Bölümü, Buca  
İzmir, Türkiye**

**Mustafa ERGÜN**

**Prof. Dr.**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Deniz  
Bilimleri ve Teknolojisi Enstitüsü,  
İnciraltı  
İzmir, Türkiye**

## **ABSTRACT**

Blue Stream natural gas pipeline extending from Turkey to Russian Federation is the unique model because it will be lied down to max. 2230 m water depths. The width of the pipeline route is about 1 to 4 km and the length is about 400 km. The studies for the selection of the route consist of a number of phases. In the first phase, the studies are performed for the evident geohazards, and the detailed studies are done by remotely operated vehicle (ROV), which can be operated on the ocean bottom. The main purposes for these studies are to select the suitable pipeline route, to collect the detailed data for pipeline settlement, to describe the potential geohazards, and to perform oceanographic, geological and geophysical surveys for the seismic risk analysis.