

# Mineral Katkıların Donatı Korozyonuna Etkisinin Elektrokimyasal Yöntemlerle İncelenmesi

## 1. Giriş

Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılardaki korozyon gelişimi, yapılardan beklenen emniyet ve servis ömrü ile ilgili gereksinimleri büyük ölçüde etkilemektedir. Karbonatlaşma ve klorür etkileri gibi çeşitli agresif şartlara maruz kalan betonarme elemanlar kısa sürede kullanım dışı kalabilmektedir.

Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılar çeşitli süreçler sonunda korozyona maruz kalabilir. Açıkta bekletilen donatılarda veya betonarme yapılarda pas payı tabakasının yeterli olmaması nedeni ile çelik donatılarda, nem ve oksijen ile gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu *atmosferik korozyon* görülür. Beton bünyesinde elektron suyunun oluşturduğu elektrolitik ortam ile birbirine bağlı anodik ve katodik reaksiyonlar ile gelişen korozyon ise *elektrolitik korozyon* olarak tanımlanır. Betonun alkali ortamında çelik donatı üzerinde oluşan pasif tabakanın çözünmesine yol açan klorür iyonlarının, katalizör görevi yaparak demirin hızla iyonlaşmasını sağladığı ve tehlikeli lokal hasarlara sebebiyet veren korozyon türü ise *klorür korozyonu* olarak adlandırılmaktadır. Bir elektrolitik ortamda farklı çözünme potansiyellerine sahip metallerin bir arada kullanımı sonucu daha negatif elektropotansiyele sahip metalin çözünerek paslanması sonucu *temas korozyonu* (galvanik korozyon) gerçekleşebilir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2003).

Prefabrik veya yerinde dökme betonar-

me sistemlerde çelik donatı korozyon sonucu kesit ve düktilite kaybına uğrar. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda meydana gelen genişleme etkisi önceleri pas payı tabakasının çatlamasına, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülmesine yol açar. Bu durumda, hiç bir fiziksel ve kimyasal koruması kalmayan donatının çok daha hızlı şekilde kesit kaybetmesi, zamanla tamamen yok olması mümkündür (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2003). Zararlı dış ortam koşullarında korozyon gelişimini tamamen durdurmak mümkün olmasa da, başlangıç zamanını geciktirmek veya gelişim hızını yapının servis ömrü boyunca kabul edilebilir limitlerin altına düşürmek için birçok yöntem başvurulabilir. Bu amaçla yeni yapılacak yapılarda beton teknolojisine uygun kalitede malzeme seçimi, çeşitli mineral ve kimyasal katkı maddelerinin kullanımı, yalıtım önlemleri ve elektrokimyasal koruma yöntemleri ön plana çıkmaktadır.

Betonarme yapılar için malzeme ve imalat standartları, donatı korozyonu açısından çeşitli hükümler getirmiştir. Korozyon önlemleri hakkında standartlarda paspayı kalınlığı, beton sınıfı ve çimento dozajı için en küçük, su/çimento oranı ve klorür içeriği için ise en yüksek değerler tanımlanmıştır (TS-EN 206, ACI 222, EN 1992, TS 500, BS8110). Örneğin paspayı tabakası kalınlığı konusunda EN 1992, dış cephede su temasına açık korunmasız prefabrik betonarme elemanlar için en az 30 mm, öngeriilmeli elemanlarda ise 40 mm değerini önermektedir. Yapı



**Bülent BARADAN**

1970'de Ege Üniv. Müh. Mim. Yüksek Okulu İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Yüksek lisansını A.B.D.'deki Pennsylvania Üniversitesinde 1973'de, doktorasını Ege Üniversitesi İnşaat Fakültesi'nde 1978'de tamamlamıştır. 1989'da Doçent, 1994'de profesör ünvanını almıştır.

Halen Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Yapı Malzemesi ABD Başkanlığını yürütmekte ve akademik çalışmalarını sürdürmektedir. Beton teknolojisi, durabilite, yüksek performanslı beton, prefabrik beton üretimi, endüstriyel atıkların betonda kullanılması ve yapı malzemeleri konularında yayınları bulunmaktadır.

elemanına klorür ya da deniz suyu etkisi söz konusu ise bu değerler sırası ile 45 ve 55 mm olmaktadır.

Çimento tipi ve su/çimento oranı açısından çeşitli beton kompozisyonları için, buz çözücü tuz etkisi altında, bir betonun elektriksel rezistivitesi, klorür penetrasyonu ile ilişkili özelliklerini yansıtmaktadır. Su/çimento oranının etkisi 0,40 ve 0,45 değerleri için sınırlı olsa da, 0,55 olan karışımlarda önem-



**Hüseyin YİĞİTER**

*Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1999 yılında mezun olmuştur. 2002 yılında yapı malzemesi alanında yüksek lisansını tamamlamıştır.*

*Halen Dokuz Eylül Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Betonarme elemanlarda donatı korozyonu üzerinde doktora çalışmalarına devam etmekte, çimento esaslı yüksek performanslı lifli kompozitler konusunda araştırma projelerinde görev almaktadır.*

li derecede düşük rezistivite ve daha büyük klor iyon penetrasyonu derinliği değerleri görülmüştür. Benzeştirilmiş buz çözücü tuz şartları altında, deniz ortamındaki katkılı çimentoların yüksek klorid penetrasyon direnci olduğu bulunmuştur (Polder ve Peelen, 2002).

Betonda kullanılan puzolanik mineral katkıları, betonun donatıya karşı fiziksel ve kimyasal koruma özelliklerini etkileyerek korozyon davranışını değiştirirler. Mineral katkıların donatı çeliklerinin korozyonu üzerinde birbirine zit iki etkisi bulunmaktadır. Bu etkilerden ilki fiziksel koruma üzerinde etkilidir. Uygun dozajda kullanılan puzolanik malzemeler ile daha yoğun ve geçirimsiz bir içyapı elde edilir. Geçirimsizliğin azalması ile fiziksel koruma sağlayan bariyer etkisi daha yüksek mertebede bir koruma sağlar. Diğer yandan,

puzolanik reaksiyonlar ile bağlanan kirecin azalmasıyla, betonun boşluk suyundaki alkalinite azalır, pH seviyesi düşer. Kimyasal koruma yüksek pH ile sağlandığından mineral katkıların kullanımı ile kimyasal koruma seviyesi azalmış olur. Aynı anda gelişen bu iki etkiden hangisi daha baskın çıkar ise sonuç o yönde ilerleyecektir. Fiziksel koruma artarsa donatı daha iyi korunacak, kimyasal koruma azalrsa da donatının korozyon riski artacaktır.

Choi, Kim ve Lee (2006) uçucu küllü betonlara gömülü çelik çubukların korozyon davranışını %3,5 NaCl içeren agresif ortamda açık devre potansiyeli, polarizasyon direnci ölçümleri, elektro-kimyasal impedans spektroskopisi ve hızlı klor geçirimsizliği ölçümleri ile araştırmışlardır. Uçucu kül içeren betonlardaki donatıların açık devre potansiyellerindeki değişimin daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Hızlı klor geçirimsizliği deney verilerine göre, uçucu küllü betonlardaki elektriksel yükün transfer direnci daha yüksektir. Düşük korozyon hızı, oluşan çukurcuk sayısının ve boyutunun az olması ile iyi uyumludur. Su/bağlayıcı oranı azaldıkça korozyon direnci artmıştır. Uçucu kül kullanımının klorid iyonlarının permeabilitesinin azalması sebebiyle betondaki çeliğin korozyon direncine yararlı etkileri olmaktadır.

Mineral katkı kullanımının korozyon üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada; yüksek fırın cürufunun, silis dumanı katkılı ve yalnızca Portland çimentolu betonlardan daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir. Yüzde 50 oranına kadar mineral katkı kullanımının korozyon hızlarını yavaşlattığı rapor edilmiştir (Türkmen vd, 2003).

Mineral katkıların (uçucu kül, silis

dumanı, yüksek fırın cürufu gibi) ikili veya üçlü kombinasyonlarda kullanımı ise, betonun elektriksel direncini büyük ölçüde arttırmış ve bunun sonucunda korozyon başlangıç zamanlarını geciktirmiş ve korozyon gelişimini yavaşlatmıştır (Sun vd, 2004).

Ha ve ekibi (2007), F tipi uçucu küllerin betonda kullanımının çeliğin korozyon performansına etkilerini hızlandırılmış kısa dönemli teknikler ile incelemiştir. Sodyum klorid çözeltisinde hızlandırılmış korozyon etkisi altında; açık devre potansiyel ölçümleri, anodik polarizasyon çalışmaları, zorlanmış voltaj tekniği, makrohücre korozyon çalışmaları ve pH ölçümleri gerçekleştirmişler, elde ettikleri elektrokimyasal verileri ağırlık kayıpları ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçlarına göre, betonun nihai pH değeri, pasifliğin bozulmasına yol açacak pH değerinin üzerinde olsa bile, mineral katkı kullanımı pH değerini düşürmekte ancak, çimento yerine %30'a kadar uçucu kül kullanımı, betondaki çeliğin korozyon direnci özelliğini geliştirmektedir. Uçucu kül betonun geçirimsizlik karakteristiklerini geliştirmekte ve klorid bağlama kapasitesini arttırmaktadır.

Sunulan çalışmada, beton kalitesinin ve beton üretiminde kullanılan mineral katkıların donatı korozyonuna etkisinin belirlenmesi amacıyla beton karışımları hazırlanmıştır. Bu amaçla normal ve yüksek dayanımlı beton karışımlarında çimento yerine, ağırlıkça %40 oranında uçucu kül veya %10 oranında silis dumanı ikame edilerek beton ve betonarme numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan beton numunelerde basınç dayanımı, hızlı klor geçirimsizliği, klor iyon penetrasyon derinliği tespiti, donatılı numunelerde ise korozyon ölçümleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar kontrol örnekleri ile kıyaslanmıştır.

**Tablo 1.** Bağlayıcı malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

| Kimyasal Bileşim (%)           | UK   | SD      | CEM I  | CEM I Basınç Dayanımı (MPa)             |      |
|--------------------------------|------|---------|--------|---|------|
| CaO                            | 27,0 | 1–2     | 63,310 | 2 günlük                                | 22,0 |
| SiO <sub>2</sub>               | 42,1 | 70–85   | 19,552 | 7 günlük                                | 39,5 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19,4 | 2–5     | 5,914  | 28 günlük                               | 47,4 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,6  | 1–2,5   | 2,115  |   |      |
| MgO                            | 1,8  | 4–8     | 1,105  |   |      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -    | 1–4     | -      | CEM I Fiziksel Özellikler               |      |
| Na <sub>2</sub> O              | -    | -       | 0,189  | Kıvam suyu (%)                          | 29,6 |
| K <sub>2</sub> O               | 1,1  | -       | 0,786  | Priz başlangıcı (dakika)                | 150  |
| SO <sub>3</sub>                | 2,4  | -       | 2,418  | Priz sonu (dakika)                      | 185  |
| Cl                             | -    | -       | 0,002  | Hacimsel stabilite (mm)                 | 2    |
| C                              | -    | 1–1,5   | -      | Blaine-özgül yüzey (m <sup>2</sup> /kg) | 368  |
| S                              | -    | 0,5–1,3 | -      | Özgül ağırlık                           | 3,08 |
| Kızdırma kaybı                 | 1,3  | <5      | 2,140  |   |      |
| Serbest CaO                    | 4,3  | -       | 1,370  |   |      |
| Çözünmeyen kalıntı             | -    | -       | 0,210  |   |      |

## 2. Deneysel çalışmalar

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme özellikleri ve deney yöntemleri aşağıda tanımlanmıştır.

### 2.1. Malzemeler

#### 2.1.1. Çimento ve Mineral Katkılar

Tüm beton karışımlarında CEM I 42,5 tip çimento kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül (UK) C sınıfında olup, Soma B Termik Santralinden temin edilmiştir. Programda silis dumanı (SD) katkılı karışımlar da hazırlanmıştır. Çimentonun ve mineral katkıların özellikleri Tablo 1’de sunulmaktadır.

#### 2.1.2. Agregalar

Karışımlarda agrega olarak iki farklı boyutta kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Karışım granülometrisi B eğrisine oldukça yakındır. Kimyasal analize göre agregaların klor içeriği %0,0002 olarak

**Tablo 2.** Agregalar özellikleri

| Özellik                      | İnce agregalar | Kaba agregalar |
|------------------------------|----------------|----------------|
| Boyut aralığı (mm)           | 0–5            | 5–15           |
| Özgül ağırlık (KYD)          | 2,62           | 2,71           |
| Su emme (%)                  | 1,21           | 0,39           |
| Karışımda kullanım oranı (%) | 65             | 35             |

tespit edilmiştir. İnce ve kaba agregaların özellikleri Tablo 2’de verilmektedir.

#### 2.1.3. Su

Şehir şebeke suyunda bazı iyon ve yabancı maddeler bulunabilmektedir. Korozyon ölçümlerinde elektrokimyasal yöntemleri etkilememesi amacıyla, tüm beton karışımlarında şebeke suyu distile edilerek kullanılmıştır.

#### 2.1.4. Donatılar

Betonarme elemanlarda en az 16 mm çaplı donatılar kullanılmıştır. Donatılar, TS 708 Beton Çelik

Çubukları standardına göre BÇ III-a sınıfındadır. Eksenel çekme deneyi sonuçlarına göre akma mukavemeti 487 MPa, çekme mukavemeti 598 MPa ve kopma uzaması %21 olan çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 3’te sunulmuştur.

#### 2.1.5. Akışkanlaştırıcı

Değişken miktarlarda su/bağlayıcı madde oranlarına ve bağlayıcı malzeme miktarlarına sahip beton karışımlarında belirli bir işlenebilirlik sağlanması amacıyla karışımlarda süper akışkan-

**Tablo 3.** Donatı çeliğinin kimyasal kompozisyonu

| Bileşen    | C     | Si    | Mn    | P     | S     | Cr    | Ni    | Cu    | Mo    | Sn    | N     | Pb    |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Miktar (%) | 0,200 | 0,190 | 0,700 | 0,021 | 0,024 | 0,090 | 0,110 | 0,530 | 0,016 | 0,022 | 0,011 | 0,002 |

laştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Sentetik polimer esaslı katkı malzemesi TS EN 934-2 ölçütlerine uymaktadır. Yoğunluk değeri 1,023-1,063 g/cm<sup>3</sup> arasında olup katı madde oranı %40'tır. Klor içeriği %0,1'den küçük, pH değeri ise 6,5'dir. Çökme değeri 10±2 cm hedeflenerek karışımlarda farklı dozajlarda kullanılmıştır.

## 2.2. Beton Karışımları

Çalışmada normal ve yüksek dayanımlı olmak üzere iki farklı kalitede beton karışımları hazırlanmıştır. Normal beton 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ve 0,65 su/bağlayıcı oranı ile yüksek dayanımlı beton ise 400 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı ve 0,40 su/bağlayıcı oranı ile üretilmiştir.

Çalışmanın amacı mineral katkı kullanımının donatı korozyonuna etkisinin araştırılması olması nedeni ile gerek UK gerekse SD tek ikame oranında kullanılmıştır. Daha önceki çalışmalar (Yazıcı vd, 2005) göstermiştir ki, %40 oranında uçucu kül kullanımı ile uçucu kül içermeyen kontrol betonunun

mekanik performansı yakalanabilmektedir. SD açısından bakıldığında %10'dan daha yüksek oranlarda silis dumanı kullanımı taze betonda işlenebilirlik problemlerine yol açmakta, ayrıca yüksek maliyetli bir mineral katkı olması nedeni ile ekonomik sıkıntılara sebep olmaktadır. Bu sebeplerle mineral katkılı beton karışımlarında UK için %40, SD için %10 kullanım oranları seçilmiştir.

Normal ve yüksek dayanımlı betonlara ait karışım oranları Tablo 4'te verilmiştir. Karışım kodlarında 300 sayısı normal dayanımlı betonu, 400 sayısı ise yüksek dayanımlı betonu temsil etmektedir. Karışım kodlarında K mineral katkı içermeyen kontrol betonlarını, UK çimento yerine ağırlıkça %40 oranında uçucu kül kullanımını, SD ise çimento yerine ağırlıkça %10 oranında silis dumanı kullanımını göstermektedir.

Beton karışımlarında, her bileşenin miktarı ve o bileşenin kimyasal analizindeki klor içeriği kullanılarak bir metreküp betondaki toplam klor

miktarı hesaplanmış, bu değer bağlayıcı malzeme miktarına oranlanarak Tablo 4'teki klor içeriği değerleri elde edilmiştir. Karışımların klor içeriğine bakıldığında TS-EN 206-1'de betonarme elemanlar için çimento ağırlığına verilen %0,2 limitinin oldukça altında kaldığı görülmektedir.

## 2.3. Yapılan Deneyler

Deneyel çalışma kapsamında hazırlanan numuneler, ilgili kür işlemleri ve ölçümlere ait detaylar bu bölümde verilmektedir.

### 2.3.1. Basınç Deneyi

Beton karışımlarının basınç dayanımlarının tespiti için 10 cm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır. Her karışımından alınan numuneler potansiyel dayanımın tespit edilmesi amacıyla standart kür uygulamasına tabi tutulmuştur. Bu amaçla örnekler 28 gün süre ile 20 °C kirece doymun suda saklanmış, eksenel basınç deneyleri 28. günde yapılmıştır.

**Tablo 4.** Beton karışım oranları

| BİLEŞENLER                            | KARIŞIMLAR |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                       | K/300      | UK/300 | SD/300 | K/400  | UK/400 | SD/400 |
| Çimento (kg/m <sup>3</sup> )          | 294        | 176    | 265    | 400    | 240    | 360    |
| Uçucu kül (kg/m <sup>3</sup> )        | -          | 118    | -      | -      | 160    | -      |
| Silis dumanı (kg/m <sup>3</sup> )     | -          | -      | 29     | -      | -      | 40     |
| Su (lt/m <sup>3</sup> )               | 189        | 189    | 189    | 153    | 153    | 153    |
| 0-5 (kg/m <sup>3</sup> )              | 1180       | 1154   | 1174   | 1183   | 1147   | 1174   |
| 5-15 (kg/m <sup>3</sup> )             | 644        | 630    | 640    | 646    | 626    | 641    |
| Akışkanlaştırıcı (lt/m <sup>3</sup> ) | 3,1        | 3,6    | 3,6    | 7,3    | 8,4    | 8,4    |
| S/B oranı                             | 0,65       | 0,65   | 0,65   | 0,40   | 0,40   | 0,40   |
| Klor içeriği (% bağlayıcı)            | 0,0043     | 0,0036 | 0,0042 | 0,0047 | 0,0042 | 0,0048 |
| Çökme (cm)                            | 9          | 10,5   | 8      | 10     | 15     | 8      |

### 2.3.2. Hızlı Klor Geçirirliği Deneyi

Hızlı klor geçirirliği deneyi sonuçları, betonun durabilitesi ve içine gömülü çelik donatıların klorür korozyonuna eğilimi açısından fikir verebilmektedir. Her beton karışımından 10 cm çapında ve 5 cm yüksekliğinde silindir (disk) numuneler alınmıştır. Dökümden sonra örnekler 7 gün süre ile standart kür ortamında saklanmış ardından 28. güne kadar laboratuvar ortamında havada bekletilmiştir. Kür periyodundan sonra ölçümler ASTM C 1202-97 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle göre, suya doymuş hale getirilen numune test cihazının hücreleri arasına yerleştirilmiş, numune yan yüzeyleri geçirimsiz bir malzeme (silikon) ile kaplanmıştır. Hücrelerin birinde %3 NaCl çözeltisi ve metal elektrot, diğerinde ise 0,3 N NaOH çözeltisi ve metal elektrot bulunmaktadır. İki hücre arasında 6 saat süre ile 60 V potansiyel uygulanmıştır. Test süresi boyunca beton diskten geçen elektrik yükü coulomb biriminde yarım saatte bir kümülatif olarak kaydedilmiştir.

### 2.3.3. Korozyon Deneyleri

Korozyon analizleri için 7,5x7,5x16 cm boyutlarında donatılı beton prizma numuneler hazırlanmıştır. Şekil 1'de görülen prizma numunenin ekseninde 20 cm uzunluğunda  $\Phi 16$  mm donatı bulunmaktadır. Numunenin üretimi sırasında donatının yerleştirilmesi ve korozyon analizleri sırasında elektriksel bağlantı yapılabilmesi için prizmanın alt tabanında 1 cm, üst tabanında ise 3 cm donatı açıkta bırakılmıştır. Dökümden sonra numuneler 7 gün süre ile standart kür ortamında saklanmıştır. Donatılara elektriksel bağlantı kabloları takılmış, ardından açıktaki donatılara epoksi kaplama aşamasına geçilmiştir. Beton içine gömülü çelik çubukların korozyon alanını sınırlamak ve aynı

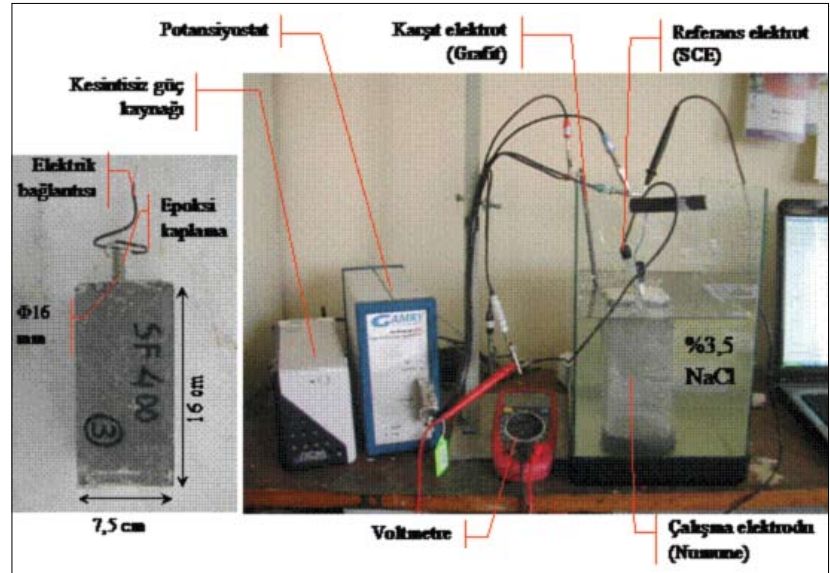
zamanda çelik çubukların açıkta kalan kısımlarında gelişecek korozyonun, ölçümleri etkilemesini engellemek amacıyla beton prizma tabanlarına ve açıkta kalan çelik donatılara epoksi esaslı iki bileşenli koruyucu kaplama malzemesi ile kaplama yapılmıştır. Sözü edilen işlemlerin ardından örnekler 45. güne kadar laboratuvar ortamında havada bekletilmiştir.

Korozyon analizleri için hazırlanan prizma numunelerin yarısı 45. günde tekrar standart kür havuzuna bırakılmıştır. Kontrol numuneleri korozif olmayan kirece doymuş su ortamında saklanmıştır. Örneklerin diğer yarısı ise hızlandırılmış korozyon kabine konulmuştur.

Hızlandırılmış korozyon kabindeki numuneler %3,5 NaCl çözeltisi kullanılarak ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Bu amaçla özel olarak tasarlanan ve otomatik olarak ıslanma-kuruma çevrimi yapabilen bir kabin kullanılmıştır. Cihaz, bir kabin ve bir depo olmak üzere iki ana bölüme ayrılmıştır. Kabin bölümünde ızga-

ralar üzerine yerleştirilmiş numunelerin ıslanma aşaması tamamlandıktan sonra çözelti depoya pompalanmaktadır. Daha sonra kabin içerisine bir fan vasıtası ile ayarlanan sıcaklıkta hava verilerek kuruma aşaması yapılmaktadır. Kuruma aşaması tamamlandıktan sonra depodaki çözelti kabine pompalanarak tekrar ıslanma aşamasına geçilmektedir. Gerek ıslanma, gerekse kuruma aşamalarına ait sıcaklık ve zaman ayarları kontrol panelinden programlanabilmektedir. ıslanma-kuruma çevrimlerinde toplam beş saat süren ve 120 dakika ıslanma (20 °C %3,5 NaCl çözeltisi ile), 30 dakika kuruma (60 °C sıcak hava ile), 150 dakika kuruma (20 °C normal hava ile) gerçekleştirilen eskitme süreci bir çevrim kabul edilmiş, numunelere toplam 200 çevrim uygulanmıştır. Korozif ortamdaki numunelerde 5., 100. ve 200. çevrimlerde korozyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

Korozyon ölçümleri 20 °C ortam sıcaklığında Şekil 1'de görülen üç elektrotlu sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Korozyon numuneleri ve korozyon ölçüm sistemi

Ölçümlerde Gamry REF600 Potentiostat/Galvanostat/ZRA sistemi kullanılmıştır. Referans elektrot doygun kalomel elektrot (SCE) olup karşı elektrot grafitir. Hızlandırılmış korozyon için %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz numunelerde korozyon hızlarının tespit edilmesine yönelik deneylerde elektrolitik ortam yine %3,5 NaCl çözeltisidir.

Öncelikle deney yapılan numunelerin açık devre potansiyelleri belirlenmiştir. Çalışma elektrodunun potansiyeli, referans elektroda göre bir milivoltmetre ile ölçülmüştür. İkinci aşamada numunelere doğru akım ile anodik yönde polarizasyon uygulanmıştır. Açık devre potansiyelinde ölçülen değer  $\pm 150$  mV aralığında 0,2 mV/s tarama hızı ile polarizasyon eğrileri çıkarılmıştır. Elde edilen elektrokimyasal verilerin Tafel analizi sonucunda numunelerin, korozyon potansiyelleri ( $E_{corr}$ ) ve korozyon akım yoğunlukları ( $I_{corr}$ ) belirlenmiştir (Şekil 2).

Korozyon akım yoğunluğu değerlerine karşı gelen korozyon hızı değerleri şu ifade ile hesaplanabilir:

$$CR = I_{corr} \cdot K \cdot EW / d \cdot A$$

Burada;

CR : korozyon hızı (mm/yıl)

K : korozyon hızı sabiti (3272 mm/A.cm.yıl)

d : yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)

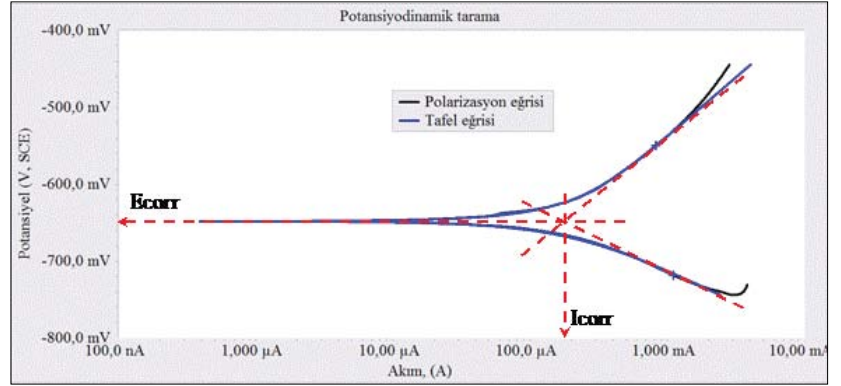
$I_{corr}$  : korozyon akımı (A)

EW : eşdeğer ağırlık (g/mol)

A : örnek alanı (cm<sup>2</sup>) olmaktadır.

### 2.3.4. Klor Penetrasyon Derinliği Ölçümü

Korozyon numunelerine ek olarak beton karışımlardan ayrıca 10/10 cm silindir numuneler alınarak, aynı kür



Şekil 2. Betonarme numunelerde polarizasyon eğrisi ve Tafel analizi

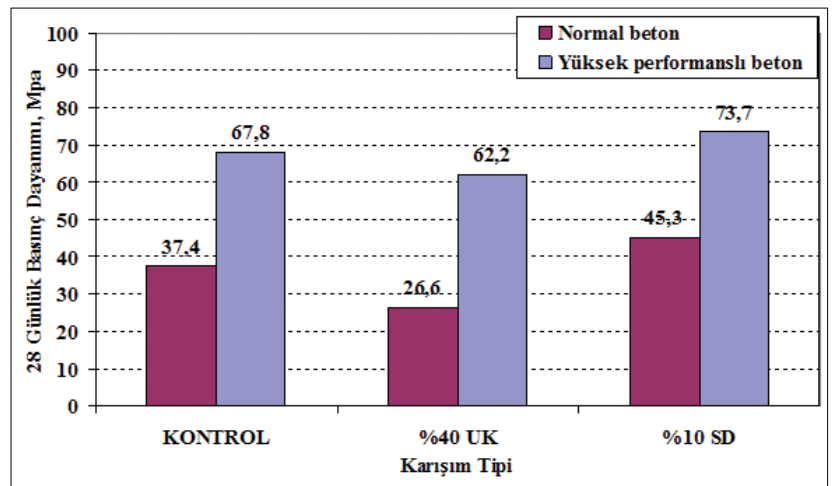
periyotundan geçirilmiş ve yine ıslanma-kuruma kabineye yerleştirilmiştir. Islanma-kuruma etkisinde 200 çevrimden sonra, silindir örnekler eksenine doğrultusunda yarılmış, kırılmış yüzeylere %0,2 konsantrasyonda AgNO<sub>3</sub> çözeltisi püskürtülerek klor penetrasyon derinlikleri tespit edilmiştir. Yöntem göre klorür ile kirlenmiş bölge gri renkte kalırken klorür içermeyen bölge kahverengi görünüm almıştır (Meck, Sirivivatnanon, 2003).

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

Deneylerden elde edilen bulgular bu bölümde sunulmaktadır.

#### 3.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

Normal ve yüksek dayanımlı olarak hazırlanan betonların basınç mukavemeti değerleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Buna göre, karışımlarda uçucu kül kullanımı basınç dayanımını bir miktar azaltmıştır. Bu azalmanın uçucu kül kullanım oranının yüksek olması ve puzolanik reaksiyonların henüz tamamlanmamış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Karışımlarda %10 oranında silis dumanı kullanımının gerek puzolanik reaksiyonlar gerekse boşluk doldurma (filler) etkisi ile beton basınç dayanımlarını arttırdığı gözlenmiştir.



Şekil 3. Normal ve yüksek performanslı betonların basınç dayanımı değerleri

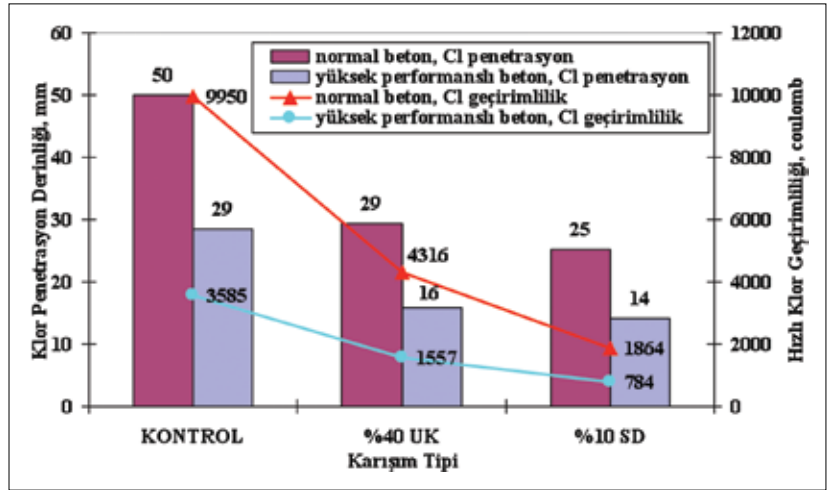
### 3.2. Hızlı Klor Geçirirliiği ve Klor Penetrasyon Derinliiği Sonuçları

Normal ve yüksek dayanımlı karışımların hızlı klor geçirirliiği deney sonuçları Şekil 4'te görülmektedir. Normal dayanımlı betonlarda, kontrol betonlarına göre %40 oranında uçucu kül kullanımı hızlı klor geçirirliiği değerlerini %57, %10 oranında silis dumanı kullanımı hızlı klor geçirirliiği değerlerini %81 oranında azaltmıştır. Yüksek dayanımlı betonlarda, kontrol betonlarına göre %40 oranında uçucu kül kullanımı hızlı klor geçirirliiği değerlerini %57, %10 oranında silis dumanı kullanımı hızlı klor geçirirliiği değerlerini %78 oranında azaltmıştır.

ASTM C 1202–97 standardı esaslarına göre betonlar, Tablo 5'de verilen beş klor geçirirlilik sınıfına ayrılırlar.

Hem normal dayanımlı betonlarda hem de yüksek dayanımlı betonlarda %40 oranında uçucu kül kullanımı klor geçirirliiğini bir üst performans sınıfına taşımıştır. Karışımlarda %10 oranında silis dumanı kullanılması ile iki üst sınıfa geçmiştir. Mineral katkılı betonlarda azalan klor geçirirliiği, azalan boşluk yapısı ile sağlanan düşük geçirirlilik ve yüksek elektriksel direnç özelliklerinin sonucudur.

Şekil 4'te aynı zamanda NaCl çözeltisinde 200 ıslanma-kuruma çevrimi sonucunda ölçülen klor penetrasyon derinliiği değerleri görülmektedir. Normal dayanımlı kontrol betonunun tamamı klorür iyonları tarafından kirletilirken mineral katkılı betonlarda penetrasyon derinliiği daha az olmuştur. Özellikle silis dumanı kullanımı ile penetrasyon derinliiği kontrol betonuna göre yarıya düşmektedir. Yüksek performanslı betonlarda ise, düşük geçirirlilik nedeni ile daha düşük değerler elde edilmiştir. Chalee vd. (2007) değişik su/çimento oranlarına ve çeşitli uçucu kül oranlarına sahip betonlarda yaptıkları



Şekil 4. Beton karışımlarının hızlı klor geçirirliiği ve klor penetrasyon derinliiği sonuçları.

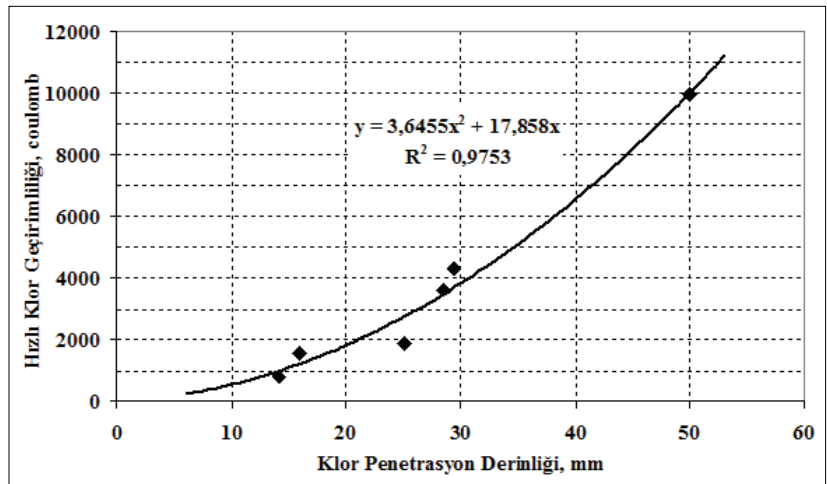
Tablo 5. Hızlı klor geçirirliiği sınıfları (ASTM C 1202–97)

| Hücreden geçen yük değeri, coulomb | Klor geçirirlilik sınıfı |
|------------------------------------|--------------------------|
| < 100                              | İhmal edilebilir         |
| 100 – 1000                         | Çok düşük                |
| 1000 – 2000                        | Düşük                    |
| 2000 – 4000                        | Orta                     |
| > 4000                             | Yüksek                   |

deneylerden, uçucu küllü betonlarda klor penetrasyonunun sadece çimento içeren betonlara göre oldukça düşük olduğunu, uçucu kül oranı arttıkça klor penetrasyonunun azaldığını ve buna

göre de gerekli pas payının azaltılabileceğini rapor etmektedir.

Tüm karışımlar birlikte değerlendirildiğinde, klor penetrasyon derinliiği



Şekil 5. Tüm karışımlar birlikte değerlendirildiğinde klor penetrasyon derinliiği – hızlı klor iyon geçirirliiği ilişkisi

değerleri ile klor geçirimsizlik değerleri arasındaki ilişki Şekil 5'den görülebilir.

Bu iki olgu arasında iyi bir ilişki bulunduğu Şekil 5'ten görülmektedir. Betonun klorür geçirimsizliği yüksek ise iyonlar daha kolay nüfuz edecektir

Tersi durumda, iyon penetrasyonu kolay olan bir betonda daha yüksek iyon geçirimsizliği görülecektir. Grafiğe göre hızlı klor iyon geçirimsizliği değerleri klor penetrasyon değerlerinin karesi ile orantılıdır.

### 3.3. Korozyon Testi Sonuçları

Numuneler üzerinde yapılan korozyon deneylerinde, numunelerin korozyon potansiyeli (E<sub>corr</sub>) değerleri, korozyon akım yoğunluğu (I<sub>corr</sub>) değerleri ve korozyon hızı (CR) değerleri tespit edilmiştir.

Genel olarak bakıldığında, doygun kireç çözeltilisinde bekleyen numunelerin

**Tablo 6.** Korozyon akım yoğunluğu değerlerinin sınıflandırılması (ACI 222R-01 2001, SH-RP-S-330 1993)

| Korozyon akım yoğunluğu, I <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> ) | Korozyon seviyesi |
|--|-------------------|
| < 0,1  | İhmal edilebilir  |
| 0,1 – 0,5  | Düşük             |
| 0,5 – 1  | Orta              |
| > 1  | Yüksek            |

değişik zamanlarda ölçülen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin tümünün 0,1 μA/cm<sup>2</sup> değerinden çok daha düşük olduğu görülmüştür. Buna göre standart kürde bekleyen kontrol ve mineral katkılı betonların hepsi Tablo 6'da verilen "ihmal edilebilir" sınıfa girmektedir. Beklendiği üzere agresif olmayan standart kür ortamında korozyon gelişimi görülmemiştir.

NaCl çözeltilisine maruz betonarme numunelerde 5., 100. ve 200. ıslanma-kuruma çevrimi sırasında gerçekleş-

tirilen korozyon ölçümleri sonucunda Tafel analizi ile elde edilen E<sub>corr</sub>, I<sub>corr</sub> ve CR değerleri Tablo 7'de verilmektedir. Normal dayanım sınıfında kontrol ve mineral katkılı betonlara gömülü donatıların korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 6'da, yüksek performanslı betonlarda elde edilen donatı korozyon akım yoğunluğu değerleri ise Şekil 7'de verilmiştir.

Potansiyel değerleri, çeliğin bulunduğu ortamda korozyon açısından aktif veya pasif durum bilgisini vermektedir.

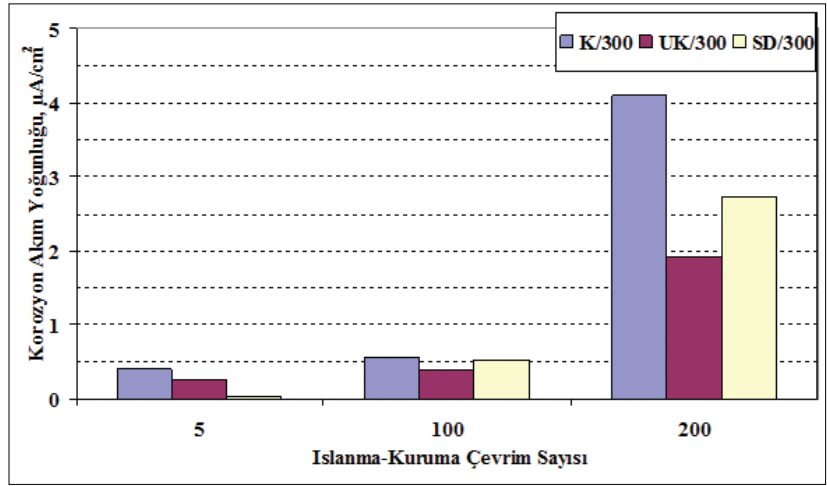
**Tablo 7.** NaCl çözeltilisinde ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre korozyon potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı değerleri

| Karışımlar | Çevrim sayısı | E <sub>corr</sub> (mV) | I <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> ) | CR (mm/yıl) |
|------------|---------------|------------------------|---|-------------|
| K300       | 5. çevrim     | -482                   | 0,399458                                | 0,004636    |
|            | 100. çevrim   | -633                   | 0,560000                                | 0,006499    |
|            | 200. çevrim   | -683                   | 4,095833                                | 0,047540    |
| UK300      | 5. çevrim     | -538                   | 0,261250                                | 0,003029    |
|            | 100. çevrim   | -596                   | 0,376667                                | 0,004373    |
|            | 200. çevrim   | -618                   | 1,917917                                | 0,022269    |
| SF300      | 5. çevrim     | -681                   | 0,035075                                | 0,000407    |
|            | 100. çevrim   | -610                   | 0,534375                                | 0,006198    |
|            | 200. çevrim   | -634                   | 2,737500                                | 0,031796    |
| K400       | 5. çevrim     | -517                   | 0,239500                                | 0,002777    |
|            | 100. çevrim   | -624                   | 0,486875                                | 0,005650    |
|            | 200. çevrim   | -637                   | 1,983333                                | 0,023003    |
| UK400      | 5. çevrim     | -556                   | 0,066313                                | 0,000769    |
|            | 100. çevrim   | -628                   | 0,424167                                | 0,004920    |
|            | 200. çevrim   | -607                   | 1,729167                                | 0,020014    |
| SF400      | 5. çevrim     | -600                   | 0,013181                                | 0,000153    |
|            | 100. çevrim   | -569                   | 0,528333                                | 0,006131    |
|            | 200. çevrim   | -642                   | 1,820833                                | 0,021135    |

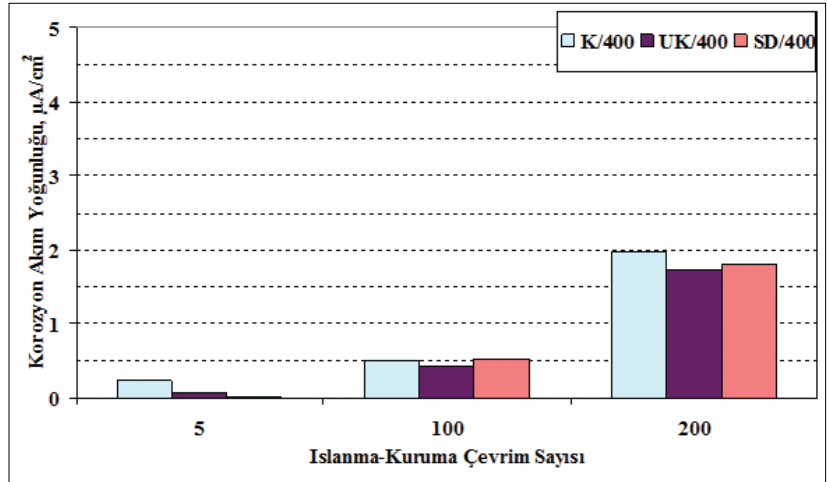
Zamanla negatif yönde artan potansiyel değerleri donatılarda korozyonun ilerlediğini göstermektedir. Genel olarak Tablo 7'deki korozyon potansiyeli değerlerine bakıldığında çevrim sayısı arttıkça korozyon potansiyeli değerlerinin daha negatif olduğu, korozyonun ilerlediği görülmektedir. Ancak bu bilgi korozyonun gelişim hızı konusunda yeterli değildir. bunun için Icorr değerlerinin incelenmesi gerekir. Diğer yandan, mineral katkıli betonlardaki donatıların potansiyel değişimleri kontrol betonlarına göre daha düşüktür. Bu durum, Yaeu ve Kim (2005) ile Choi, Kim ve Lee (2006)'nin mineral katkıli betonlara gömülü donatılardan elde ettikleri bulgular ile uyumludur.

Bilindiği üzere, donatılarda korozyon gelişimi, başlangıç ve yayınma periyodu olmak üzere temel iki aşamadan oluşmaktadır. Başlangıç aşaması, yapı imalatından sonra donatının henüz korunduğu, CO<sub>2</sub> ve Cl<sup>-</sup> gibi zararlı etkilerin betona nüfuz ettiği süredir. Etki cephesi donatıya ulaştıktan sonra ise korozyonun hız kazandığı ikinci aşama olan yayınma periyodu başlar.

Deneysel programda sodyum klorür çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz betonarme numunelerde ilk aşamalarda çok düşük seviyede korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Çevrim sayısı arttıkça bir başka deyişle zaman ilerledikçe korozyon akım yoğunluğu değerleri yükselmiştir. Tüm ölçümlerde normal dayanımlı kontrol betonuna gömülü donatılarda en yüksek korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Uçucu kül ve silis dumanı içeren katkıli betonlarda korozyon gelişimi daha yavaştır. Başlangıç aşamalarında fiziksel bariyer etkisi daha güçlü olan silis dumanı içeren betonlarda ihmal edilebilir mertebede korozyon gelişimi görülürken, zamanla



Şekil 6. Normal betonlara gömülü donatıların ıslanma-kuruma etkisinde korozyon gelişimi



Şekil 7. Yüksek performanslı betonlara gömülü donatıların ıslanma-kuruma etkisinde korozyon gelişimi

azalan kimyasal koruma nedeni ile artış görülmüştür. Ancak yine de kontrol betonundan daha düşük seviyelerde gerçekleşmektedir. Normal dayanımlı betonlarda uçucu kül kullanımı ile korozyon akım yoğunluğunda azalma sağlanmıştır. Gerek fiziksel gerekse kimyasal korumaya sahip numunelerde daha yavaş gelişim söz konusudur. İslanma-kuruma etkisinde 200. çevrim sonuçlarına bakıldığında donatılarda korozyon akım yoğunluğu, kontrol betonlarına göre uçucu kül katkıli betonlarda yaklaşık %53 silis dumanı katkıli

betonlarda ise yaklaşık %33 daha az olmaktadır.

Yüksek performanslı betonlarda elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerlerine bakıldığında, normal dayanımlı sınıflardan daha az değerler ile karşılaşılmıştır. Bu durum aynı zamanda standartlarda önerilen, izin verilebilecek en büyük su/çimento oranı ve en az bağlayıcı madde miktarının önemini ortaya koymaktadır. Yüksek oranda bağlayıcı madde içeren ve daha düşük su/bağlayıcı madde ile hazırlanmış

betonlarda geçirimsizlik çok daha düşük mertebelindedir. Korozyon başlangıç aşamasında kontrol ve mineral katkı betonlar arasında önemli farklılıklar varken, ileri zamanlarda benzer korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Yüksek performanslı betonlarda mineral katkı kullanımının ilerleyen yaşlarda korozyon akım yoğunluğunu bir miktar düşürse de etkisi yok gibi görünmektedir.

NaCl çözeltisinde 200 ıslanma-kuruma çevrimi sonundaki korozyon akım yoğunluğu değerlerine bakıldığında, tüm karışımlara gömülü donatılarda yüksek seviyede korozyon gelişimi görülmektedir. Ancak numunelerin maruz kaldığı ortamın etkisinin doğal ortama göre hızlandırılmış ve şiddetlendirilmiş olması nedeniyle yüksek derecede korozyon olduğu unutulmamalıdır. Sodyum klorür çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisi ve kuruma fazındaki 60 °C'lık sıcaklık uygulamaları korozyon gelişimi için uygun bir ortam oluşturmaktadır.

Islanma-kuruma çevrimleri sonrasında kontrol ve mineral katkı betonlara gömülü donatılar beton içerisinden çı-

karılmıştır. Şekil 8'de normal dayanımlı betonlar içerisinde çıkarılmış donatılar görülmektedir.

Görüntüler, korozyon deneyleri sonucu elde edilen elektrokimyasal veriler ile uyumlu olup, kontrol betonuna gömülü donatılarda daha fazla oranda korozyon geliştiği görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Mineral katkı olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanımının betona gömülü donatıların korozyon gelişimine etkisinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Mineral katkı olarak %40 oranında uçucu kül kullanımı beton basınç dayanımlarını bir miktar azaltmıştır. Bunun sebebinin ikame oranının yüksek olması ve puzolanik reaksiyonların 28 günde yeterince gelişmemiş olduğu düşünülmektedir. Beton karışımlarında %10 oranında silis dumanı kullanımı durumunda ise dayanımlar artış göstermiştir. Silis dumanının puzolanik olarak çok aktif olması ve boşlukları dol-

durması nedeniyle basınç dayanımını arttırdığı bilinen bir gerçektir.

- Hızlı klor geçirimsizliği değerleri açısından bakıldığında, uçucu kül kullanımı olumlu sonuçlar vermiştir. Geçirimsizlik değerleri %57 oranında azalmıştır. Karışımlarda %10 oranında silis dumanı kullanımı ise hızlı klor geçirimsizliği değerlerini yaklaşık %80 mertebesinde azaltmıştır. Yüksek performanslı beton kullanımında, normal betonlara göre klor geçirimsizlik değerleri % 62-63 oranında daha azdır.
- Mineral katkı kullanımı ile klorür penetrasyonu oldukça azaltılabilir. Betonda %40 oranında uçucu kül veya %10 oranında silis dumanı kullanımı ile penetrasyon değerlerinde yarı yarıya azalmalar kaydedilmiştir. Yüksek performanslı betonlarda klorür penetrasyonu çok daha azdır.
- Hızlı klor geçirimsizliği deneyi ile klor penetrasyon derinliği ölçümleri arasında iyi bir ilişki bulunmaktadır. Hızlı klor iyon geçirimsizliği değerleri, klor penetrasyon değerlerinin karesi ile orantılıdır.



(K300)



(UK300)



(SF300)

Şekil 6. NaCl çözeltisinde 200 ıslanma-kuruma çevriminden sonra beton içerisinden çıkarılan donatılar

- Kirece doygun suda bekleyen numunelerden elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin tümü ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum korozif olmayan bu ortamda beklenen sonuçtur.
- Hızlandırılmış korozyon etkisinde başlangıç aşamalarında korozyon akım yoğunluğu değerleri düşük iken çevrim sayısı artıkça korozyon akım yoğunluğu değerleri de artmıştır. İlerlemiş korozyon durumunda mineral katkılı betonlarda daha geçirimsiz yapı nedeni ile sağlanan fiziksel koruma oldukça etkindir. Mineral katkı kullanımı NaCl çözeltisi ile uygulanan ıslanma-kuruma etkisinde korozyon akım yoğunluğu değerlerini azaltmıştır. Yüksek performanslı betonlarda ise ilerlemiş korozyon durumunda mineral katkı kullanımı daha az fayda sağlamaktadır. Yüksek çimento miktarı ve düşük su/çimento oranı ile üretilen katkısız betonlara yakın sonuçlar bulunmuştur. Bu durum aynı zamanda standartlarda donatı korozyonuna karşı önerilen en düşük beton kalitesinin önemini ortaya koymaktadır.

Prefabrik betonarme yapı elemanlarının beton malzemesinde mineral katkıların kullanımıyla, betondan beklenen fiziksel ve mekanik özellikler ile birlikte istenen dayanıklılık sağlanabilir. Agresif çevre koşullarına maruz kalacak prefabrik betonarme sistemlerde, beton karışımlarında mineral katkı kullanımı, donatıların korozyon gelişimine karşı ilave bir önlem olarak kullanılabilir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, deneysel çalışmada malzeme desteği sağlayan İDÇ İzmir Demir Çelik Sanayi A.Ş., BASF Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş., BATIÇİM Batı Anadolu Çimento Sanayi A.Ş. ve SİKA Yapı

Kimyasalları A.Ş. firmalarına teşekkür eder.

## KAYNAKÇA

ACI 222 R01 (2001). *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ASTM C494/C494M-05a (2005). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C876-91 (1999). *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C1202-97 (1997). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM G5-94 (2004). *Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalcılık (Durabilite)*. D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.

BS 8110 (1997). *Structural Use of Concrete. Code of Practice for Design and Construction*. British Standards Institution, London.

Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanchorn, A., Jaturapitakul C. (2007). *Effect of W/C Ratio on Covering Depth of Fly Ash Concrete in Marine Environment*. *Construction and Building Materials*, 21, 965-971

Choi, Y., Kim, J., Lee, K. (2006). *Corrosion Behavior of Steel Bar Embedded in Fly Ash Concrete*. *Corrosion Science*, 48, 1733-1745.

EN 1992 (2001). *Design of Concrete Structures*. European Committee for Standardization, Brussels.

Ha, T., Muralidharan, S., Bae, J., Ha, Y., Lee, H., Park, K., et al. (2007). *Accelerated Short-Term Techniques to Evaluate*

*the Corrosion Performance of Steel in Fly Ash Blended Concrete*. *Building and Environment*, 42, 78-85.

Meck E., Sirivivatnanon V. (2003). *Field Indicator of Chloride Penetration Depth*. *Cement and Concrete Research*, 33, 1113-1117.

Polder, R.B., Peelen W.H.A. (2002). *Characterisation of Chloride Transport and Reinforcement Corrosion in Concrete Under Cyclic Wetting and Drying by Electrical Resistivity*. *Cement and Concrete Composites*, 24, 427-435.

SHRP-S330 (1993). *Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion Volume 8: Procedure Manual*. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.

Sun, W., Zhang, Y., Liu, S., Zhang, Y. (2004). *The Influence of Mineral Admixtures on Resistance to Corrosion of Steel Bars in Green High-Performance Concrete*. *Cement and Concrete Research*, 34, 1781-1785.

TS 500 (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS-EN 197 (2002). *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS-EN 206-1 (2002). *Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Türkmen, İ., Gavgalı, M., Gül, R. (2003). *Influence of Mineral Admixtures on the Mechanical Properties and Corrosion of Steel Embedded in High Strength Concrete*. *Materials Letters*, 57, 2037-2043.

Yazıcı, H., Aydın, S., Yiğiter, H., Baradan, B. (2005) *Effect of Steam Curing on Class C High-Volume Fly Ash Concrete Mixtures*. *Cement and Concrete Research*, 35, 1122-1127.

Yeau, K.Y., Kim, E.K. (2005). *An Experimental Study on Corrosion Resistance of Concrete with Ground Granulate Blast-Furnace Slag*. *Cement and Concrete Research*, 35, 1391-1399.