

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONARME DONATISINDA
KLORİD KOROZYONU GELİŞİMİNİN
ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE
BELİRLENMESİ**

Hüseyin YİĞİTER

Aralık, 2008
İZMİR

**BETONARME DONATISINDA
KLORID KOROZYONU GELİŞİMİNİN
ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE
BELİRLENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı**

Hüseyin YİĞİTER

**Aralık, 2008
İZMİR**

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HÜSEYİN YİĞİTER tarafından **PROF. DR. BÜLENT BARADAN** yönetiminde hazırlanan “**BETONARME DONATISINDA KLORİD KOROZYONU GELİŞİMİNİN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bülent BARADAN

Danışman

Prof. Dr. Ahmet ÇAKIR

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Mustafa TOKYAY

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Akın ALTUN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yazar;

üstün bilgi ve sınırsız tecrübeleri ile bu çalışmanın başlangıcından sonuçlandırılmasına kadar her aşamada kendisine yol gösteren danışmanı ve tez yöneticisi Sayın Prof. Dr. Bülent BARADAN' a,

tez izleme toplantılarında değerli fikirleri ile çalışmaya katkı sağlayan Tez İzleme Komitesi Üyeleri Sayın Prof. Dr. Ahmet ÇAKIR'a ve Sayın Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a,

deneysel çalışmalarda ve tez yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Selçuk TÜRKEL'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Halit YAZICI'ya, Sayın İnş. Yük. Müh. Serdar AYDIN'a, Sayın Dr. Mert Yücel YARDIMCI'ya, Sayın İnş. Müh. Cem İPEK'e, Sayın İnş. Müh. Sercan Eren CANAZOĞLU'na ve Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışma arkadaşlarına,

araştırma projelerine destek vererek laboratuvar altyapısının geliştirilmesini sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a,

deneysel çalışmalara malzeme desteği veren Akçansa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş., Batı Anadolu Çimento Sanayi A.Ş., Denizli Çimento A.Ş., Karçimsa Çimento San. ve Tic. A.Ş., Dere Madencilik A.Ş., Basf Yapı Kimyasalları San. A.Ş., Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., İzmir Demir Çelik Sanayi A.Ş., Erege Metal Demir Çelik A.Ş.'ne,

ölçüm ve değerlendirmelerde büyük destek veren Sayın Yrd. Doç. Dr. Uğur MALAYOĞLU'na,

her daim desteği ile yanında olan İnş. Müh. Özlem CEYHAN'a,

yaşamı boyunca daima onur duyacağı çok değerli ailesine ve minik üye ADA'ya, sonsuz teşekkürlerini sunar.

Hüseyin YİĞİTER

Aralık, 2008

BETONARME DONATISINDA KLORİD KOROZYONU GELİŞİMİNİN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

ÖZ

Betonarme yapı sistemi, çok farklı çevresel etkiler altında kullanılabilmesi ile birlikte, beton ve donatı açısından önemli dayanıklılık sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Gerek betonun bozulma sürecinin, gerekse içindeki donatının korozyon sürecinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, yapıların emniyetli servis ömürleri açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında özellikle beton bileşenleri ve beton teknolojisi açısından donatı korozyonunda etkili faktörlerin şekli ve derecelerinin ortaya koyulması amaçlanmıştır. İlk aşamada, donatılarda korozyon gelişiminin izlenmesi için metalürji mühendisliği ve korozyon mühendisliğinin çalışmalarında kullanılan elektrokimyasal yöntemlerden polarizasyon tekniği, betonarme sistemine uygulanmıştır. Betonun kalitesine yönelik su/çimento oranı, çimento dozajı, gibi önemli parametreler, söz konusu yöntem ile değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada, normal ve yüksek performanslı betonlarda mineral katkı (uçucu kül ve silis dumanı) kullanımı, inhibitör kullanımı ve epoksi yalıtımı gibi performans artırıcı uygulamaların donatı korozyonuna etkileri hızlandırılmış süreçte incelenmiştir.

Üçüncü aşamada, beton üretiminde en yaygın olarak kullanılan uçucu kül ile özellikle deniz suyu etkisinde kullanılması tavsiye edilen yüksek fırın cürufunun kullanım oranlarının, donatı korozyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu aşamada ayrıca, standart kür görmüş, buhar kürü uygulanmış ve kür yapılmamış betonarme elemanlardaki korozyon gelişimleri de deneysel program çerçevesindedir. Bulgular, havada ve suda bekleme koşulları ile korozif sodyumklorür ortamında ıslanma-kuruma çevrimlerinde tekrar sayısına ve zamana göre karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Dördüncü aşamada, betonarme elemanlarda pas payı tabakasının kalınlığının donatılardaki korozyon gelişimine etkisi değerlendirilmiştir. Korozif ortamdaki değişik pas payı tabakası kalınlıklarına sahip örneklerden elektrokimyasal yöntemle tahmin edilen malzeme kayıpları, gerçek kütle kayıpları ile karşılaştırılmıştır.

DeneySEL çalışmalarda betonarme örneklerdeki donatı çeliklerinde doğrudan korozyon akım yoğunluğu değerlerinin belirlenmesinin yanında, örneklerde donatı korozyonu ile ilgili dolaylı tekniklere de yer verilmiştir. Betonarme donatılarındaki elektrot potansiyeli değerleri, beton numunelerde hızlı klor geçirimsizliği, klor penetrasyon derinliği, karbonatlaşma derinliği, su emme, pH ve basınç dayanımı verileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçların, klorür etkisine maruz kalacak betonarme elemanlarda, korozyon problemlerinin değerlendirilmesinde yararlı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Klorid korozyonu, korozyon potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu, beton kalitesi, mineral katkı, kür yöntemi, pas payı tabakası.

THE DETERMINATION OF CHLORIDE INDUCED CORROSION OF REBARS BY ELECTROCHEMICAL METHODS

ABSTRACT

Reinforced concrete structures are exposed to important durability problems under different environmental conditions. Evaluation of concrete degradation and rebar corrosion has significant importance on the service life of the structure.

The aim of this research is to investigate the factors that influence the rebar corrosion, especially from the viewpoint of concrete ingredients and concrete production. Firstly, polarization technique which is widely used in the metallurgy and corrosion engineering has been applied to reinforced concrete specimens. The parameters affecting concrete quality, such as water/cement ratio and cement dosage, have been evaluated by this method.

In the second stage, the effects of performance improving applications, such as incorporation of mineral admixtures and corrosion inhibitors, insulation applications with epoxy based materials, on the reinforcement corrosion process in normal and high performance concrete have been investigated under accelerated corrosive conditions.

The effects of replacement ratio of fly ash which is most widely used in concrete production and blast furnace slag that is known for its durability against sea water, have been examined in detail during the third stage. Corrosion potentials of standard cured, steam cured and non-cured specimens were in the scope of this stage. Test results have been comparatively presented with respect to time under different exposure conditions.

Finally, effect of concrete cover thickness on the corrosion behavior of rebars has been investigated. A relationship in gravimetric mass loss values and estimated values from polarization measurements has been established.

In addition to determination of corrosion current density values of steel, indirect methods related with reinforcement corrosion have also been studied. Electrode potentials of reinforcement bars and rapid chloride permeability, chloride penetration depth, carbonation depth, water absorption, pH and compressive strength tests for concrete specimens have been carried out.

The results obtained within the scope of this study are expected to assist understanding of the corrosion problems of reinforced concrete structures that are exposed to chloride contaminated environments.

Keywords: Chloride induced corrosion, corrosion potential, corrosion current density, concrete quality, mineral admixture, curing method, concrete cover.

İÇİNDEKİLER

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	vi
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - KOROZYON	6
2.1 Korozyon Gelişimi	6
2.2 Elektrot Potansiyeli	8
2.3 Korozyon Türleri.....	11
BÖLÜM ÜÇ - BETONARME DONATISININ KOROZYONU	15
3.1 Betonarme Elemanlarda Korozyon Hasarları	19
3.2 Donatıda Korozyon Mekanizmaları.....	22
3.2.1 Atmosferik Korozyon.....	22
3.2.2 Elektrolitik Korozyon	23
3.2.3 Klorid Korozyonu	26
3.2.4 Temas Korozyonu	28
3.3 Çatlaklı Betonda Korozyon.....	28
3.4 Elektrokimyasal Korozyonun Gelişimini Etkileyen Faktörler.....	30
3.4.1 Donatı Üretim Prosesi ve Yüzey Şartlarının Korozyona Etkisi.....	32
3.4.2 Atmosfer Şartlarının Korozyona Etkisi.....	36
3.4.3 Beton Kalitesinin Donatıların Korozyon Davranışına Etkisi.....	40
3.4.4 Çevresel Koşulların Donatı Korozyonu Üzerindeki Etkisi.....	41

3.4.5 Çimento Tipinin Donatı Korozyonuna Etkisi	42
3.4.6 Betonun Klorür İçeriğinin Donatı Korozyonuna Etkisi	45
3.4.7 Betondaki Mineral Katkıların Donatı Korozyonuna Etkisi	47
3.5 Donatı Korozyonuna Karşı Alınacak Önlemler	51
BÖLÜM DÖRT - DONATI KOROZYONUNUN ÖLÇÜMÜ	54
4.1 Korozyon Hızı	55
4.2 Korozyonun İzlenmesi	60
4.2.1 Gözlemsel İnceleme	62
4.2.2 Paspayı Ölçümü	62
4.2.3 Yarı Hücre Potansiyeli	62
4.2.4 Karbonatlaşma Derinliği Ölçümleri	71
4.2.5 Klorid ölçümleri	72
4.2.6 Direnç ölçümleri	74
4.2.7 Polarizasyon	78
4.2.8 Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS)	85
4.2.9 Galvanostatik Atım	89
4.2.10 Elektrokimyasal Gürültü	91
4.2.11 Galvanik Akım	92
4.3 Korozyon Hızının Yerinde Ölçümü	93
BÖLÜM BEŞ - BETONARMEDE KOROZYON HIZI DEĞERLERİ	98
5.1 Laboratuvar Sonuçları	98
5.2 Yerinde Yapılarda I_{corr} Değerleri	99
BÖLÜM ALTI - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	105
6.1 Amaç	105
6.2 Kapsam	105
6.3 Ön Deneme Çalışmaları	113
6.3.1 Malzemeler	113
6.3.2 Beton Karışımları	118
6.3.3. Kür	121

6.3.4 Korozyon Analizleri.....	126
6.4 İkinci Aşama Deneyle (Mineral Katkı, İnhibitör ve Yalıtım Uygulamalarının Donatı Korozyonuna Etkisi)	128
6.4.1 Malzemeler.....	130
6.4.2 Beton Karışımları.....	134
6.4.3 Numuneler ve Kür.....	136
6.4.4 Ölçümler.....	136
6.5 Üçüncü Aşama Deneyle (Uçucu Kül Ve Yüksek Fırın Cürufu Dozajı İle Kür Yönteminin Donatı Korozyonuna Etkisi)	141
6.5.1 Malzemeler.....	144
6.5.2 Beton karışımları.....	148
6.5.3 İncelenen Kür Yöntemleri.....	150
6.5.4 Yapılan Deneyle	151
6.6 Dördüncü Aşama (Paspayı Tabakası Kalınlığının Korozyona Etkisinin İncelenmesi)	154
6.6.1 Malzemeler ve Yöntem.....	154
BÖLÜM YEDİ - ÖN DENEME ÇALIŞMALARI SONUÇLARI.....	156
7.1 Beton Basınç Dayanımları	156
7.2 Su/Çimento Oranı Taramasından Elde Edilen Elektrokimyasal Veriler.....	158
7.3 Çimento Dozajı Taramasından Elde Edilen Elektrokimyasal Veriler	161
7.4 Uçucu Kül Kullanımından Elde Edilen Elektrokimyasal Veriler	164
7.5 Değerlendirme.....	166
BÖLÜM SEKİZ - MİNERAL KATKI, İNHİBİTÖR VE YALITIM UYGULAMALARININ DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ.....	168
8.1 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları	168
8.2 Hızlı Klor Geçirimsizliği Deneyi Sonuçları.....	170
8.3 Klor Penetrasyon Derinliği	176
8.4 Hızlı Klor Geçirimsizliği – Klor Penetrasyon Derinliği İlişkisi.....	180
8.5 Korozyon Ölçümleri	181
8.5.1 Korozif Olmayan Ortamdaki Ölçümler	183

8.5.2 NaCl Etkisinde Korozyon	191
8.6 Değerlendirmeler.....	204
BÖLÜM DOKUZ - UÇUCU KÜL VEYA YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANIM ORANI İLE KÜR YÖNTEMİNİN DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ	206
9.1 Basınç Dayanımı Sonuçları.....	207
9.2 Hızlı Klor Geçirirmliliği Test Sonuçları.....	210
9.3 Su Emme Deneyleri	212
9.4 pH ölçümleri	213
9.5 Karbonatlaşma Ölçümü Verileri	217
9.6 Klor Penetrasyon Derinliği Sonuçları	223
9.7 Korozyon Ölçümleri	228
9.7.1 Elektrot Potansiyeli Değerleri.....	228
9.7.2 Korozyon Akım Yoğunluğu Değerleri	246
BÖLÜM ON - PAS PAYI TABAKASI KALINLIğININ DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ	265
10.1 Elektrokimyasal Ölçümler	267
10.2 Gözlemsel İncelemeler.....	271
10.3 Donatılarda Kütle Kayıpları.....	280
BÖLÜM ONBİR - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	283
KAYNAKLAR	291
EKLER.....	302
EK-1: SEMBOL LİSTESİ	303

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Betonarme veya öngerilmeli beton yapılar açısından çelik, beton içine gömülü olarak kullanılmaktadır. Doğru dizayn edilmiş geçirimsiz, kaliteli bir beton, çelik donatıyı fiziksel ve kimyasal olarak korozyondan korur. Fiziksel koruma zararlı maddelerin donatıya ulaşmasının engellenmesiyle, kimyasal koruma ise yüksek pH'lı bir ortam yaratılması ile gerçekleşir.

Ancak şiddetli çevresel etkilere maruz yapılarda kısa sürede korozyon gelişimleri söz konusu olabilmektedir. Deniz yapılarında ve kimyasal madde üreten tesislerde çok hızlı gelişebilen korozyon problemi, nispeten uzun zamanlarda klorürlere ve karbondioksit etkisine maruz diğer yapılarda da ortaya çıkmaktadır.

Betonarme veya öngerilmeli beton yapılarda oluşan donatı korozyonu, yapının stabilitesi açısından çok önemli sonuçlar doğurur. Çelik donatı korozyon sonucu kesit ve düktilite kaybına uğrar. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda meydana gelen genleşme 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.

Donatı-beton aderansı da korozyondan olumsuz etkilenir, ilerlemiş hasar durumunda aderans tamamen yok olur. Az miktardaki kesit kaybının bile öngerilmeli beton elemanlarda kullanılan öngerme halatlarının kopmasına yol açabilmesi, bu tür yapıların korozyona karşı çok daha hassas olduklarını gösterir.

Gereken tamir ve bakım masraflarının büyük ekonomik kayıplara yol açması, güvenlik kayıplarının yanında bir diğer önemli konu olarak kendini göstermektedir.

Bu sebeplerle, betonarme donatısının korozyonu konusunda çok kapsamlı araştırmalar yapılmış ve korozyonu önlemek amacıyla standartlara çeşitli öneriler ve sınırlandırmalar getirilmiştir.

Betonarme yapılarda kullanılan beton kalitesi ve kompozisyonu donatı korozyonunun gelişiminde büyük bir rol oynamaktadır. Çimento tipinin doğru seçimi, su/çimento oranının azaltılması, çimento dozajının artırılması ve basınç dayanımı seviyesinin artırılması betonarme yapılarda korozyona karşı alınacak önlemlerin başında gelmektedir. Gerçekte bu önlemlerin tamamı, betonun geçirimsizliğini sağlamak amacıyla ele alınmaktadır. Diğer yandan, çevresel etkinin şiddetine göre pas payı tabakası kalınlıklarının artırılması daha iyi fiziksel koruma sağlanması amacıyla uygulanır.

Donatı korozyonu günümüzde betonarme yapıların servis ömürlerini belirleyen en önemli faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Yaşanan depremler göstermiştir ki, yapı imalatlarındaki malzeme ve işçilik hatalarının yanı sıra donatı korozyonunun da yıkımlardaki rolü büyüktür. Donatılardaki korozyon gelişiminin hızının ve miktarının belirlenmesi alınacak önlemler açısından büyük önem taşımaktadır.

Ne var ki, betonarme donatısındaki korozyon miktarının belirlenmesi klasik yöntemlerle neredeyse imkansız olacak kadar zahmetli, pahalı ve uzun zaman alan bir iştir. Ayrıca, ulaşılması mümkün olmayan noktalarda ve yapı stabilitesinin tehlikeye sokulma riski bulunan durumlarda yapıya tahribat veren klasik yöntemlerin kullanılması mümkün olmamaktadır. Bu yüzden günümüzde bu zahmet ve tahribatı ortadan kaldıracak yöntemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Temeli elektrokimyasal ölçümlere dayanan bu metotlarla, donatılardaki korozyon gelişimi tahribatsız ve doğru olarak tespit edilmeye çalışılmaktadır.

Donatı korozyonunun hasarsız bir şekilde tespiti için oldukça geniş uygulanan yöntemler elektrokimyasal tekniklerdir. 1949'da Pourbaix, Ca(OH)_2 'ye doymun bir çözeltiye batırılmış çubuklara polarizasyon eğrilerini uygulamış ve donatıların korozyon davranışını ortaya koymaya çalışmıştır. Daha sonra 1959'da Kaesche ve

Baümel benzer bir çalışmayı harç örneklerinde yapmışlardır. Polarizasyon direnci gibi daha ileri düzeyde elektrokimyasal tekniklerin uygulanması 1970'lerin başlarında gerçekleşmiştir. Elektrokimyasal impedans veya elektrokimyasal ses 1980'lerde kullanılmaya başlanmıştır.

Bu aşamalardan sonra gerçek yapılara uygulanması ile birlikte elektrokimyasal teknikler oldukça hızlı gelişmeye başlamıştır. Donatılarda korozyon gelişim hızı yapılar için risk sınıflandırmaları yapılmıştır. Çeşitli elektrokimyasal teknikler ile korozyon davranışları belirlenmeye çalışılmakta, tahmin edilen malzeme kayıpları ile gerçek malzeme kayıpları ilişkilendirme çalışmaları devam etmektedir.

Korozyon gelişimi için zaman önemli bir parametredir. Çoğu durumda betonarme sistemlerde korozyonun doğal olarak oluşması uzun zaman gerektirdiğinden, araştırma çalışmaları genellikle hızlandırılmış etki altında gerçekleştirilir. Elektrokimyasal teknikler ile yapılan korozyon çalışmalarında genellikle, örneklere zorlanmış elektriksel potansiyel veya elektriksel akım uygulanarak, örnekte korozyon gelişimi yapay olarak sağlanır. Ancak bu durumda doğal etki süreci ile uyum belirsizlik göstermektedir. Doğal etkinin şiddetinin artırılması ikinci bir korozyon oluşturma yöntemi olup bu şekilde gerçekleştirilen çalışmalar çok nadirdir.

Donatı korozyonu sebebi ile erken hasara uğrayan yapıların kalan yapısal koşullarının belirlenmesi ihtiyacı, korozyon araştırmaları için bir itici güç oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında özellikle beton bileşenleri ve beton teknolojisi açısından donatı korozyonunda etkili faktörlerin şekli ve derecelerinin ortaya koyulması amaçlanmıştır. Beton teknolojisine uygun olarak üretilmiş kaliteli betonların, içlerine gömülü çelik donatıları korudukları bilinmesine karşın, kompozisyonlarındaki ve üretim süreçlerindeki değişikliklerin etki dereceleri ve mertebeleri net olarak ortaya koyulamamıştır.

Sunulan çalışmanın ikinci bölümünde genel korozyon bilgileri verilmiş, üçüncü bölümde ise betonarmede donatı korozyonu gelişimi detaylı olarak anlatılmış ve etkili faktörler tartışılmıştır. Donatı korozyonu ölçüm yöntemleri ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar dördüncü bölümde sunulmuştur. Beşinci bölümde korozyon gelişimi ve risk sınıflandırmalarına yer verilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar dört aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, donatılarda korozyon gelişiminin izlenmesi için metalürji mühendisliği ve korozyon mühendisliğinin çalışmalarında kullanılan elektrokimyasal yöntemlerden polarizasyon tekniği, betonarme sistemine uygulanmıştır. Betonun kalitesine yönelik su/çimento oranı, çimento dozajı, gibi önemli parametreler, söz konusu yöntem ile değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada, normal ve yüksek performanslı betonlarda mineral katkı (uçucu kül ve silis dumanı) kullanımı, inhibitör kullanımı ve epoksi yalıtımı gibi performans artırıcı uygulamaların donatı korozyonuna etkileri hızlandırılmış doğal etki sürecinde incelenmiştir.

Üçüncü aşamada, beton üretiminde en yaygın olarak kullanılan uçucu kül ile özellikle deniz suyu etkisinde kullanılması tavsiye edilen yüksek fırın cürufunun kullanım oranlarının, donatı korozyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Düşük ve yüksek kullanım oranlarının yanında bu aşamada ayrıca, standart kür görmüş, buhar kürü uygulanmış ve kür yapılmamış betonarme elemanlardaki korozyon gelişimleri de deneysel program çerçevesindedir. Havada ve suda bekleme koşulları ile korozif sodyumklorür ortamında ıslanma-kuruma çevrimlerinde tekrar sayısına ve zamana göre elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Dördüncü aşamada, betonarme elemanlarda pas payı tabakasının kalınlığının donatılardaki korozyon gelişimine etkisi değerlendirilmiştir. Korozif ortamdaki değişik pas payı tabakası kalınlıklarına sahip örneklerden elektrokimyasal yöntemle tahmin edilen malzeme kayıpları, gerçek kütle kayıpları ile karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda betonarme örneklerdeki donatı çeliklerinde doğrudan korozyon akım yoğunluğu değerlerinin belirlenmesinin yanında, örneklerde donatı korozyonu ile ilgili dolaylı tekniklere de yer verilmiştir. Betonarme donatılarındaki elektrot potansiyeli değerleri, beton numunelerde hızlı klor geirirnililiği, klor penetrasyon derinliği, karbonatlaşma derinliği, su emme, pH ve basınç dayanımı verileri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

BÖLÜM İKİ

KOROZYON

Genellikle metal olan bir malzeme ile bulunduğu ortam arasında malzemenin ve özelliklerinin bozulmasına yol açan kimyasal ya da elektrokimyasal reaksiyon, “korozyon” olarak tanımlanır (ASTM G15–04, 2004). Terminolojik olarak bu şekilde tanımlansa da korozyon olayının fiziksel karşılığı şu şekilde açıklanabilir: Korozyon, malzemelerin doğada bulunan en kararlı (en düşük enerjili) durumları olan oksit haline geçme olayıdır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Doğada cevher halinde bulunan metal hammaddesine yüksek enerji verilerek, istenilen özellikleri sağlayan kullanılabilir mühendislik malzemeleri üretilir. Ancak bu malzemeler uygun ortam ile karşılaştıklarında zamanla daha istikrarlı oldukları düşük entropili hallerine dönmeye çalışırlar. Bu bozulma süreci korozyon olarak tanımlanır. Korozyon yerine bazı durumlarda oksitlenme, paslanma, küflenme terimleri de kullanılır.

2.1 Korozyon Gelişimi

Korozyon olayının başlayıp ilerleyebilmesi için dört temel unsurun yerine getirilmesi şartı vardır. Aksi takdirde bu şartlardan biri sağlanmadığında korozyon gelişimi durur. Bu şartlar şunlardır:

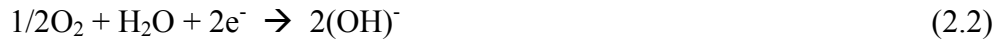
- Anodik reaksiyonlar,
- Katodik reaksiyonlar,
- Anodik ve katodik bölgeler arasında iyon transferi,
- Elektron akışı.

Malzemenin bulunduğu ortam içerisindeki nem ve oksijen varlığı ile iyon ve elektron taşınımı bu şartları oldukça etkilemektedir. Ortamdaki nem ve oksijen, katodik reaksiyonlarda etkili olduğundan, bunların varlığı ve konsantrasyonları korozyon gelişiminde önem arz etmektedir. Diğer yandan, bölgeler arasında elektron ve iyon transferi açısından ortamın elektrolitikliği korozyon olayında önemli bir rol oynamaktadır.

Anodik reaksiyon metallerin çözünmesini tarif etmektedir. Demir için reaksiyon, Denklem 2.1’de verilen şekilde gelişmektedir:



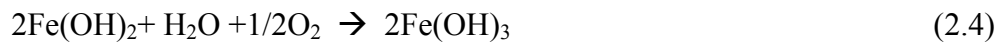
Katodik reaksiyon ise su ve oksijenin hidroksil iyonlarını oluşturduğu indirgenme işleminden oluşur (Denklem 2.2):



Anodik ve katodik reaksiyon bölgeleri arasındaki elektrolitik ortam ise, iyon transferi görevini üstlenmektedir. Betonarme açısından düşünüldüğünde nemli ve oksijenin bulunduğu elektrolitik ortamda iyon transferi beton bünyesinde gerçekleşmektedir.

Elektron akışının sağlanması için de anodik ve katodik bölgeler arasında metalik bir bağlantının olması gerekmektedir. Monolitik betonarme yapılarda donatılar sürekli ve temas halinde olduklarından bu şart genellikle sağlanmaktadır.

Daha sonra anodik ve katodik reaksiyon ürünleri birleşerek Denklem 2.3 ve Denklem 2.4’teki korozyon ürünlerini meydana getirirler.



Oluşan demirhidroksit ürünleri Fe_3O_4 , FeO , Fe_2O_3 , $FeOOH$, gibi oksit ve oksihidroksitlere dönüşebilir. Bu çeşitli oksitlerin oluşumu üzerinde pH, oksijen varlığı, çeşitli çevresel kirlilikler, metalin kompozisyonu ve oluşan ürünlerin yüzeye yapışma karakterleri etkilidir. Ayrıca sözü edilen çevresel faktörler korozyon reaksiyonlarını etkileyerek farklı şekillerde gelişmesini sağlayabilirler. Örneğin Bölüm 3'te açıklanan klorid korozyonunda klor iyonları reaksiyonları hızlandırıcı etki yaratmaktadır.

Sistemdeki iyon ve elektron akışı korozyon hızının bir ölçütü olarak alınabilir. Korozyon hızı, birim alandan birim zamanda oluşan kütle kaybı olarak, birim zamanda oluşan kalınlık azalması olarak veya birim alandaki akım yoğunluğu olarak verilebilir. Demir veya çelik için, değişik fiziksel ve elektrokimyasal korozyon hızı değerlerine ait örnekler Denklem 2.5 ve 2.6'daki şekilde ifade edilebilir:

$$\bullet \quad 1 \text{ mA/cm}^2 \approx 11,6 \text{ mm/yıl} \approx 250 \text{ g/m}^2\text{gün} \quad (2.5)$$

$$\bullet \quad 1 \text{ } \mu\text{A/cm}^2 \approx 12 \text{ } \mu\text{m/yıl} \approx 0,25 \text{ g/m}^2\text{gün} \quad (2.6)$$

2.2 Elektrot Potansiyeli

Belirli bir elektrolit içerisindeki metalin çözünmesinin karakteristik bir korozyon potansiyeli değeri vardır. Bunlar sıralanacak olursa Tablo 2.1'deki bazı metal iyonları için görülen elektromotif kuvvet serisi elde edilir. Tablo 2.1'de standart hidrojen elektrodu (SHE) referans olarak alınarak elde edilen potansiyel değerleri görülmektedir.

Tablo 2.1 Elektromotif kuvvet serisi (ASM Metals Handbook)

Elektrot reaksiyonu	25 °C'de standart potansiyel, volt (SHE'na göre)
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	+1,500
$\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pd}$	+0,987
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$	0,854
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	+0,800
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}$	+0,789
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,521
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	+0,337
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000 (referans)
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,126
$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,136
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0,277
$\text{Tl}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Tl}$	-0,336
$\text{In}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{In}$	-0,342
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,403
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}$	-0,440
$\text{Ga}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Ga}$	-0,530
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,740
$\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,910
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,763
$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,180
$\text{Zr}^{4+} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{Zr}$	-1,530
$\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ti}$	-1,630
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,660
$\text{Hf}^{4+} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{Hf}$	-1,700
$\text{U}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{U}$	-1,800
$\text{Be}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Be}$	-1,850
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,370
$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2,710
$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$	-2,870
$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2,930
$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}$	-3,050

SHE: Standart Hidrojen Elektrodu

Voltaj sırası listesi aynı zamanda iki temiz metal yüzeyinden hangisinin anot olacağını gösterir. Bu seride anot tarafındaki metal, katot tarafındakine kıyasla anot reaksiyonuna uğrar, katot tarafındaki ise korunur. Kimyasal bileşik şeklindeki korozyon ürünü kütleden ayrılır ve yenisi oluşursa tahribat sürekli olur.

Betondaki donatı çeliği, paslanmaz çelik, bakır ve galvanizli çelik için bu değerler bakır-bakırsülfat Elektroduna göre Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2 Betondaki metallerin korozyon potansiyelleri (Böhni, 2005)

Elektrot / metal	Korozyon potansiyeli, V (CSE)
Donatı çeliği:	
Ca(OH) ₂ çözeltisinde	-1,1
Oksijensiz suya doymuş betonda	≥-1,1
Nemli, Cl ⁻ içeren betonda	≥-0,6
Nemli, Cl ⁻ içermeyen betonda	+0,1 ile -0,1
Nemli, karbonatlaşmış betonda	+0,1 ile -0,3
Kuru, karbonatlaşmış betonda	+0,2 ile 0
Kuru betonda	+0,2 ile 0
Paslanmaz çelik:	
Nemli betonda	+0,1 ile -0,2
Bakır:	
Nemli betonda	+0,1 ile -0,2
Çinko kaplı çelik:	
Islak betonda	≥-1,1
Nemli, Cl ⁻ içeren betonda	≥-0,8
Nemli betonda	Donatı çeliğine benzer
Nemli, karbonatlaşmış betonda	+0,2 ile -0,1
Kuru, karbonatlaşmış betonda	Donatı çeliğine benzer
Kuru betonda	Donatı çeliğine benzer

CSE: Bakır-Bakırsülfat elektrodu

2.3 Korozyon Türleri

Farklı metalik malzemeler ile bu malzemelerin içinde buldukları farklı ortam koşullarında korozyon gelişimleri değişiklik göstermektedir. Değişik ortamlardaki farklı metalik malzemelerde karşılaşılan korozyon tipleri aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır (NACE 2002). Metalik malzemeler dışındaki seramik ve polimer gibi malzemelerin bozulma mekanizmaları bu bölüm kapsamına alınmamıştır.

Üniform korozyon

Metal yüzeyinde üniform olarak dağılmış korozyon türüdür. Üniform korozyonda yüzeyin her noktasında korozyon hızı yaklaşık olarak aynıdır. Bu tip bir korozyona atmosferik ortamda açıkta bekletilmiş çeliklerde rastlanılır.

Çukurcuk korozyonu

Metal yüzeyinin küçük bir bölgesinde sınırlanmış lokal korozyon saldırısıdır. Saldırı sonucu bazı noktalarda çukurcuklar oluşturur. Bu tip korozyon olayında “anot” ve “katot” bölgeleri birbirinden kesin şekilde ayrılmıştır. Anot, yüzeyin herhangi bir noktasında açılan çukurun içindeki dar bir bölge, katot ise çukurun çevresindeki geniş bir alandır. Korozyon sonucu çukurcuk gittikçe derinleşerek metalin o noktasında lokal bir hasar meydana getirir.

Galvanik korozyon

Elektrolitik bir ortamda elektriksel olarak temas halinde bulunan iki farklı metalin maruz kaldığı korozyon çeşididir. Metallerden daha asil olanı katot, daha aktif olanı ise anot olur. Böylece bir korozyon hücresi meydana gelir. Bu hücrede katot olan metal korunurken anot olan metal korozyona uğrar.

Filiform korozyonu

Metal yüzeyinde bulunan boya veya kaplama tabakası altında rasgele dağılmış lifsi şekilde gelişen bir korozyon olayıdır.

Taneler arası korozyon

Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınırlarında meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir. Taneler arası korozyonun en tipik örneği döküm malzemelerde ve paslanmaz çeliklerde görülür.

Erozyonlu korozyon

Korozif çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması veya metalin korozif sıvıda hareketi halinde birlikte görülen korozyon ve erozyon olaylarıdır. Mekanik ve kimyasal olayların birlikte etkimesi korozyon hızının da artmasına neden olur. Erozyonlu korozyon olayı daha çok hareketli akışkanların bulunduğu ekipmanlarda (borular, dirsekler, valfler, pompalar, santrifüjler, pervaneler, karıştırıcılar, ısı değiştiriciler vb.) söz konusu olabilir. Birbiri üzerinde kayan iki yüzeyde de aşınma ve korozyon olayları birlikte gelişebilir.

Gerilmeli korozyon

Korozyon ve çekme gerilmesinin malzemeye birlikte etkimesi sonucu oluşan hasar türüdür. Korozif ortamda bulunan bir metal aynı zamanda statik bir gerilme altında ise veya bünyesinde artık gerilmeler taşıyorsa, metalin çatlayarak yeni yüzeyler açığa çıkarması, korozyonun başlaması için daha uygun bir ortam yaratır. Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, gerilme altında iken deformasyon sonucu bu kabuk çatlayabilir. Dolayısıyla, korozyon hızla devam ederek metalin o bölgesinde hasara neden olur.

Yorulmalı korozyon

Korozif bir ortamda bulunan metalik malzemeler tekrarlı yüklemeler altında yalnızca yorulma veya yalnızca korozyon etkisinde olduğundan daha kısa sürede kullanım dışı kalırlar. Yorulma ve korozyonun birlikte etkisi metalin kısa sürede hasar görmesine neden olur. Mekanik etki nedeni ile metal yüzeyinde oluşan çatlak bölgesi anot, çatlağın çevresindeki metal yüzeyleri katot olur. Böylece korozyon hız kazanır.

Kabuk altı korozyonu

Metal yüzeyinde korozyon ürünlerinin oluşturduğu veya başka bir nedenle oluşan bir kabuk (birikinti) altında meydana gelen korozyona kabuk altı korozyonu denir. Bu korozyon kabuk altının rutubetli olmasından ve yeteri kadar oksijen alamamasından kaynaklanır. Çünkü kabuk altında sıvı hareketi yoktur. Bu durum çatlak korozyonuna benzer bir ortam yaratır. Kabuğun altı anot, kabuk çevresi ise katot olur. Örneğin, boru yüzeylerini izole etmek amacı ile sarılan cam pamuğu yağış nedeniyle ıslanırsa, bu bölgelerde şiddetli bir kabuk altı korozyonu başlar.

Seçimli korozyon

Bir alaşım içinde bulunan elementlerden birinin korozyona uğrayarak uzaklaşması sonucu oluşan korozyon olayıdır. Bu tip korozyona en iyi örnek, pirinç alaşımı içinde bulunan çinkonun bakırdan önce korozyona uğramasıdır.

Kaçak akım korozyonu

Doğru akım ile çalışan raylı taşıt araçları, doğru akım taşıyan yüksek voltajlı elektrik hatları ve kaynak makineleri zemin içine kaçak akım yayarlar. Bu kaçak akımlar çevrede bulunan metalik yapılara girerek korozyona neden olurlar. Örneğin, bir yeraltı tren hattına paralel giden boru hattında kaçak akım korozyonu meydana gelebilir.

Mikrobiyolojik korozyon

Mikrobiyolojik korozyon, mikroplar, bakteriler ve mantarlar tarafından başlatılan veya hızlandırılan korozyondur. 100 yılı aşkın bir süre önce ortaya çıkarılan MIC'in, modern endüstriyel sistemler için ciddi bir problem olduğunun farkına son 30 yılda varılmıştır. Metal ve yapı malzemelerine olan korozyon zararlarının yaklaşık % 20'sini oluşturmaktadır. Mikrobiyolojik korozyon, normal korozyon olaylarından farklı yapıda olmayıp, bazı mikro canlıların korozyonun reaksiyon hızını artırması şeklinde kendini gösterir. Normal korozyon olayının mevcut olmadığı ortamlarda mikrobiyolojik korozyon olayına nadiren rastlanır.

Katodik korozyon

Genellikle elektroliz olayının alkali ürünleri ile bir metalin reaksiyonu sonucu katodik durumdaki bir yapının korozyonudur.

Krevaj korozyonu

Bir metal yüzeyinin ortam şartlarından korunmuş bölgesinin yakınında veya bitişiğinde görülen lokal korozyondur.

Fretaj korozyonu

Yük altında temas halindeki iki yüzeyin ara yüzünde gelişen ve bağıl hareketleri sebebi ile artan bozulma olayıdır.

Hidrojen Hasarı

Çeşitli metal ve alaşımlar için farklı şekillerde kendini gösterebilir. Yıllarca hidrojen kırılğanlaşması şeklinde kullanılsa da bu tanım çok çeşitli hidrojen hasarı mekanizmalarını tam olarak karşılamamaktadır. Metalin bünyesindeki boşluklarda hidrojen atomlarını absorblanması, daha sonra hidrojen moleküllerinin oluşturduğu lokal gerilmeler nedeni ile metalin dayanım ve duktilite kaybı olarak ifade edilmektedir.

Metal bünyesinde ya da yüzeyinde farklı tabakalardaki birbirine yakın hidrojen kabarcıklarını birleştiren aşamalı iç çatlak oluşumu şeklinde gelişebilir.

Metal bünyesinde hidrojen varlığı ile çekme gerilmelerinin birlikte etkimesi sonucu metalde çatlama görülebilir. Yüksek mukavemetli alaşımlarda sıklıkla karşılaşılır.

Yüksek sıcaklık Korozyonu

Sıcaklık gradyanı nedeni ile oluşan bir elektrokimyasal hücrede gerçekleşen korozyon türüdür.

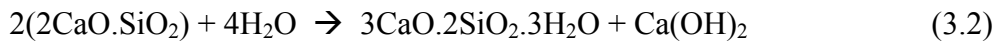
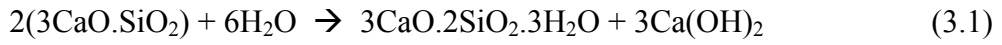
BÖLÜM ÜÇ

BETONARME DONATISININ KOROZYONU

Tekniğine uygun olarak inşa edilmiş betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılar, pas payı tabakası sayesinde korozyona karşı korunur. Bu korumada iki mekanizma etkilidir. Bunlardan ilki, pas payı tabakasının sağladığı fiziksel bariyer etkisi diğeri ise beton kompozisyonunun sağladığı yüksek alkali ortamdır.

Beton yüzeyindeki örtü tabakası, zararlı etkilerin çelik donatıya ulaşmasını engelleyerek veya geciktirerek bir fiziksel koruma sağlar. Fiziksel korumanın etkinliği paspayı tabakasının kalınlığına ve kalitesine bağlıdır. Burada kaliteden kasıt mukavemet değerinden ziyade geçirimsizlik olarak algılanmalıdır.

Öte yandan çimentonun reaksiyonları sonucu bağlayıcı jelin yanı sıra bazik bir ortam sağlayan ürünler oluşur. Denklem 3.1 ve Denklem 3.2’de verilen trikalsiyumsilikat (C₃S) ve dikalsiyumsilikat (C₂S) karma oksitlerinin hidrasyon reaksiyonları sonucu Ca(OH)₂ açığa çıkar.



Bu ürünlerin yanında ayrıca sistemde Na₂O, K₂O ve CaO gibi çeşitli alkalilerin varlığı söz konusudur. Bu şekilde sağlanan yüksek alkali ortam (pH>12,5), donatı yüzeyinde bir pasif tabaka oluşturarak, korozyon etkisini düşük mertebelere indirir. Bu şekilde de kimyasal koruma sağlanmış olur. Pasif tabaka donatı yüzeyinde kararlı bir şekilde kaldığı sürece korozyon ilerleyemez.

Ancak, betonarme yapı elemanının maruz kaldığı ortam koşulları sebebiyle iki temel etki, koruyucu pasif tabakayı bozarak korozyonun ilerlemesine sebebiyet verir. Bunlar:

- Betonun karbonatlaşması ve
- Klorür saldırısı olaylarıdır.

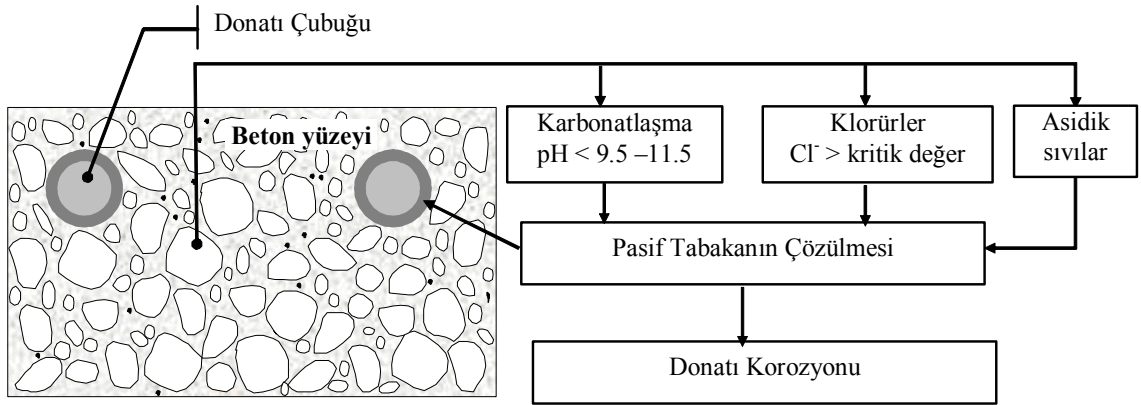
Yetersiz kalınlıkta ve çok geçirimli bir pas payı tabakası, fiziksel ve kimyasal korumanın çok zayıf olması anlamına gelir. Atmosferdeki karbondioksit gazı hidrate çimento bileşenleri ile özellikle beton içindeki kireçle reaksiyona girerek betonun pH değerini düşürür. Karbonatlaşma cephesinin donatıya ulaşmasıyla donatı çevresindeki alkali ortam yok olur ve kimyasal koruma sona erer.

Kimyasal korumanın yok olmasının bir diğer nedeni klorür iyonlarının donatıya ulaşmalarıdır. Bu durumda da donatı çubuğunun üzerinde oluşan ve metalin korozyonunu engelleyen pasif tabaka kararlılığını kaybederek çözünür. Betonarme sisteminde klor iyonlarının sebep olduğu korozyon Bölüm 3.2.3'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Bir diğer olasılık, asidik sıvaların özellikle beton örtü tabakasının çatlaklı ve geçirimli kısımlarından donatıya ulaşmalarıdır. Bu durumda da donatının korozyona uğraması beklenir. Ancak betonun da asitlere dayanıksızlığı düşünüldüğünde, bu tür sıvılarla temas edecek betonarme yapılarda önlemlerin hem beton hem de donatı açısından düşünülmesi gereklidir. Ortamda su ve oksijen mevcutsa –ki durum genellikle böyledir- donatı korozyona uğrar.

Pasif tabakanın çözünmesiyle donatının korozyona uğraması Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilmiştir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Aslında betonun bozulmasına yol açan tüm durabilite sorunları donatı açısından da sakıncalıdır. Sülfat saldırısı, alkali-agrega reaksiyonları, donma-çözülme ve benzeri etkilerle çatlayan ya da tabaka atan betonda donatı çelikleri korumasız kalırlar. Bu durumda çevresel koşullara açık hale gelen donatılarda korozyon gelişimi kaçınılmaz bir hal alır.

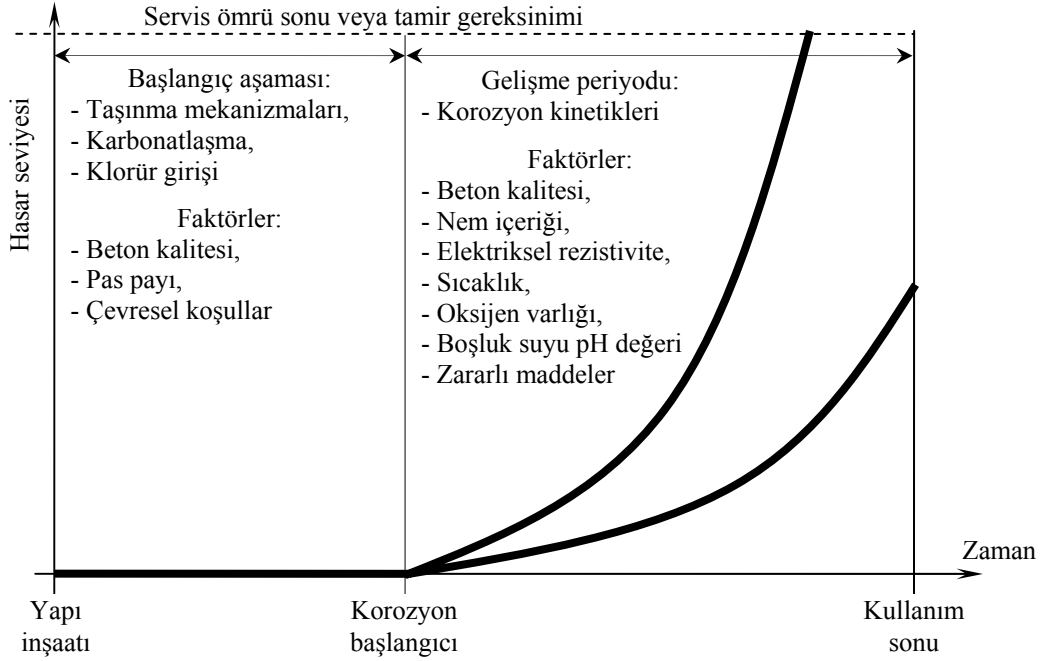


Şekil 3.1 Karbonatlaşma, klorür iyonları veya asit etkisi nedeniyle betonun donatıyı korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması.

Donatı korozyonu Bölüm 3.1’de ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi çeşitli formlarda kendini gösterebilir. Atmosfer etkilerine açık donatılarda ve karbonatlaşmadan kaynaklanan korozyon durumunda hasar, üniform olarak tüm çelik yüzeyinde görülür. Öte yandan, klor iyonlarının saldırısı sonucu lokal bölgelerde ve çukurcuk (pit) oluşumu şeklinde korozyon hasarları oluşmaktadır. Lokal hasar, gözle görülür işaretler vermeden yapı elemanının göçmesine veya servis dışı kalmasına neden olabileceğinden çok daha zararlı olmaktadır.

Yeni betonarme yapılarıdaki donatılar tamamen koruma altındadır. Beton boşluk suyunun pH değeri yüksektir. Beton uygun malzemelerle imal edilmişse çok düşük mertebede klorür içermektedir. Henüz karbonatlaşma olayı ilerlememiştir. Bu sebeplerle donatı korozyona maruz değildir.

Korozyon olayının başlaması ve gelişmesi için zaman gerekmektedir. Korozyon başladıktan sonra artan miktarda yayınma periyodu ilerler. Şekil 3.2’de betonarme yapılarıdaki korozyon gelişiminin zaman bağlı davranışı verilmektedir (Böhni, 2005).



Şekil 3.2 Zamana göre korozyon gelişimi ve etkili parametreler (Böhni, 2005).

Gerek korozyon başlangıç zamanı, gerekse korozyon hızı birtakım faktörlere bağlıdır. Bu faktörler:

- Beton kompozisyonu ve geçirimliliği,
- Beton rezistivitesi,
- Donatı çeliğinin özellikleri,
- Pas payı tabakası kalınlığı,
- Nem içeriği,
- Sıcaklık,
- Oksijen varlığı,
- Beton boşluk suyunun pH değeri,
- Ortamda zararlı maddelerin (örneğin Cl^- iyonları) varlığı,

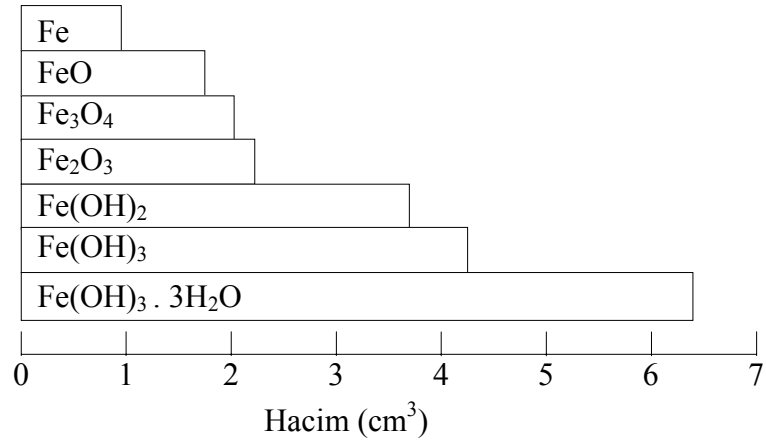
şeklinde özetlenebilir.

Betonun klorür içeriği korozyon olayında önemli bir faktör olsa da belirli bir eşik değerinin üzerindeki klorür içeriğinin korozyon sürecinde minör bir etkisi

bulunmaktadır. Korozyon gelişimi üzerinde etkili parametreler ilerleyen bölümlerde incelenecektir.

3.1 Betonarme Elemanlarda Korozyon Hasarları

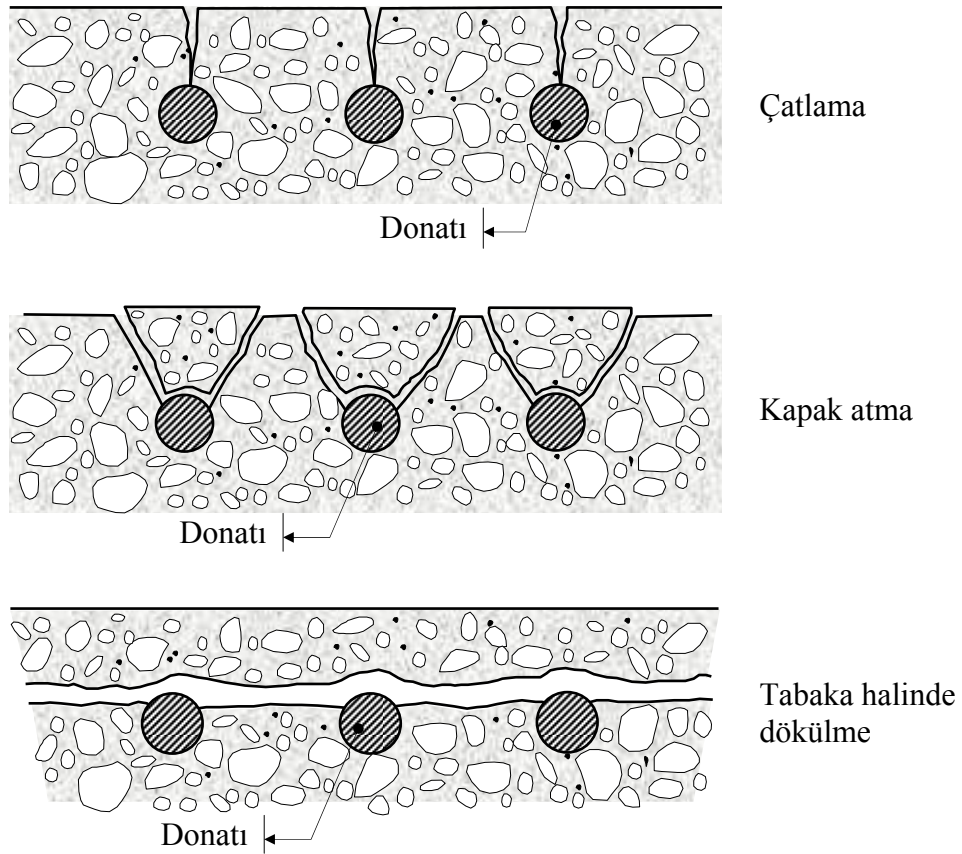
Donatı korozyonu Bölüm 3.2’de sözü edilen değişik mekanizmalar ile gelişse de betonarme yapılarda hasar, eleman bünyesinde genişleyen ürünler oluşması nedeni ile ortaya çıkmaktadır. Bir başka deyişle, oluşan pas ürünleri korozyondan önceki çelikten daha fazla hacim işgal etmektedir. Pas ürünleri ortamdaki oksijen içeriğine bağlı olarak çelikten altı kata kadar daha fazla hacim işgal ederler. Değişik korozyon ürünlerinin hacim artışı Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Değişik korozyon ürünlerinin demire kıyasla hacim değişimleri.

Korozyon reaksiyonları sonucu oluşan hacim artışı, beton bünyesinde çekme gerilmeleri oluşturmakta ve betonun çekme dayanımını aşması halinde hasara neden olmaktadır. Çatlama, kapak atma ve paspayı tabakasının dökülmesi türündeki hasarlar Şekil 3.4’de şematik olarak verilmiştir.

Şekli ne olursa olsun hasar oluştuğundan sonra donatılar zararlı çevre koşullarına daha fazla maruz kalacaktır. Böylece hasarın şiddeti giderek artmakta ve yapı emniyetli kullanım ömrünü yitirmektedir.



Şekil 3.4 Korozyon sonucu betonarme elemanlarda görülen hasar çeşitleri.

İnce bir örtü tabakasına sahip elemanlardaki donatılar korozyona maruz kaldığında pas payı tabakası hemen çatlayabilir. Korozyon sonucu betonda oluşan çatlakların donatıya göre yönü de önem kazanmaktadır. Donatıya paralel çatlaklar betonun dökülmesine yol açarak donatının fiziksel korumasının tamamen kaybolmasına ve atmosferik korozyonun başlamasına sebep olmaları açısından donatıya dik çatlaklardan daha tehlikelidirler. Ayrıca donatı-beton arasındaki aderansın bozulması, çelik donatının çekme gerilmelerini karşılamasına engel olur.

Donatı ile aderansın zayıf olduğu ve pas payı tabakası kalınlığının nispeten yüksek olduğu elemanlarda ise donatı üzerindeki bölgede kapak atma şeklinde hasar görülebilir. Özellikle dikdörtgen kesitli betonarme elemanlardaki köşe donatılarda bu hasara daha çok rastlanılır.

Donatılar arasındaki mesafenin pas payı tabakasının kalınlığından daha az olduğu sık donatılı elemanlarda ise tüm örtü tabaka şeklinde elemandan ayrılır. Bu durumda tüm donatılar tamamen çevresel ortama açık hale gelip korozyon hasarı ivme kazanır.

Öte yandan herhangi bir çatlak veya dökülme olmasa da gerçekleşecek bir miktar korozyon donatı ile beton arasındaki aderansı zayıflatacaktır. Bu durum bile yapı güvenliğinde risk teşkil etmektedir.

Korozyon sonucu paslanan donatının hacmindeki değişimlerin donatı korozyonu ölçümleri için kullanılabilirliği Batis ve Routoulas (1999) tarafından incelenmiştir. Farklı tipteki harçlarla üretilen numunelere deformasyon ölçerler (strain gage) yerleştirilmiş ve numuneler NaCl ortamında sabit bir elektro-potansiyele maruz bırakılmıştır. Korozyon gelişimi nedeni ile oluşan deformasyonlar değerlendirilmiş ve çelik çubukların gravimetrik kütle kayıpları, örneklerden geçen elektrik şarjı harç kütlelerinin porozitesi ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda;

1. Elde edilen test sonuçlarının bu metodun çelik donatının durumunun incelenmesinde ve korozyon hızı ölçümlerinde yararlı bir şekilde kullanılabileceği,
2. Bu tahribatsız test yöntemi, çeşitli korozyon katkılarının değerlendirilmesi için laboratuvar çalışmalarına uygun olduğu,
3. Kullanılan strain gage sensörlerin sıcaklık düzeltmesi olmasına rağmen test sırasında numunedeki hacim değişikliğinin düzeltilmesi gerektiği,
4. Harcın çatlama anından sonra strain gage değerleri esas olarak harç kompozisyonundan, az bir miktarda korozyon ürünlerinin oluşumundan etkilendiği rapor edilmiştir.

3.2 Donatıda Korozyon Mekanizmaları

Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılar çeşitli süreçler sonunda korozyona maruz kalabilirler. Bu çeşitli süreçlerde donatıların korozyonuna etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Donatı, beton ve çevresel etki koşulları ile ilgili bu faktörler korozyon miktarını doğrudan etkilerler. Bu bölümde çelik donatıların maruz kaldığı korozyon mekanizmaları ile korozyona etki eden parametreler incelenecektir.

Betonarme donatısı farklı şekillerde korozyona uğrayabilir. Temel olarak bu mekanizmalar şu şekilde sıralanabilir:

- Atmosferik korozyon,
- Elektrolitik korozyon,
- Klorid korozyonu,
- Temas korozyonu.

Farklı süreçler aşağıdaki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir.

3.2.1 Atmosferik Korozyon

Açıkta bırakılan donatılarda veya betonarme yapılarda pas payı tabakasının dökülmesi ile tamamen açıkta kalan çelik donatılarda atmosferik korozyon görülür. Bu tarzda korozyonun oluşabilmesi için oksijen ve nem gereklidir. Atmosferik korozyon Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'teki kimyasal reaksiyonlar ile gelişir.

Öncelikle çelik atmosferdeki nem ve oksijen ile birleşir.



Daha sonra Fe(OH)_2 de aşağıda gösterildiği şekilde ayrışır.



Reaksiyon, çelik donatının yüzeyinde üniform olarak gelişir.

Açıkta kalan çelik donatının zamanla üzerinde görülen oksit tabakası bir süre donatının oksijenle temasını keser ve paslanmayı durdurur. Pas tabakası stabil ise betonarme aderansı açısından yararlıdır. Ancak bu tabaka bakır, alüminyum gibi metallerde olduğu gibi atmosfer koşullarında kararlı değildir. Bir süre sonra paslanma sonucu oluşan tabakanın gevşediği, pul pul döküldüğü ve korozyonun süreklilik kazandığı görülür. Donatının kesit kaybının büyük mertebelerde olup olmadığı çap ölçümü ile belirlenmeli, çelik donatıdan örnekler alınarak çekme dayanımı ve deformasyon özelliklerinin korozyondan ne şekilde etkilendiği deneylerle tespit edilmelidir.

Hava kirliliği ve atmosferik koşullar reaksiyonun hızını büyük ölçüde belirler. Korozyonun ilerleme hızı temiz atmosfer koşullarının bulunduğu bölgelerdeki yapılarda 4–60 µm/yıl mertebelerinde iken, zararlı atmosfer etkilerinin bulunduğu bölgelerde bu değer 100–1000 µm/yıl seviyelerine kadar çıkabilmektedir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

3.2.2 Elektrolitik Korozyon

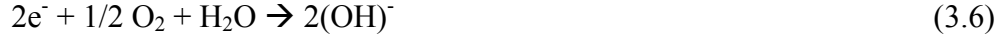
Korozyon, birbirini tamamlayan ve eşzamanlı gelişen, oksidasyon (yükseltgenme) ve redüksiyon (indirgenme) adı verilen iki elektro-kimyasal reaksiyonla meydana gelir. Oksidasyon atom halindeki metalin (çeliğin) elektron kaybederek iyonla dönüşmesi, redüksiyon ise atomdan ayrılan elektronların başka bir ortamda harcanmasıdır. Oksidasyona “anot reaksiyonu”, redüksiyona “katot reaksiyonu” adları verilir.

Anodik işlem demirin çözünmesi olayıdır (Denklem 3.5). Pozitif yüklü iyonlar çözültüye karışırlar. Negatif yüklü serbest elektronlar ise çelik vasıtasıyla katoda geçip elektrolitin bileşenleri tarafından adsorbe edilirler.



$E_0 = -0.440$ (Standart Hidrojen Elektroduna göre)

Katodik işlemde, çelik vasıtasıyla katoda geçen elektronlar su ve oksijenle birleşip hidroksit iyonlarını oluştururlar (Denklem 3.6).



$E_0 = 0.401$ (Standart Hidrojen Elektroduna göre)

Anottan çözültiyeye geçen demir iyonları hidroksit iyonlarıyla reaksiyona (Denklem 3.7) girerek demir hidroksiti oluştururlar.



$\text{Fe}(\text{OH})_2$ kararsızdır ve suda çözünür. Ardından Denklem 3.8'deki şekilde su ve oksijenle birleşerek anot çevresinde sarı renkli boşluklu bir pas tabakası oluşturur.

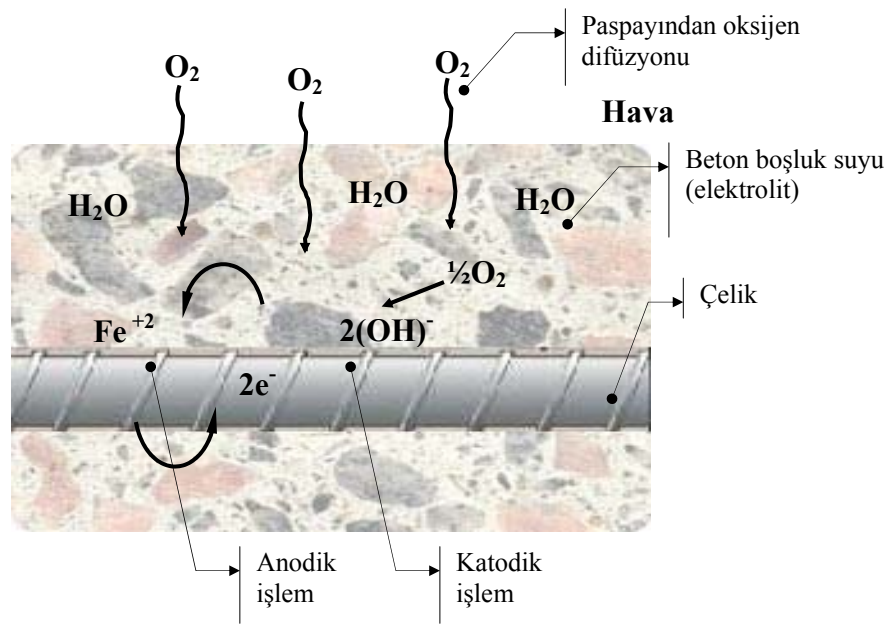


Donatıya eşit miktarda oksijen gelmesi ve elektrolitin (nemli beton) geçirgenliğinin sabit kalması halinde, anottaki akım yoğunluğu ve buna bağlı korozyon hızı katot / anot alanları ile doğru orantılıdır. Bu şartlarda yüzeyi aşındıran atmosferik korozyondan çok daha etkili bir elektro-kimyasal etkilenme söz konusudur.

Korozyonun sürekliliği için anot reaksiyonunun katot reaksiyonu ile tamamlanması şarttır. Bunun için anotta oluşan elektronların katoda, katotta oluşan hidroksit iyonlarının ise anoda ulaşması gereklidir. Anot ve katot aynı çelik eleman üzerindeyse –ki çoğunlukla durum böyledir- çelik donatı elektronları katoda iletirken, elektrolitik sıvı, örneğin beton boşluk suyu sayesinde hidroksit iyonları anoda taşınır. Anot reaksiyonu gösteren kısım veya metal, kütle kaybederek hasara

uğrar. Bu şartlardan birinin ortadan kaldırılması, reaksiyonun durdurulması anlamına gelir.

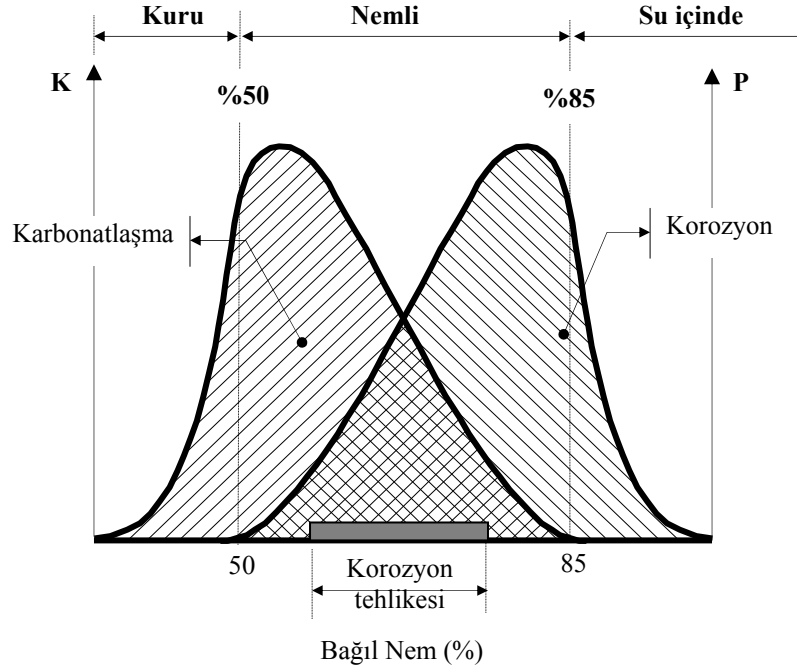
Korozyon tam hücresi, elektron ve iyon akışını sağlayan beton boşluk suyunun oluşturduğu elektrolitik ortamla birbirine bağlı anot ve katot elemanlarından oluşur. Anot ve katot aynı donatı üzerinde birbirine çok yakın (mikro eleman) olabileceği gibi, birbirinden uzakta da (makro eleman) olabilmektedir. Beton içindeki donatının korozyonu Şekil 3.5'te şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.5 Beton içine gömülü çelik donatının elektro-kimyasal korozyonu.

Korozyon maksimum hızına %70-80 bağımlı nem değerlerinde ulaşır. Kuru betonda iyon akışını sağlayacak ortam mevcut olmadığından pasif tabaka parçalanmış olsa bile korozyon ilerleyemez. En çok zararı sürekli ıslanma-kuruma etkisine maruz yapılar görür. Yarı-ıslak periyotta karbonatlaşma gelişirken, daha doygun ortamda korozyon etkinleşir.

Şekil 3.6'da karbonatlaşma ve korozyon hızlarının bağımlı hava nemi ile değişimi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Karbonatlaşma ve korozyon hızının bağıl nem ile değişimi.

Elektrolitik korozyonda reaksiyonların devam edebilmesi için su ve nem varlığı şarttır. Bağıl nemin yüksek olduğu durumda oksijen varlığı azalacağından ve doymun ortamda (%100 bağıl nem) oksijen bulunamayacağı için reaksiyonlar yavaşlayacak veya duracaktır. Ters durumda, kuru ortamda ise katodik reaksiyonlar için gerekli nem bulunmadığından reaksiyon gerçekleşmeyecektir.

3.2.3 Klorid Korozyonu

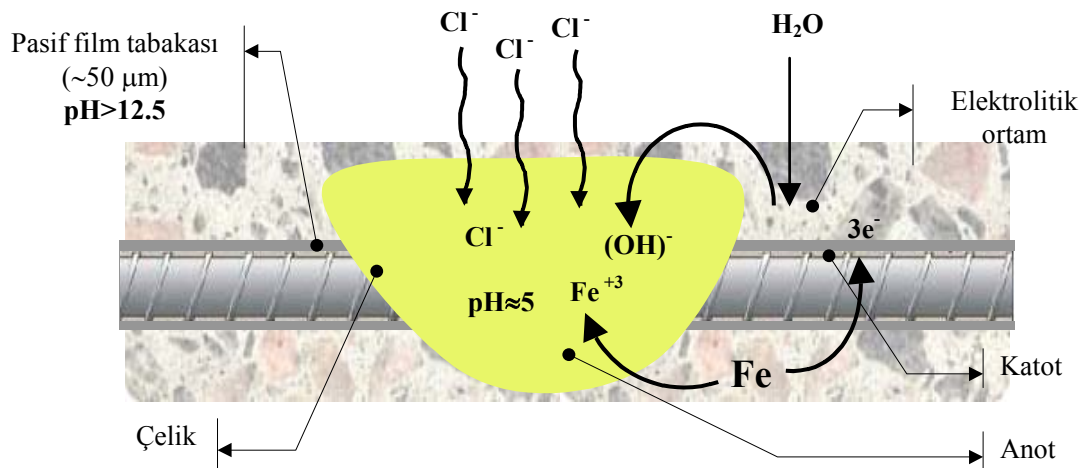
Klorür iyonları çelik donatının korozyonu açısından en zararlı madde olarak kabul edilirler. Çelik donatı üzerinde oluşan ve korozyonun gelişimini engelleyen pasif tabakanın çözünmesine yol açmaları bu etkilerden en önemlisidir. Çözünabilen bileşiklerin oluşmasında $Cl^-/(OH)^-$ oranının önemli bir parametre olduğunu, bu oranın 0,6 değerini aşması halinde pasif tabakada hasarın belirginleştiği

belirtilmektedir. Klorür iyonları, ortamın elektrolitliğini arttırarak ve elektriksel direncini azaltarak anot-katot iyon akışını kolaylaştırırlar. Böylece akım şiddetinin artışına bağlı olarak korozyon hızı da artar. Asit karakterli olmaları ve ortamın pH değerini indirgemeleri bir diğer olumsuz etkidir.

Klorür iyonları metal tarafından O_2 ve $(OH)^-$ iyonlarına kıyasla çok daha kolay adsorbe edilirler. Böylece katalizör görevi görerek, anodik reaksiyonun kolaylıkla oluşmasını sağlarlar ve demirin iyonlaşmasını çarpıcı biçimde hızlandırırılar. Ortamda demir ve $(OH)^-$ iyonlarının bol miktarda bulunması nedeniyle klorür iyonları reaksiyon sonucu sürekli yenilenmekte ve donatıda tahribat devamlılık arz etmektedir (Denklem 3.9 ve 3.10). Bu nedenle, klorürlerin donatıda yol açtıkları korozyonun, en tehlikeli korozyon türü olduğunu söylemek mümkündür.



Reaksiyonun gelişimi şematik olarak Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Betonarme donatısında klorür iyonlarının yol açtığı korozyon.

3.2.4 Temas Korozyonu

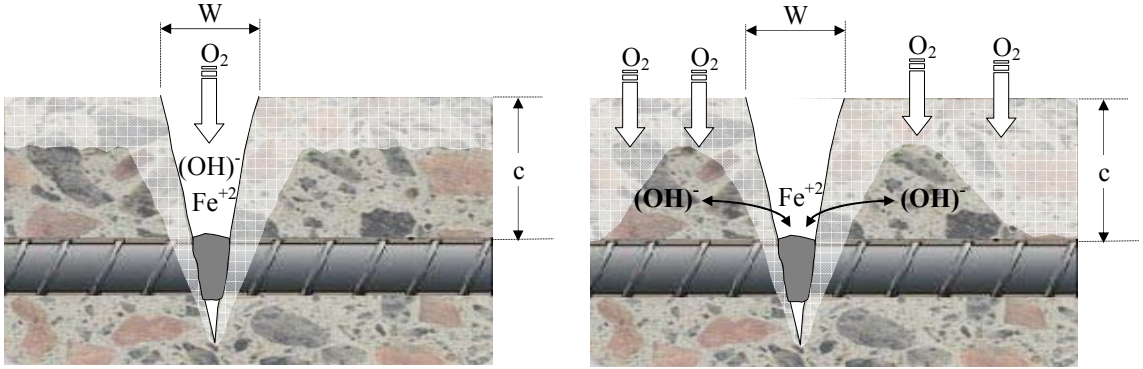
Elektrokimyasal korozyonun özel bir şekli, iki farklı metalin temas halinde kullanılması sonucu oluşan paslanmadır. İki farklı metal bir sıvı vasıtası ile birleştirilir ve bir tam hücre (galvani pili) elde edilirse, elektromotif kuvvet serisinde elektropotansiyeli yüksek olan (daha asal) metal katot, düşük olan ise anot davranışı gösterecektir. Bu iki metalin standart elektropotansiyel farkları yaklaşık olarak sistemde oluşacak potansiyel farkını (voltajı) gösterir ki, bu farkın büyük olması devreden akım geçeceğinin işaretidir. Akım şiddetinin artmasıyla korozyon hızının da artması beklenir. Betonarme eleman içinde iki farklı metalin kullanılması ender rastlanan bir durumdur. Donatının korozyondan korunması için çeşitli maddelerle kaplanması halinde, kaplanmış ve kaplanmamış donatıların bir arada kullanımı da bu tür korozyonun gelişmesine yol açabilir.

3.3 Çatlaklı Betonda Korozyon

Betonda oluşan çatlaklar, klorürlerin, karbonatlaşma cephesinin, oksijen ve nemin çeliğe ulaşmalarını kolaylaştırırlar. Bu sebeple çatlak genişliklerinin belli bir mertebeyi aşmaması istenir. Donatıya dik çatlaklar, korozyonun nispeten dar bir alanda oluşmasına yol açarlar. Donatı boyunca uzanan, böylece tüm donatının ve dolayısıyla pas payı tabakasının hasar görmesine yol açan çatlaklar enine çatlaklara kıyasla çok daha tehlikeli kabul edilirler.

Şekil 3.8 donatı üzerindeki betonda, enine çatlak bulunması durumunu temsil etmektedir. Bu durumda korozyonun gelişimi konusunda iki seçenek bulunmaktadır. İlk durumda anot ve katot çatlaklı bölgede birbirine çok yakındır. Çatlak dar (<0.5 mm) ve aktif değilse yani açılmaya devam etmiyorsa büyük olasılıkla korozyon ürünleri, betondan süzülen bileşenler, toz, kir vb. gibi maddeler çatlağın içini doldurarak korozyonun yavaşlamasına yol açacaktır. Sağda gösterilen ikinci durumda ise, çatlak içindeki küçük bölge anot, beton içinde kalan daha büyük alan

ise katot olmaktadır. Bu durumdaki yüksek korozyon hızı sebebiyle donatının lokal olarak hasar görüp kopması mümkündür. Klorürlerin de ortamda bulunması halinde korozyonun çok daha hızlı bir şekilde ilerlediği unutulmamalıdır.



Şekil 3.8 Çatlak bölgesinde korozyonun gelişimi.

Betonarme elemanlarda korozyon koşullarını değerlendirmek ve korozyona uğramış betonarme kirişlerin yapısal davranışını değerlendirmek amacı ile normal ve çatlaklı kirişlerde bir deneysel program gerçekleştirilmiştir (Huang ve Yang, 1997). Çelik korozyonunu hızlandırmak amacıyla, kirişlere akım uygulanmıştır. Korozyon gelişimi elektrokimyasal ölçümler ile moment taşıma kapasiteleri ise yükleme deneyleri ile belirlenmiştir. Çalışma sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

1. Elektrokimyasal test yöntemleri betondaki çeliğin korozyonunu hızlı bir şekilde belirlemek için kullanılabilir.
2. Korozyon kalınlığı (donatıdaki kalınlık kaybı), korozyon hızı – zaman eğrisi altında kalan alan integre edilerek bulunabilir. Sürekli korozyon etkisinin hesabı için iyi bir indekstir.
3. Betonarme bir kirişin yük taşıma kapasitesindeki azalma ile hızlandırılmış korozyon deneyleri arasında uygun bir ilişki bulunmaktadır.
4. Korozyon kalınlığı, betonarme kirişin yapısal hasarı hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu çalışmada belirlenen korozyon kalınlığı, betonarme kirişlerin yük kapasitesinin değerlendirilmesi için bir kalite parametresi olarak kullanılabilir.

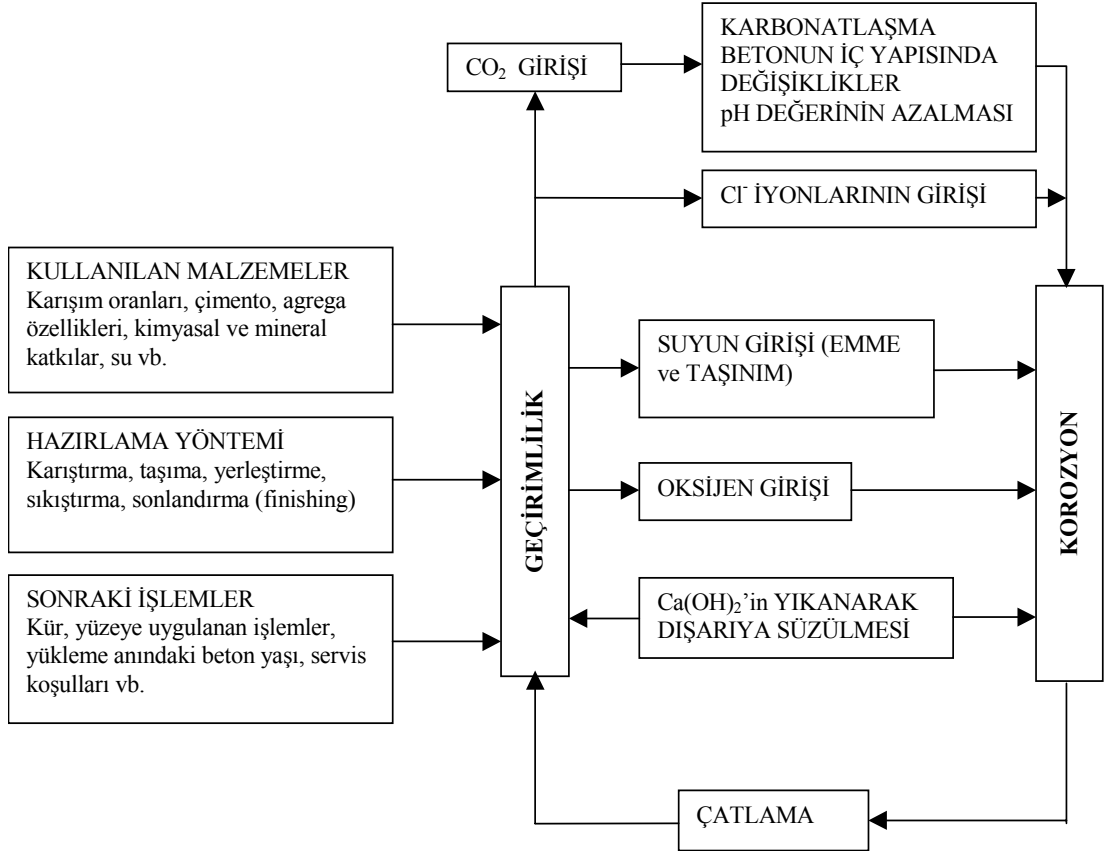
5. Korozyona maruz betonarme bir kirişin taşıyabileceği nihai yük ve rijitliğindeki azalma yüzdesi, beton kalitesine ve çatlakların varlığına bağlıdır. Korozyon kalınlığı 0,4 μm 'nin altında olduğu zaman çatlaklarda önemli bir gelişme yoktur. Ancak, korozyon kalınlığı 1,76 μm 'nin üzerinde olduğu zaman, numunede birçok görülebilir çatlak tespit edilmiştir ve rijitlikteki önemli bir azalma betonarme kirişlerin yapısal tepkisini etkileyebilmektedir.

Betonarme yapılarda çatlak genişliklerinin sınırlandırılması, pas payı tabakasının kalınlığı ve kalitesinin artırılmasının yanında, korozyonu önlemede ikincil bir önlem olarak düşünülür. Çünkü uygulamada tamamen çatlaksız bir beton elde etmek oldukça güçtür. Ayrıca çatlaksız bir betona da oksijen, klorür ve karbondioksit girişi söz konusudur. Aşılmaması önerilen çatlak genişlikleri 0,2–0,3 mm civarındadır.

3.4 Elektrokimyasal Korozyonun Gelişimini Etkileyen Faktörler

Bilindiği üzere korozyon olayında etkili birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları pas payı tabakasının kalınlığı, beton kalitesi, donatı çapı ve cinsi, betonda mineral katkı kullanımı, donatı aralıkları, betonun geçirgenliği, betonun nem içeriği, çevreden gelen agresif saldırıların tipi ve şiddeti, betonun kimyasal madde (klor, sülfat vb.) içeriği, eleman boyutları, kullanılan çimentonun kompozisyonu vb. olarak sıralanabilir.

Diğer birçok dayanıklılık probleminde olduğu gibi korozyon hızı; betonun gaz, su ve klorür geçirimsizliği ile doğrudan ilişkilidir. Kullanılan malzemeler ve yapım teknikleri betonun geçirimsizliğini etkilemekte, olumsuz durum çevresel koşullar ile birleştiğinde ilerlemiş hasarlara yol açabilmektedir. Süreç Şekil 3.9'da akış şeması olarak gösterilmiştir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).



Şekil 3.9 Korozyon ve betonun geçirimsizliği arasındaki ilişkinin şematik gösterimi.

Korozyon betonda çatlamalara, ileri düzeydeki bir hasar durumunda ise beton örtü tabakasının tamamen dökülmesine yol açar. Dolayısıyla betonun geçirimsizliği ile korozyonun ilerlemesi arasında bir döngünün oluştuğu görülür.

Çelik betonarme donatılarının üretim yöntemleri, donatıların betona gömülmeden önceki yüzey durumları korozyon olayında etkili faktörlerdir. Bu konularda değişik araştırmacıların tespit ettiği farklı bulgular mevcuttur. Detaylı açıklamalar Bölüm 3.4.1'de verilmektedir.

Kuşkusuz betonarme elemanların maruz kaldığı atmosfer koşulları, donatı korozyonu gelişiminin en etkili parametreleridir. Sıcaklık ve bağıl nem gibi ön plana çıkan faktörler betonarme eleman içerisinde birbirlerini etkilediklerinden, gerçek boyutlu elemanlarda faktörler ve sonuçlar karmaşık olabilmektedir. Bölüm 3.4.2'de konu ile ilgili açıklamalar sunulmuştur.

3.4.1 Donatı Üretim Prosesi ve Yüzey Şartlarının Korozyona Etkisi

Beton çelik çubukları istenen kalite ve özelliklere göre çeşitli şekillerde üretilebilmektedir. Üretim yöntemine göre çelikten elde edilen sonuç mekanik özellikler farklılık arz etmektedir. TS708'de beton çelik çubukları imalat metoduna göre;

- Sıcak haddeleme işlemi ile üretilen (a sınıfı),
- Sıcak haddeleme esnasında ısı işlem uygulanarak imal edilen (a sınıfı),
- Soğuk mekanik işlem (soğuk haddeleme, burma) uygulanarak imal edilen (b sınıfı),

olmak üzere üç sınıftır.

Bu teknikler ile üretilen donatılar en küçük akma sınırı gerilmelerine göre;

- En küçük akma sınırı 220 N/mm^2 , (I)
- En küçük akma sınırı 420 N/mm^2 , (III)
- En küçük akma sınırı 500 N/mm^2 , (IV)

olmak üzere üç sınıfa ayrılır.

Ayrıca beton çelik çubukları yüzey özelliklerine göre,

- Düz yüzeyli (D),
- Nervürlü (N),
- Yüzeyi profilli (P),

şekillerde üretilebilmektedir.

Ancak, çubukların mukavemetini arttırmak amacıyla, sıcak işlemden sonra su vererek soğutma (water quenching) yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu proses, çelik çubuklar üzerinde ince ve yüksek mukavemetli bir tabaka oluşmasını sağlamaktadır. Bu tabakanın çelik çubukların korozyon direncini geliştirdiği iddia edilmektedir.

Bu yüzey tabakası çelik çubuğun tüm uzunluğu boyunca üniform olarak yayılmakta ve havada soğutulmuş çelik çubuklarda oluşan zayıf yüzeyin aksine alt metal tabakasına oldukça iyi yapışmaktadır.

Su verme sebebiyle çelik çubukların üzerinde oluşan yüzey tabakasının veya atmosferik etkiler sebebiyle oluşan korozyon ürünlerinin çelik çubuklar betona gömüldüklerindeki korozyon direncine etkisi inşaat endüstrisinin konularından biridir. Daha önce yapılmış sınırlı çalışmalar çelik çubukların atmosferik korozyonunun, bu çubukların betondaki korozyon davranışını önemli şekilde etkilemediğini göstermiştir.

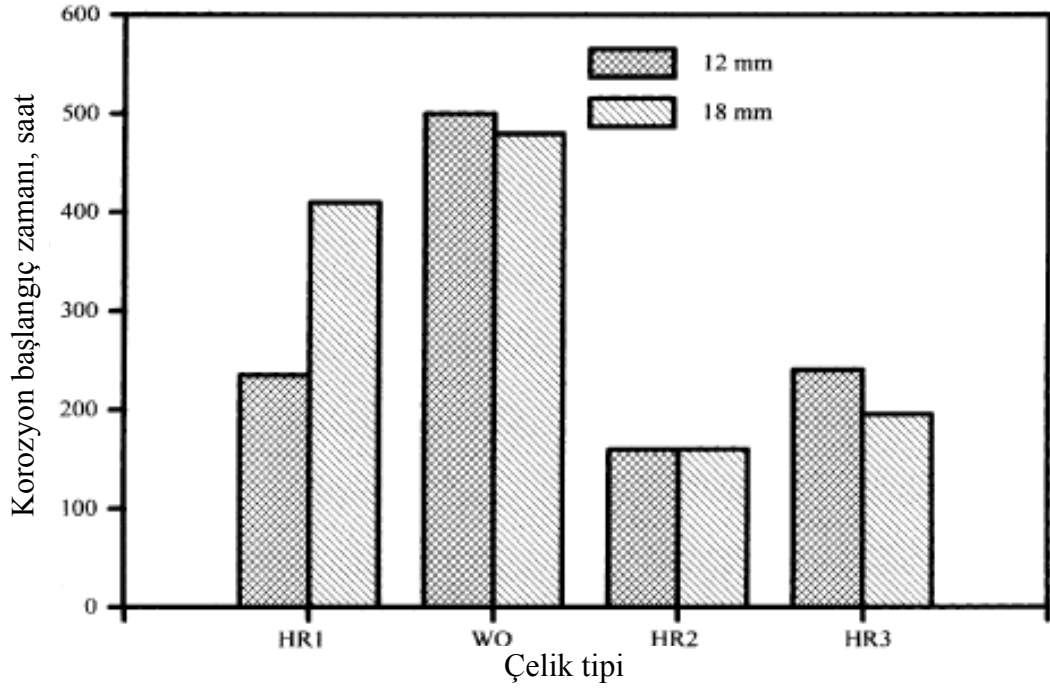
Proverbio ve Cigna, (1995) donatı yüzey şartlarının betondaki çeliğin korozyon direncine etkisini değerlendirmiştir. Orijinalinde pas kaplı olan çelik çubukların korozyon hızı, temiz çubuklarıkinden iki kat daha fazladır. Ancak yazarlar, polarizasyon direnci metodu ile elde edilen mutlak korozyon hızı değerlerinin özellikle yeni yapılar için pratik açıdan küçük önem taşıdığını belirtmişlerdir.

Al-Tayyib ve diğerleri, önceden paslanmış çelik çubukların korozyona maruz kalmamış olanlara göre biraz daha iyi korozyon direnci olduğunu rapor etmişlerdir. Önceden paslandırılmış çelik çubuklarla üretilen betonarme örneklerdeki çeliğin korozyon hızının, passız çelik çubuklarla hazırlanan betonarme örneklerinkinden %0-17 daha düşük bulmuşlardır. Önceden paslanmış çelik çubukların gelişmiş performansı çelik yüzeyinde başlangıçta oluşmuş atmosferik pas tabakasının fiziksel bariyer etkisine bağlanmıştır (Al-Tayyib, Khan, Alam ve Al-Mana, 1990).

Önceden paslandırılmış çelik çubuklarla gerçekleştirilen bir araştırmada, hazırlanan beton örneklerindeki çubukların, temiz çubuklar ile hazırlananlara göre aktif korozyona uğradıklarını belirtilmiştir. Yazarlar bu davranışı beton kalitesine bağlamışlardır (John, Coote, Treadaway ve Dawson, 1983).

Hansen ve Sorenson yaptıkları deneylerin sonuçlarına dayanarak, pas varlığının betondaki donatı korozyonu üzerinde pozitif etkisi olduğunu belirtmişlerdir (Hansen ve Sorenson 1990).

Maslehuddin ve diğerlerinin (2002) yaptıkları araştırmada, su verilerek (water quenched) üretilmiş ve havada soğutularak (hot rolled) üretilmiş 12 mm ve 18 mm çaplı çelik çubuklar kullanılmıştır. Yeni çubukların atmosferde hızlandırılmış tuz spreyine maruz bırakılarak betona gömüldüklerinde korozyon dirençleri değerlendirilmiştir. Temiz ve paslı çelik donatı çubukların korozyon dirençleri, korozyon potansiyelleri (corrosion potentials) ve korozyon akım yoğunlukları (corrosion current density) ölçülerek tayin edilmiştir. Betondaki temiz ve paslı donatı çelik çubuklarının korozyon dirençlerinin değerlendirilmesi için hızlandırılmış zorlanmış akım tekniği (accelerated impressed current technique) de kullanılmıştır. Sıcak şekillendirme (hot-rolling) prosesi ile üretilmiş çubuklar (HR1, HR2, HR3) ile kıyaslandığında, su ile soğutulmuş çelik çubuklarla (WQ) hazırlanan beton örneklerde, korozyonun başlangıcı için daha uzun bir zaman gerekmiş ve bu çubuklar daha düşük korozyon hızı göstermiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Deniz atmosferinde 12 ay bekletilmiş çelik çubukların korozyon başlangıç zamanları (Maslehuddin, Al-Zahrani, Al-Dulajian, Rehman ve Ahsan, 2002).

Benzer şekilde atmosferde 12 ay tuzlu spreye maruz kalmış paslı çubuklarla hazırlanan beton örneklerdeki donatı korozyonu hızı maruz kalmamış çubuklara göre daha yavaştır. Havada soğutulmuş çelik çubuklarla karşılaştırıldığında, atmosferik etkiye maruz kalmamış olan su verilmiş çelik çubuklarla hazırlanmış beton numunelerde daha uzun donatı korozyonu başlangıç zamanı, su verilmiş çubuklarda oluşan yüzey tabakasının havada soğutulmuş çelik çubuklardaki zayıf tabakadan daha koruyucu olduğunu göstermiştir.

Su vermenin bir sonucu olarak yüzeyde oluşan temperlenmiş martenzit tabaka, havada soğutulmuş çelik çubuklarda görülen ferrit ve perlit mikroyapı ile kıyaslandığında daha iyi korozyon direnci göstermektedir.

Korozyona maruz kalmış çelik donatıların çekme yükü altındaki davranışları Apostolopoulos, Papadopoulos ve Pantelakis (2006) tarafından incelenmiştir. BSt500s tempcore yöntemi ile üretilmiş çelik donatılar, laboratuvarında tuz spreğine (10-50 gün) maruz bırakılmış ve mekanik özelliklerin değişimi belirlenmiştir. Maruz

kalma süresi arttıkça önemli derecede kütle kaybının gerçekleştiği donatılarda, 40 gün ve daha uzun süreler deniz ortamındaki eski yapıların korozyon hasarını temsil edecek şekilde gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Tuz spreyinin S500s çeliğinin dayanım özelliklerine etkisi orta derecede iken, duktiliteye etkisi önemli derecede yüksektir. Kopma uzamasının 35 günden sonra %12 limitinin altına düştüğü görülmüştür.

Yazarlar ayrıca korozyon hasarlarının önemi açısından bugünün standartlarının korozyon hasarını betonarme hesaplarda dikkate almadığını, standartlardaki bu revizyonun kapsamlı araştırmalarla yapılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Bu çalışmanın devamındaki bir diğer çalışmada değişik sınıflardaki çelik donatıların korozyon davranışları ele alınmıştır (Papadopoulos, Apostolopoulos, Alexopoulos ve Pantelakis, 2007). Çalışmada B500c ve S500s sınıfında çeliklerin hızlandırılmış tuz spreyi korozyonu sebebiyle oluşan hasarın mekanik davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Yeni sınıf B500c çeliğinin mekanik özelliklerinin (özellikle duktilite) S500s'e göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak artan korozyon hasarı sebebiyle B500c çeliğinin daha hızlı bozulduğu kalite indeksi (Q_D , Quality index) kavramıyla değerlendirilerek tespit edilmiştir. Uzun dönemli etkilerin istenmeyen sonuçlar doğurabileceği, bu sebeple araştırılması gerektiği belirtilmiştir.

3.4.2 Atmosfer Şartlarının Korozyona Etkisi

Laboratuvar örneklerinden elde edilen korozyon hızı değerlerine ait veri bankası rölatif olarak geniş iken gerçek boyutlu beton yapılarda yerinde ölçülen veri sayısı daha azdır. Laboratuvarlarda gerçekleştirilen deneylerin büyük çoğunluğu kontrollü sıcaklık ve bağıl nem şartlarında yapılmaktadır. Ancak, gerçek dış ortam iklimi, gündüz-gece ve mevsimlik sıcaklık ve nem çevrimleri ile karakterize edilir. Bu çevrimler veya doğal hava şartları betonun iç bağıl nemini ve çeliğin korozyon hızını etkiler.

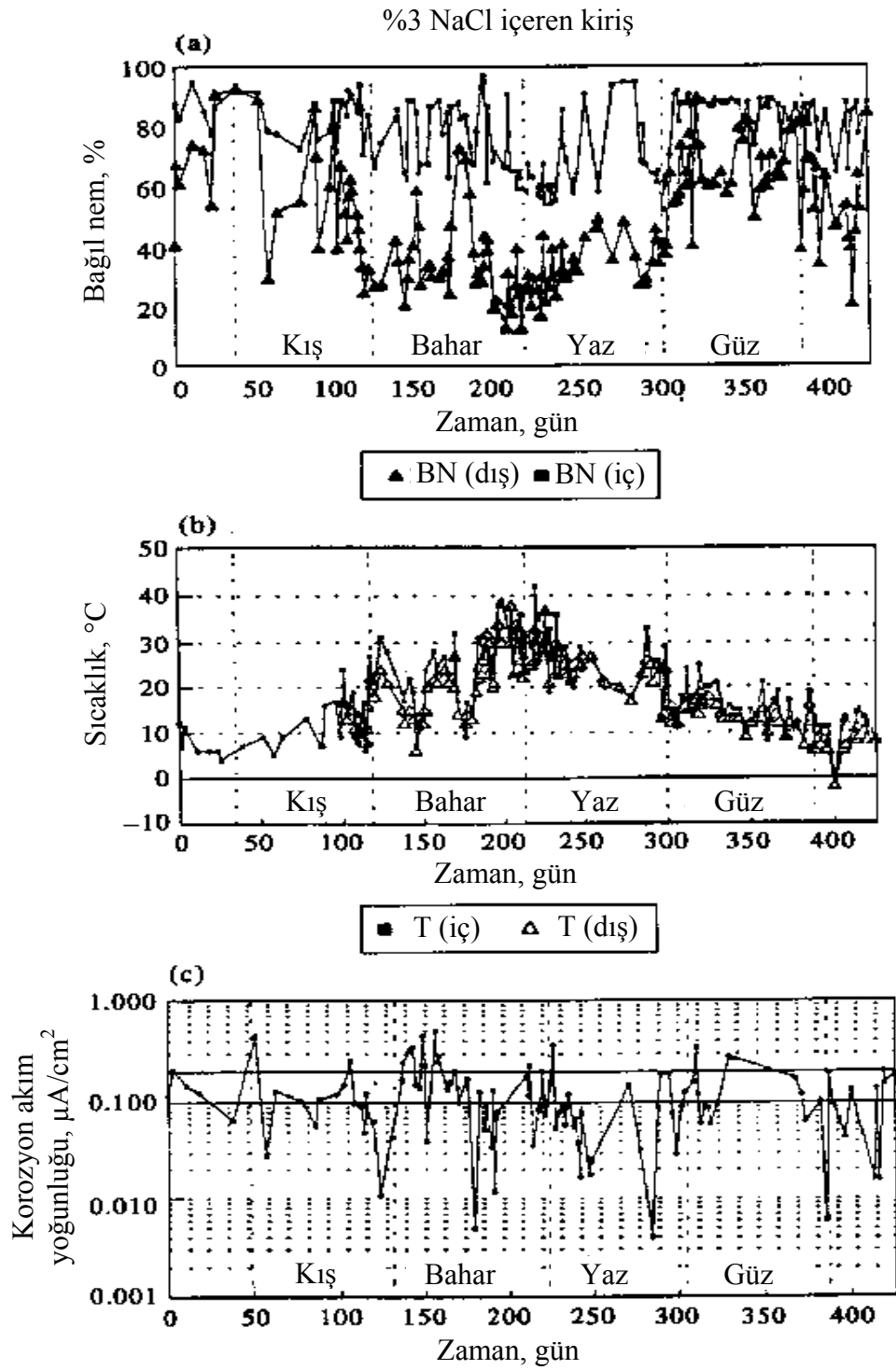
Betonun hidrotermal durumundaki değişimler sebebiyle donatıların korozyon hızını etkileyen dört ana hava olayı tanımlanmıştır:

- gündüz-gece çevrimleri,
- sezonluk çevrimler,
- aşırı sıcaklıklar,
- yağmur periyotları.

Betonun alkalinitesi çelik için güçlü bir pasivatördür. Ancak çelik, kloridler sebebiyle veya karbonatlaşmadan kaynaklanan pH düşmesi ile korozyona uğrayabilir. Çelik-beton kompozitlerindeki polarizasyon direnci çalışmalarında, prosesin hızını kontrol eden ana parametrenin betonun nem içeriği olduğu ortaya konmuştur (Alonso, Andrade, ve Sarria, 2002). Dolayısıyla, beton kuru ise korozyon ihmal edilebilir değerler gösterir ($0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den küçük). Nem arttığında bu değerler bu güne kadar ölçülen maksimum değer olan $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ civarına kadar artabilir.

Korozyonda nemin etkisinin iyice kanıtlanmış olmasının yanında, iklimsel değişikliklerin özellikle sıcaklığın korozyon hızına olan etkisi ile ilgili az veri bulunmaktadır. Korozyon hızında doğal iklimsel gece-gündüz çevrimlerinin etkisi yeni ortaya konmuştur. Doğal koşullarda bağıl nem ve sıcaklık değerlerinin beton içinde sürekli olarak değiştiiğinden ve dengeye ulaşamadığından korozyon hızları belirli bir eğilim göstermemektedir.

Andrade ve Alonso tarafından yapılan ve çimento ağırlığınca % 3 NaCl içeren, hava koşullarında saklanan bir kirişe ait yıl boyunca ölçülen dış ve iç bağıl nem değerleri Şekil 3.11-a'da, sıcaklık değerleri Şekil 3.11-b'de, aynı periyot boyunca ölçülen I_{corr} değerleri Şekil 3.11-c'de görülmektedir (Andrade ve Alonso 1996).



Şekil 3.11 Bir kirişte bir yıl boyunca ölçülen a-bağıl nem, b-sıcaklık, c-korozyon akım yoğunluğu değerleri (Andreade ve Alonso 1996).

Korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerlerinin düşük ($0,1-0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) ya da ihmal edilebilir ($<0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) mertebelerde olduğu görülmektedir. Sınırlı sayıda değer orta

düzeğin (0,5-1,0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) üzerine çıkmıştır. Dolayısıyla değışimlerin çok önemli olmadığı söylenebilir.

Ortalama değerler incelendiğinde, bağıl nemin yüksek olduğu durum hariç I_{corr} değerlerinin sabit kaldığını söylemek mümkündür. Buharlaşmanın fazla olması ortalama korozyon hızı değerinde önemli bir azalmaya yol açar.

Andreade ve Alonso bu çalışmalarından şu ana sonuçları çıkarmışlardır:

Korozyon hızı değerleri beton içindeki bağıl nem ile ilişkilendirilemez, çünkü bu parametre beton boşluklarındaki buhar içeriğini gösterir ve ek olarak betonun doğal hava koşullarında su ve buhar transferinin sabit olmayan bir açılımıdır. Dolayısıyla, iç bağıl nem değerleri buharlaşabilen sudaki doygunluğun farklı derecelerini ifade eder.

Yağmurdan korunmuş koşullarda betonun nem içeriğini belirleyen ana parametre sıcaklıktır. Korunmamış koşullarda ise nem içeriğinden yağmur periyotları (yağmur süresi ve frekansı) sorumludur.

Korozyon hızı değerleri sıcaklıkla doğrudan ilişkili denemez çünkü bu parametre birçok faktörü saf dışı bırakma veya dengede tutma etkisine neden olmaktadır.

Korozyon hızı değerleri ile daha iyi ilişkili olan nem faktörü kapiler su doygunluk derecesidir. Ancak, farklı betonlardaki aynı kapiler su doygunluk dereceleri, farklı korozyon hızlarına neden olmaktadır. Dolayısıyla bu faktör en ayrıntılı parametre olarak alınamaz.

Boşluk suyundaki oksijen içeriği veya donatıdaki pas miktarı gibi korozyon hızını etkileyen faktörleri devre dışı bırakmamasına rağmen en detaylı parametre rezistivitedir. Sonuçta eğer korozyon yayılım periyodu inceleniyorsa korozyon hızı doğrudan değerlendirilebilir.

3.4.3 Beton Kalitesinin Donatıların Korozyon Davranışına Etkisi

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, öngerilmeli elemanlarda ise 40 mm değerini önermektedir. Yapı elemanına klorür ya da deniz suyu etkisi söz konusu ise bu değerler sırası ile 45 ve 55 mm olmaktadır.

Beton kompozisyonu açısından sınırlandırmalarda temel hedef betonun geçirimsizliğinin azaltılmasıdır. Bu amaçla, betonun su/çimento oranının azaltılması ve çimento dozajının artırılması ile mümkün olan en az boşluk miktarının sağlanmasına çalışılır. Pas payı tabakası kalınlığının artırılması ile fiziksel koruma artırılarak, çevresel etkiden kaynaklanan agresif saldırının donatıya kadar penetrasyonunun engellenmesi hedeflenir. Diğer yandan, klorür içeriği sınırlandırılarak içten gelen saldırı önlenmeye çalışılır.

Çimento tipi ve su/çimento oranı açısından çeşitli beton kompozisyonları için, buz çözücü tuz etkisi altında, bir betonun elektriksel rezistivitesi onun klorid penetrasyonu ile ilişkili özelliklerini yansıtmaktadır. Su/çimento oranının 0,40 ve 0,45 değerleri için etki sınırlıdır. Ancak, su/çimento oranı 0,55 olan karışımlar önemli derecede düşük rezistivite ve daha büyük klor iyon penetrasyonu derinliği değerleri göstermiştir (Polder ve Peelen, 2002).

Taze ve sertleşmiş betonun elektriksel özellikleri Khalaf ve Wilson tarafından incelenmiştir (Khalaf ve Wilson, 1999). Genel olarak çalışma sonuçları göstermiştir ki; çimento hamuru, betonun elektriksel direncini kontrol eden temel faktördür. Ancak ince ve iri agregaların ikisi de taze betonda sertleşme öncesi su hareketinde önemli rol oynamaktadır. Çimento hamuru yapısındaki kimyasal değişimler betonun

elektriksel tepkisini etkilemektedir. Taze çimento hamurunun elektriksel direnci taze betonunkinden daha düşüktür. Bunun sebebi, iri agrega ve kum içeren betona kıyasla daha iyi iletkenlik sağlayan ince çimento taneleridir.

Dolayısıyla korozyon direnci için iyon hareketinin zor olduğu yüksek elektriksel dirence sahip betonların önemi ön plana çıkmaktadır.

3.4.4 Çevresel Koşulların Donatı Korozyonu Üzerindeki Etkisi

Betonarme yapılar kullanım süreleri boyunca çelik donatının korozyonuna yol açan karbonatlaşma ve klorid etkisine maruz kalırlar. Dolayısıyla bu etkiler yapının servis ömrü değerlendirmesinde önemli olmaktadır.

Zivica (2003), çalışmasında betonarme yapıları etkileyen karbonatlaşma ve klorür etkilerini incelemiştir. Bu olayların etki sırasının donatının korozyon davranışında önemli rolü olduğunu tespit etmiştir. Betonarme elemanın öncelikle karbonatlaşmaya ardından da klorürlere maruz kalması, korozyon hızını ve şiddetini önemli derecede arttıran bir faktördür. Öncelikle karbonatlaşma ardından klorid saldırısının korozyonu şiddetlendirici etkisi, betondaki boşluk çözeltisinin alkalinitesinin azalmasının ve sonuçta donatının elektrokimyasal olarak depasivasyonu ile klorid saldırısına çok daha hassas hale gelmesinin bir sonucudur.

Yine aynı çalışmada, kalsiyum ve magnezyum klorid çözeltilerinin sodyum klorid çözeltisi ile karşılaştırıldığında daha az agresif olduğu belirlenmiştir. NaCl ortamı, CaCl₂ ve MgCl₂ çözeltilerine göre neredeyse yarı konsantrasyonda bile en yüksek agresifliği göstermiştir. Bu bilgi göz önünde tutulduğunda, buz çözücü tuz olarak kalsiyum ve magnezyum klorür tuzlarının kullanımının daha az hasar verici olduğu rapor edilmiştir.

Buz çözücü tuz etkisinin incelendiği bir araştırmada, CEM-III/B (yüksek oranda yüksek fırın cürufu içeren) ve CEM-V/A (orta seviyede cüruf ve uçucu kül içeren) çimentoları ile yapılmış betonlar, CEM-I' e (normal portland çimentosu) göre daha

az klorid penetrasyonu, daha düşük korozyon olasılığı ve daha yüksek elektriksel rezistivite göstermiştir. CEM-II/B-V (orta seviyede uçucu küllü) orta sırada yer almıştır. CEM-II/B-V'te zamanın büyük etkisi vardır. İlk 8 hafta sırasında, rezistivite CEM-I ile benzerdir. 8 haftadan sonra CEM-II/B-V ile üretilmiş betonların elektriksel rezistivitesi CEM-I'e göre artan şekilde daha yüksektir. Özel bir betonun rezistivitesinin, o betonun klorid penetrasyonu, korozyon başlangıcı ve korozyon yayılımı özelliklerini yansıttığı tespit edilmiştir. Çimentonun yüksek fırın cürufu, uçucu kül veya her ikisi ile birlikte katkılı olarak kullanılması, korozyon başlangıcını geciktirmesi ve hızlandırılmış buz çözücü tuz etkisindeki hasarın şiddetinin sınırlanması açısından yararlıdır (Polder ve Peelen, 2002).

3.4.5 Çimento Tipinin Donatı Korozyonuna Etkisi

Beton karışımlarında kullanılan çimentoların özellikleri, donatıların korozyona karşı korunması ve çevresel ortamdan kaynaklanan kimyasal saldırılardan en az etkilenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Betona gömülü donatıların kimyasal olarak korunması kullanılan çimentonun ve çimentonun hidrasyon ürünlerinin özelliklerine bağlıdır. Sertleşmiş betonda sağlanan yüksek pH ile donatılar daha iyi korunabilecektir. Örneğin yüksek C_3S içeriğine sahip bir çimento ile daha fazla kalsiyum hidroksit oluşturulabilir. Alkaliniteyi arttıran bu ürün, donatının korozyon performansı açısından olumlu davranış gösterecektir. Ayrıca karbonatlaşma cephesinin ilerleyişinin yavaşlatılması açısından da yüksek $Ca(OH)_2$ miktarı fayda sağlamaktadır.

Sertleşmiş çimento hamurunun çevresel etkilere gösterdiği direnç, kimyasal bileşimine bağlıdır. Bu açıdan en önemli faz C_3A bileşeni olmaktadır. Bu bileşenin miktarının fazlalığı, sülfat etkisine maruz betonlarda genleşen kalsiyum sülfatürünler oluşturup kalıcılık problemleri yaratmaktadır. Diğer yandan, klorür etkisine maruz betonlarda nispeten yüksek C_3A içeriği olumlu bir davranış göstermektedir. Beton bünyesine nüfuz eden klor iyonları, alüminat fazları ile

tutulabilmektedir. Klor iyonları ile alüminli bileşenler arasındaki reaksiyonlardan Friedel tuzu ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) oluşur. Kimyasal olarak bağlanan klor iyonları, donatı yüzeyinde korozyon gelişimine sebep olamaz.

Katkılı çimentolar veya mineral katkılı betonlar açısından bakıldığında, sağlanan performans artışı, yine alüminli bileşenler ile ilgilidir. Bu konu Bölüm 3.4.7’de incelenmiştir.

Suryavanshi, Schntlebury ve Lyon (1998), yüksek su/çimento oranlı normal Portland çimentosu ve sülfata dayanıklı Portland çimentosu harçlarındaki çeliğin korozyon davranışı üzerinde klorid içeriğinin rolünü araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmaya göre:

1. Klorid içermeyen 0,70 su/çimento oranına sahip normal ve sülfata dayanıklı çimento harçlarındaki çelik elektrotlar kür periyodunun başından itibaren pasivite göstermiştir.

2. Yüksek su/çimento oranına (0,70) rağmen normal Portland çimentosu ($\text{C}_3\text{A}:\%11,2$) harcındaki çelik elektrotlar, çimento ağırlığınca %1 klorid seviyesine kadar pasivite göstermiştir. Ancak %1,75 ve 3,5 klorid içeren harçlar korozyon saldırısına maruz kalmıştır. Diğer yandan, sülfata dayanıklı çimento ($\text{C}_3\text{A}:\%1,4$) ile yapılan harçlardaki çelik elektrotlar %1, 1,75 ve 3,5 klorid içeriğinde korozyona maruz kalmışlardır. Dolayısıyla, yüksek C_3A içeriğine sahip çimento ile dökülen harçlardaki çelik, yüksek su/çimento oranlarında bile %1 klorid varlığında pasif hale geçmiştir.

3. Boşluk çözeltisindeki hidroksit iyonu konsantrasyonu, harcın maruz kaldığı ortam koşullarından oldukça etkilenmektedir (örneğin atmosfer koşulları). Diğer yandan, ortam etki şartlarının, boşluk çözeltisindeki klorid konsantrasyonunda etkisi yok gibi görünmektedir.

4. Atmosferik karbonatlaşma nedeniyle, yalıtılmamış koşullarda hidrate olan normal ve sülfata dayanıklı çimento harçlarının ($\text{Cl}^-/(\text{OH}^-)$) oranı, atmosferden izole edilmiş harçlardakinin yaklaşık iki katıdır. Dolayısıyla, yalıtılmış koşullarda hidrate

olmuş harçlarda bulunan (Cl⁻)/(OH⁻) oranı atmosferik karbonatlaşmaya maruz yapılar için uygun değildir.

5. Yüksek C₃A içeriğine sahip normal Portland çimentosu benzer koşullar altında düşük C₃A içeriğine sahip sülfata dayanıklı çimentodan daha fazla serbest klorid bağlar ve dolayısıyla çimentonun C₃A fazının önemini ortaya koymaktadır.

6. Normal Portland çimentosu harcındaki klorid, SEM incelemelerinde hegzagonal plaklar şeklinde görülen Friedel tuzu şeklinde bağlanır (3CaO.Al₂O₃.CaCl₂.10H₂O). Diğer yandan sülfata dayanıklı çimento harçlarındaki klorid, Friedel tuzuna benzer şekilde ve SEM’de hegzagonal plaklar şeklinde görülen daha az efektif kloroferrit fazı (3CaO.Fe₂O₃.CaCl₂.10H₂O) şeklinde bağlanır.

7. Düşük su/çimento oranına sahip beton ve harçtaki çelik gibi, yaklaşık 10 – 15µm kalınlığındaki kireç açısından zengin tabaka gömülü çelik donatı üzerinde, yüksek su/çimento oranında da oluşur. Page tarafından önerilen özel korozyon önleme (koruma) mekanizması, su/çimento oranı 0,70 gibi yüksek değerlere sahip harca gömülü çelik için de geçerlidir.

Mineral katkıları açısından bakıldığında benzeştirilmiş buz çözücü tuz şartları altında, deniz ortamındaki katkılı çimentoların yüksek klorid penetrasyon direnci olduğu bulunmuştur (Polder ve Peelen, 2002).

Benzer sonuçlar deniz suyunda ıslanma-kuruma etkisine maruz betonlardan da elde edilmiştir (Yiğiter, Yazıcı ve Aydın 2007). Gerek klor iyonu penetrasyon derinliği, gerekse belirli bir seviyedeki klor içeriği açısından cürüflü çimentoların normal Portland çimentosuna göre daha iyi performans gösterdiği rapor edilmiştir. Elde edilen bir diğer sonuç ise, cürüflü çimento ile üretilmiş betonların klorürlere karşı performansı üzerinde su/çimento oranı ve çimento dozajı değişimlerinin etkisi, normal Portland çimentosuna göre daha az olduğudur. Bir diğer deyişle, normal Portland çimentoları ile üretilmiş betonlar klorür açısından su/çimento oranı ve çimento dozajı değişimlerine daha hassastır.

3.4.6 Betonun Klorür İçeriğinin Donatı Korozyonuna Etkisi

Çelik donatının pasifliğini kaybedip çözünerek korozyona uğramasına neden olan klor iyonları beton bünyesine iki farklı yoldan girebilir. Bunlardan ilki, çevresel ortamda bulunan klor iyonlarının betona nüfuz etmesi ile gerçekleşmektedir. Betonarme eleman sulu bir ortamda örneğin deniz suyuna maruz ise, taşınma daha hızlı ve kolay gelişir.

Söz konusu diğer mekanizma ise beton üretimi sırasında klor iyonlarının betona karışabilmesidir. Klorürler, çimentodan, agregalardan veya çeşitli mineral ve kimyasal katkılardan kaynaklanabilir.

TS EN 206-1 beton standardı, çevresel etkilerden kaynaklı klorürler için beton özellikleri ve kalitesi üzerinde sınırlamalar koyduğu gibi, beton bileşenlerinden kaynaklanabilecek klorür içeriğini de sınırlandırmıştır. Bu sınırlandırmanın yanında kalsiyum klorür ve klorür esaslı katkıların, betonarme elemanlarda kullanılması yasaklanmıştır. TS EN 206-1'e göre izin verilebilen en yüksek klorür içeriği değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Söz konusu klor içeriği değerleri standarda göre iki şekilde hesaplanabilir. Birinci yöntemde, her bileşen malzeme için imalatçı tarafından beyan edilen veya ilgili standartta bileşen malzemesi için izin verilen en fazla klorür içeriği esas alınarak hesaplama yapılır. İkinci yöntemde ise, her bileşen malzemesine ait en az 25 adet klorür içeriği tayini deney sonucu ortalaması ile $1,64 \times$ bileşen malzemenin klorür içeriği değerlerinin standart sapması toplamı olarak her ay, her bileşen malzeme için belirlenen klorür içeriği değerlerinin toplamı esas alınır.

Tablo 3.1 TS EN 206-1'e göre betonun en fazla klorür içeriği

Kullanılan beton	Klorür içeriği sınıfı *	Çimento ** kütlesine göre en fazla Cl ⁻
Korozyona dayanıklı kaldırma (tutma) parçaları hariç, çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva etmeyen	Cl 1,0	%1,0
Çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva eden	Cl 0,2	%0,20
	Cl 0,4	%0,40
Çelik öngerme donatısı ihtiva eden	Cl 0,1	%0,10
	Cl 0,2	%0,20
* Özel kullanım amaçlı betonlarda uygulanacak sınıf, betonun kullanılacağı yerde geçerli kurallara bağlıdır.		
** Tip II katkıların kullanıldığı ve katkının çimentoya dahil olarak kabul edildiği yerlerde, klorür muhtevası, klorür iyonlarının, çimento + dikkate alınan toplam katkı miktarlarına oranlanmasıyla hesaplanır.		

Beton dayanımını kontrol eden önemli bir parametrenin su/çimento oranı olması gibi, sistemdeki alkali/klorid oranı betona gömülü çeliğin korozyon performansını etkileyen önemli bir durum olmaktadır. Geçmişte klorid için eşik limitinin bulunması amacıyla birçok çalışma yapılmış ve kloridler için tolere edilebilir limitin alkalinite ile arttığı ilişkisi kurulmuştur. Ancak pratikte, klorid seviyesi tolere edilebilen limitin üzerinde değişmez ve korozyonu hızlandırır. Klorid/hidroksit oranı ve çeliğin korozyon hızı arasındaki net ilişki henüz kurulmamıştır.

Thangavel ve Rengaswamy yüksek ve düşük dozajlı betonlarda çeşitli seviyelerdeki klorid içeriklerinin donatıların korozyon performansına etkilerini incelemişlerdir. Ürettikleri betonun başlangıçtaki klorid içeriği 0 ile %3,5 arasında değişmektedir. Korozyon hızının geleneksel gravimetrik metot ile değerlendirildiği çalışma göstermiştir ki, yeterli oksijen bulunduğu bile betona gömülü çeliğin korozyon hızı $(Cl^-)/(OH^-)$ oranı ile yavaş artmaktadır ve çevresel koşullar oksijeni

sınırlandırdığında (suya gömülü olma durumu) herhangi bir ilişki bulunamamıştır (Thangavel ve Rengaswamy, 1998). Çalışma sonuçları şu şekilde rapor edilmiştir:

- $(Cl^-)/(OH^-)$ oranı yalnız başına, tüm etki koşulları altında donatı korozyonu için uygun bir indeks değildir. Başlangıç klorid içeriği, oksijen difüzyonu gibi diğer parametreler önemli roller oynar.
- 274 kg/m^3 dozajlı ve agrega/çimento oranı 3,8 olan betonda korozyon yalnızca atmosferik etki altında ve beton ağırlığınca 1000 ppm başlangıç klorid içeriğinde mümkün olmaktadır.
- 138 kg/m^3 düşük dozajlı ve agrega/çimento oranı 9 olan betonda korozyon hızının $(Cl^-)/(OH^-)$ oranı ile doğrusal bir ilişkisi olduğu bulunmuştur.

3.4.7 Betondaki Mineral Katkıların Donatı Korozyonuna Etkisi

Taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde sağladığı faydalar sebebi ile mineral katkıları, beton üretiminin vazgeçilmez bileşenlerinden olmuştur. Taş unu gibi inert mineral katkıları betonda boşluk miktarını azaltması, doğal ve yapay puzolanik mineral katkıları (volkanik malzemeler, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) ise ilave bağlayıcılık özellikleri ile avantaj sağlarlar.

Betonda kullanılan mineral katkıları, betonun donatıya karşı fiziksel ve kimyasal koruma özelliklerini etkileyerek korozyon davranışını değiştirirler. Mineral katkıların donatı çeliklerinin korozyonu üzerinde birbirine zıt iki etkisi bulunmaktadır.

Bunlardan ilki fiziksel koruma üzerinde etkilidir. İkincil bağlayıcı madde olarak kullanılan mineral katkıları, çimentonun hidrasyon ürünlerinden olan sönmüş kireç ile puzolanik reaksiyon yaparak yeni kalsiyum-silikat-hidrat yapı meydana getirirler. Böylelikle zayıf bir bileşen olan kireç kimyasal olarak bağlanarak suda çözünmesi engellenir. 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 kireç, betonun boşluk suyundaki alkaliniteyi azaltır, 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 daha çok artarsa donatı daha iyi korunacak, kimyasal koruma azalırsa da donatının korozyon riski artacaktır.

Klorür etkisine maruz betonlarda, uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanımının sağladığı olumlu sonuç, mineral katkı ile klor iyonlarının kimyasal olarak bağlanması ile sağlanır. Beton bünyesine nüfuz eden klor iyonları, mineral katkı tanelerinin yüzeyinde adsorblanır ve alüminli bileşenler ile reaksiyon yaparak kloro alüminatlar şeklinde tutulur. Benzer reaksiyon, çimentonun C_3A bileşeni ile klor iyonları arasında da gerçekleştiği ve ürünün Fridel tuzu olduğu belirtilmişti. Mineral katkıların klor iyonları ile yaptığı reaksiyon da benzer bir ürün oluşturarak klor iyonlarının zararlı etkisinin azaltılmasını sağlar.

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

Bazı durumlarda ise mineral katkı kullanımının korozyon direncini azalttığı, korozyon gelişimini hızlandırdığı tespit edilmiştir. Montemar, Cunha, Ferreira ve Simoes (2002) uçucu kül ilavesinin aynı anda karbondioksit ve kloride maruz kalan betonarmede gerçekleşen korozyon prosesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bağlayıcı madde olarak %15 ve %30 uçucu kül içeren harçlara gömülü çelik donatıların korozyon prosesinin incelenmesinde, açık devre potansiyelleri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) kullanılmıştır. Hızlandırılmış karbonatlaşma ve klorid kirliliği koşulları altında, betona %30 uçucu kül ilavesi uçucu kül içermeyen numunelerle karşılaştırıldığında, korozyon hızını bir mertebe daha arttırmıştır. Doğal karbonatlaşma koşulları altında uçucu kül ilavesi ile harçtaki klorid içeriği azalmakta, hızlandırılmış karbonatlaşma durumunda artmaktadır. Bu zıt eğilimi, etki sırasında karbonatlaşma, puzolanik reaksiyonlar ve klorid difüzyonu arasındaki yarış ile açıklamışlardır.

Yüksek fırın cürufu içeren betonlardaki donatıların korozyon dirençlerinin incelendiği bir çalışmada (Yeau ve Kim 2005) şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. İkincil kimyasal reaksiyonlar ile daha yoğun bir mikroyapı oluşmaktadır.
2. Hızlı klor geçirimsizliği deneyine göre, betonun kür periyodu ve cüruf içeriği arttıkça, cürufllu betonların klor iyonu permeabilitesi azalmaktadır.
3. ASTM Tip I çimentolu betonların klor iyon geçirimsizliği Tip V' e göre daha düşüktür.
4. Daha yüksek cüruf miktarı kullanıldığında, daha az klor iyonu konsantrasyonları elde edildiği ve C₃A bileşeni düşük olan Tip V çimentonun klor bağlayamaması nedeni ile Tip I çimentonun daha iyi performanslı olduğu görülmüştür.
5. Kür periyodu ve cüruf içeriği arttıkça klor iyon difüzyonu katsayısı azaldığı tespit edilmiştir.
6. Cüruftan kaynaklanan S, SO₂, S₂O₃ gibi sülfür parçacıklarının indirgeyici etkisi sebebiyle, cürufllu betonlardaki çeliklerin korozyon potansiyelleri test öncesinde bile -250 mV'dan daha negatif bulunmuştur. Ancak bu donatılardaki korozyon hızı düşüktür. Yarı hücre potansiyeli

ölçümlerindeki eğilim ise, cüruf içeriği ve paspayı arttıkça potansiyel değerlerinin pozitif yöne yaklaşması şeklindedir. Dolayısıyla, yeterli paspayı ve uygun çimento tipi, sıradan bir donatının agresif ortamda korozyondan korunması için klor iyonu saldırısını geciktirebilir.

7. Çelikte korozyona uğrayan yüzey alanı paspayı kalınlığına ve cüruf içeriğine bağlıdır. Cüruf içermeyen kontrol betonundaki paslanmış donatı alanı, %40 cürufllu betondakinin iki katı, %55 cürufllu betondakinin 3 katı kadar fazla bulunmuştur. Tip I çimento ile hazırlanmış betondaki çeliğin paslanmış yüzey alanı Tip V çimento ile hazırlanmış betondaki çeliğe göre daha az olduğu görülmüştür.

Ha ve ekibi (2007), F tipi uçucu küllerin betonda kullanımının çeliğin korozyon performansına etkilerini hızlandırılmış kısa dönemli teknikler ile incelemişlerdir. Sodyom klorid çözeltisinde hızlandırılmış korozyon etkisi altında, açık devre potansiyel ölçümleri, anodik polarizasyon çalışmaları, zorlanmış voltaj tekniği, makrohücre korozyon çalışmaları ve pH ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri elektrokimyasal verileri ağırlık kayıpları ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

1. Betonun nihai pH değeri, pasifliğin bozulmasına yol açacak pH değerinin üzerinde olsa bile, mineral katkı kullanımı pH değerini düşürmektedir.
2. Çimento yerine %30'a kadar uçucu kül kullanımı, betondaki çeliğin korozyon direnci özelliğini geliştirmektedir.
3. Uçucu kül betonun geçirimsizlik karakteristiklerini geliştirmekte, korozyon başlangıcını geciktirmekte, korozyon hızını azaltmaktadır.
4. Uçucu kül korozyona karşı daha iyi performans göstermekte ve klorid bağlama kapasitesi arttırmaktadır.
5. Hızlandırılmış korozyon deney teknikleri arasında iyi bir uyum bulunmaktadır.

3.5 Donatı Korozyonuna Karşı Alınacak Önlemler

Yapının bulunduğu çevre koşulları dikkate alınarak tasarlanmış, kaliteli, geçirimsiz, yeterli kalınlıktaki beton örtü tabakası alkali ortamı ve sağladığı geçirimsizlikle -çok şiddetli bir çevre etkisi mevcut değilse- donatıyı korozyondan istenen şekilde koruyabilir.

Korozyonun gelişimi için gerekli olan koşullar ve bu koşulların beton içinde ve çelikte oluşmasına yol açan etkenler CEB-RILEM tarafından derlenmiş ve Tablo 3.2'de özetlenmiştir. Reaksiyonun durdurulması için alınabilecek önlemler de aynı tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Korozyonun gelişimini etkileyen faktörler ve alınabilecek önlemler

Korozyonu kontrol eden faktörler	Doğrudan bağlı olduğu koşul	Etkileyen Faktörler	Korozyonu önlemek veya hızını düşürmek için olanaklar
Elektronlar açısından çeliğin iletkenliği	Her zaman mevcut	-	-
Elektro-kimyasal işlem için çelik yüzeyinde potansiyel farkları	Her zaman mevcut	-	Katodik koruma veya kimyasal katkı kullanımı
Hidroksit iyonlarının iletimi için betonun elektrolitik iletkenliği	Betonun su içeriği	Ortam koşulları, Betonun geçirimliliği	Pas payı tabakasının kalınlığının arttırılması
Elektro-kimyasal korozyon için demirin çözülmesi (anodik işlem)	Betonun karbonatlaşması veya zararlı iyonlar nedeniyle (Cl ⁻) pH<11,5 altına düşmesi	Pas payı tabakasının kalınlığı ve geçirimliliği beton karışımı, çatlaklar, çatlak genişliği	Beton kalitesinin arttırılarak geçirimliliğinin azaltılması
Katodik işlem ve pas ürünlerinin oluşması için oksijen bulunması	Oksijenin beton içinden geçerek donatı yüzeyine ulaşması	Pas payı tabakasının kalınlığı ve geçirimliliği, betonun su içeriği çatlaklar, çatlak genişliği	Çatlak genişliklerinin sınırlandırılması

Korozyon riski yüksek yapılarda beton kalitesinin istenen düzeyde sağlanması şarttır. TS EN 206-1 standardına bakıldığında, klorür iyonlarına maruz ıslanma-kuruma etkisine açık yapılarda izin verilen en fazla S/Ç oranı 0,45, en düşük dayanım sınıfı C35 ve kullanılması gerekli en az çimento dozajı 320 kg/m^3 tür. Deniz suyu ile temas halinde ise kullanılacak en az çimento dozajının 340 kg/m^3 olması istenmektedir.

Çok şiddetli etki durumunda, maliyeti oldukça yüksek olan önlemler almak gerekebilir. Bunlar arasında; korozyon önleyici katkı maddesi kullanmak, çeliği galvaniz ya da epoksi ile kaplamak ve katodik koruma sağlamak sayılabilir.

Normal betonarme donatısı yerine paslanmaz çelik kullanımı mümkündür ancak aşırı maliyet artışı ve betonla aderansının iyi olmaması bu çözümü geçersiz kılar. Cam elyafından donatı yapımı için araştırmalar halen sürmektedir. Bu tür donatılar gevrektiler ve şantiyede işlenemezler. Ayrıca alkalilere dayanıklı cam elyafı türü çok pahalıdır.

Beton yüzeyinin polimer esaslı malzemelerle kaplanarak, betonun klorür ve nem geçirimsizliğinin azaltılması da mümkündür. Bir diğer seçenek polimer emdirilmiş beton (PIC) kullanımınıdır.

Değişik tiplerde korozyondan korunma yöntemlerinin araştırıldığı bir çalışmada Mannar bölgesinde doğal deniz ortamına maruz bırakılmış C40 kalitesinde betona gömülü yumuşak çelik çubuğun korozyon davranışı incelenmiştir (Venkatesan, Palaniswamy ve Rajagopal, 2006). Çalışmada, çimento-polimer kompozitlerin, polimer ağı emdirilerek kaplama yapılmasının ve epoksi kaplamaların performansı incelenmiştir.

Bir yıllık etki sonucunda; atmosfer ortamında hiçbir numunede ağırlık kaybı görülmemiştir. Gelgit bölgesinde impedans metoduna göre 362 gün sonunda performans şu şekilde sıralanmaktadır: çimento-polimer kompozit (CPCC) > epoksi kaplama > polimer ağı emdirilerek kaplama (IP) > kontrol numuneleri. Ağırlık kaybı

yöntemine göre kontrol numunelerinde korozyon hızı yılda 0,0087 mm'dir. Deniz tabanında bekleyen numunelerde de performans sıralaması benzer şekildedir. Kaplama yapılmış numunelerde kaplamaların hasar görmediği rapor edilmiştir.

BÖLÜM DÖRT

DONATI KOROZYONUNUN ÖLÇÜMÜ

Metalik malzemelerde korozyon, farklı teknikler ve değişik ölçüm yöntemleri ile karakterize edilebilen malzeme kaybını ifade etmektedir. Bir malzemeyi korozyon konusunda değerlendirmenin en basit yolu korozyondan önce ve sonra göz ile inceleme yapmaktır. İnceleme sonucu olarak, paslanmış yüzey alanı, korozyon sebebiyle oluşan çukurcuk (pit) sayıları ve korozyon ile kaybedilmiş kesit alanı miktarı elde edilebilir.

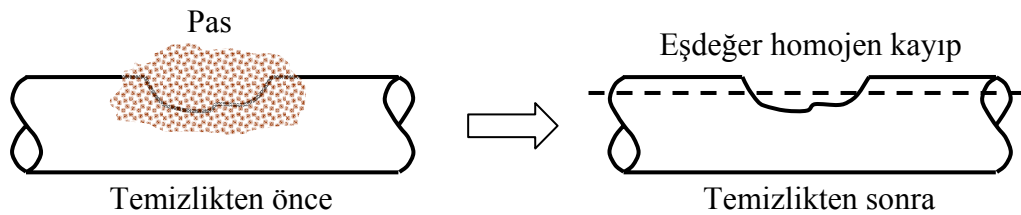
Her durumda yapılması mümkün olmayan, çoğu zaman yapı güvenliğini tehlikeye sokan ve değerlendirme için fazla zaman gerektiren bir yöntem de malzemenin korozyona maruz kaldıktan sonra ağırlık kaybının ölçülmesidir. Kütle kaybının belirlenmesi, metalik korozyon çalışmaları için basit bir yöntem olmakla birlikte bu yöntem gerçeğe en yakın sonuçları veren referans bir yöntemdir.

Ancak, görsel inceleme ve kütle kaybı yöntemleri çoğu zaman sınırlı uygulama alanına sahiptir. Hasar oluşmuş bir betonarme elemanda, korozyon düzeyinin tahribatsız olarak tespiti oldukça yüksek bir önem taşımaktadır. Donatı korozyonunun hasarsız bir şekilde tespiti için oldukça geniş uygulanan yöntemler elektrokimyasal tekniklerdir. 1949'da Pourbaix, Ca(OH)_2 'ye doymun bir çözeltiye batırılmış çubuklara polarizasyon eğrilerini uygulamış ve donatıların korozyon davranışını ortaya koymaya çalışmıştır. Daha sonra 1959'da Kaesche ve Baumel benzer bir çalışmayı harç örneklerinde yapmışlardır. Polarizasyon direnci gibi daha ileri düzeyde elektrokimyasal tekniklerin uygulanması 1970'lerin başlarında gerçekleşmiştir. Elektrokimyasal impedans veya elektrokimyasal ses 1980'lere kadar kullanılmıştır. Bu aşamalardan sonra gerçek yapılara uygulanması ile birlikte elektrokimyasal teknikler oldukça hızlı gelişmiştir. Donatı korozyonu ile erken hasara uğraması nedeni ile yapıların kalan yapısal koşullarının belirlenmesi ihtiyacı bu uygulamalar için bir itici güç olmuştur (Andrade ve Alonso, 1996).

Korozyona uğrayan yapıların güvenliğinin değerlendirilmesi ana sorunlardan biridir. Ancak, bilgi durumu hala bunların değerlendirilmesi için tamamıyla tatmin edici metodoloji verememektedir. Bununla birlikte, son on yılda, korozyon akımı ölçümünün yerinde yapılabilirliği ile ilgili birçok gelişme olmuştur. Yıllık tipik I_{corr} değerinin elde edilmesinde bazı belirsizlikler olmasına rağmen, korozyon hızının niceliği, yapının kalan yük taşıma kapasitesinin hesabı için bir yaklaşıma olanak sağlamıştır. Hava koşulları betonun nem içeriğini etkiler ve korozyon akımında buna karşı gelen değişimlere neden olur. Andrade ve Alonso (2001) çalışmalarında, korozyon akımını yerinde doğru bir şekilde ölçme koşulları ile birlikte yıllık tipik I_{corr} değeri elde etmek için bir metodoloji sunmaktadır. Bunun, donatı kesit alanı kaybının bulunması için gerekli formüllere yerleştirilmesi de verilmektedir.

4.1 Korozyon Hızı

Belirli bir zaman aralığında, birim yüzeyde oluşan korozyon miktarı korozyon hızı olarak bilinir. Bu parametre malzeme korozif ortama maruz bırakılmadan önce ve sonra kütle kaybının belirlenmesi ile ölçülebilir. Test süresi boyunca ifade edildiğinde toplam, üniform korozyon kabulü yapıldığında ise ortalama bir gösterge olmaktadır (Andrade ve Alonso 1996) (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Donatıda gerçekleşen lokal korozyon hasarı ve eşdeğer üniform malzeme kaybının şematik olarak gösterimi.

Elektrokimyasal teknikler kullanıldığında, elektrokimyasal parametrelerin gravimetrik hale dönüştürülmesi Faraday Yasası kullanılarak yapılır (Denklem 4.1):

$$\frac{I.t}{F} = \frac{\Delta W}{W_m/Z} \quad (4.1)$$

Burada,

I : elektriksel akım (A),

t : zaman (s),

F : Faraday sabiti=96500 coulomb,

ΔW : ağırlık kaybı (g),

W_m : metalin moleküler ağırlığı,

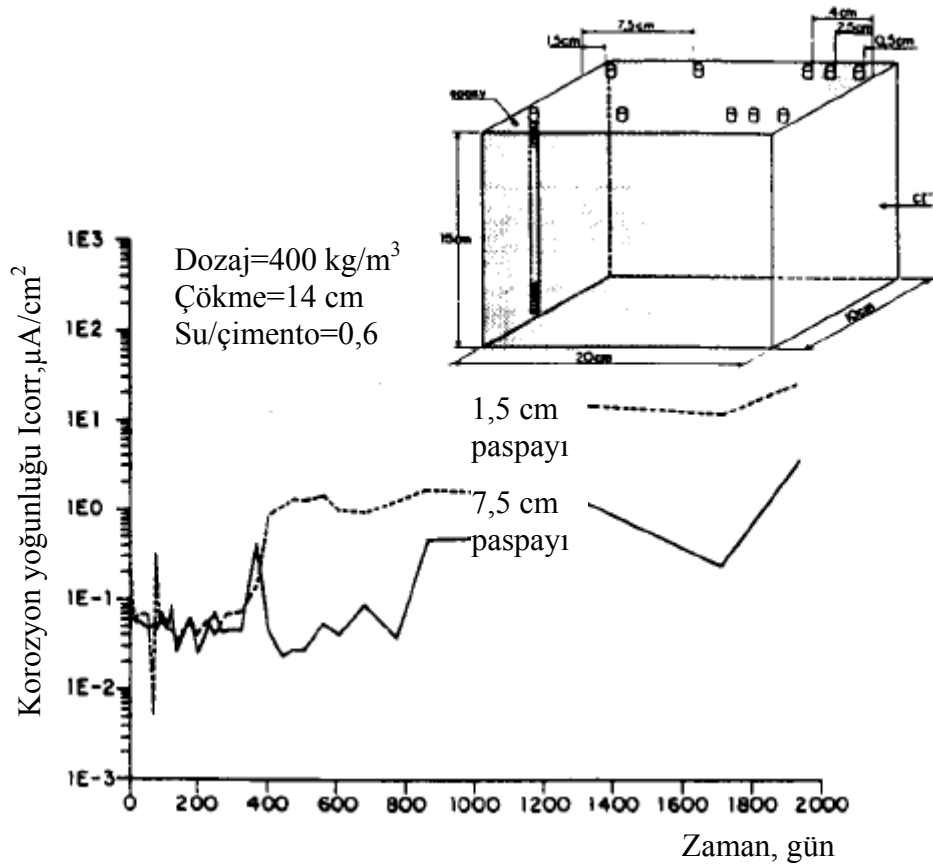
z : değerlidir.

Denklemin içerdiği akım, korozyon yoğunluğu (corrosion intensity), I_{corr} , olarak isimlendirilir ve üniform korozyon kabul edildiğinde μ/cm^2 veya $\mu m/yıl$ birimlerinde verilir. Eğer saldırı homojen ise deneylerden bulunan akım korozyona uğrayan metalik yüzey ile ilgilidir ve dolayısıyla, $\mu A/cm^2$ biriminde verilir. Metalin yoğunluğu nedeniyle saldırı penetrasyonunu $\mu m/yıl$ biriminde ifade etmek de olasıdır.

Deney yönteminden bağımsız olarak korozyon yoğunluğu I_{corr} , deneyde kayıt alınan belirli bir an ile ilgili anlık bir değer ifade eder. Korozyon prosesinin gelişimini belirlemek amacıyla, belirli zaman aralıkları için periyodik olarak güncellendiğinde korozyon hızına dönüştürülür. “Korozyon yoğunluğu” ve “korozyon hızı” farklı terimler olmalarına rağmen, pratik amaçlar için birlikte kullanılırlar. Farklı örneklerin veya yapıların karşılaştırılmaları amacıyla izole edilmiş I_{corr} değerleri kullanılabilir.

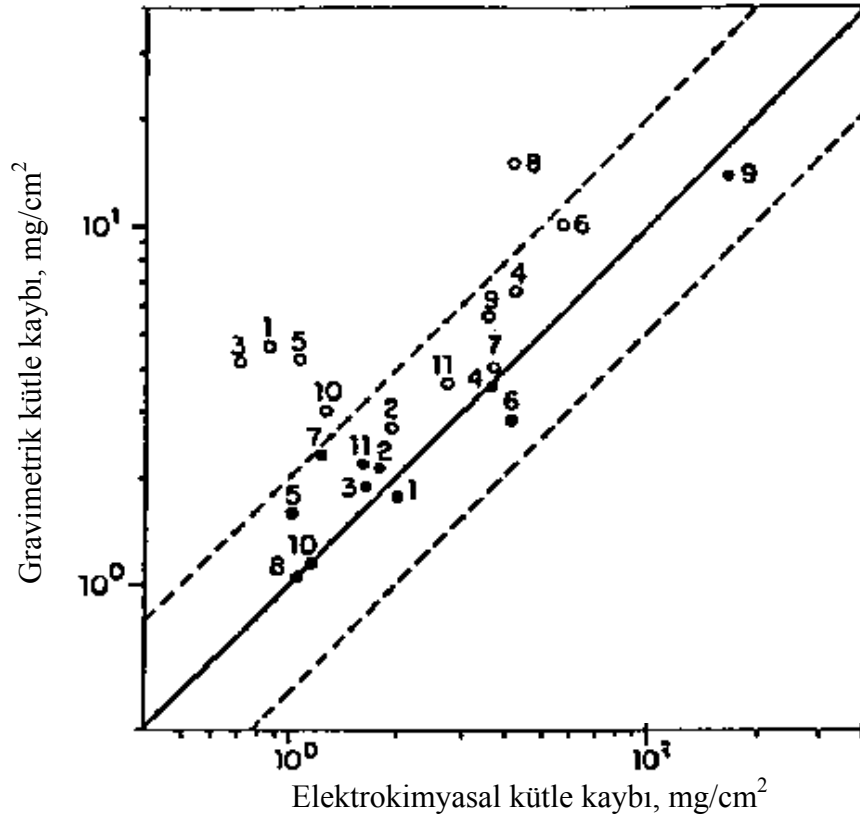
Örnek olarak Şekil 4.2’de deniz suyuna maruz bırakılmış bir numunenin davranışı görülmektedir. Çeliğin depasivasyonuna karşı gelen ani artış bölgesine kadar olan birinci periyotta I_{corr} değerleri düşüktür. Deneyin devamında (ileriki aşamalarda) değerler sürekli artmaktadır.

I_{corr} -zaman eğrisinin altında kalan alan integre edilirse, kaydedilmiş toplam akım zarar gören donatıdaki kütle kaybına eşit olmalıdır. Diğer bir deyişle, I_{corr} değerlerinden hesaplanan “elektrokimyasal kayıp”, aynı çubukta ölçülen gravimetrik kayıpların gerçek değerleri ile uyumlu olmalıdır. Laboratuvarda bir elektrokimyasal teknik kullanılacak olursa, elektrokimyasal tekniklerden bulunan I_{corr} değerlerinin gerçek ve geçerli olması için böyle bir karşılaştırmanın yapılması önerilmektedir.



Şekil 4.2 Deniz suyuna maruz betondaki donatılarda korozyon yoğunluğu gelişimi (Andrade ve Alonso 1996).

Gravimetrik değerler ile lineer polarizasyon ölçümlerinden bulunan elektrokimyasal değerlerin karşılaştırılması örnek olarak Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Değerler dıştaki çizgiler ile sınırlandırılmış aralık içinde kalırsa, elektrokimyasal sonuçlar yeterince hassas olarak alınabilir.

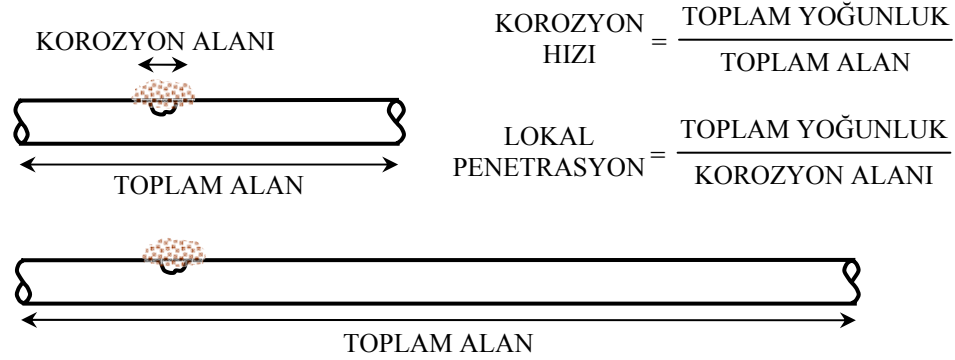


Şekil 4.3 Lineer polarizasyon ölçümlerinden bulunan elektrokimyasal kayıplar ile gravimetrik kayıpların karşılaştırılması (Andreade ve Alonso 1996).

Lokal bir saldırı durumunda yorum yapılacak olursa; genelleştirilmiş (üniform) bir korozyon yerine, lokal bir korozyon oluşursa I_{corr} değerleri bir hata tarafından etkilenebilir. Korozyona maruz kalan yüzey arttıkça bu hata da artar. Bunun sebebi referans olarak hesaplanan toplam alandır (Şekil 4.4).

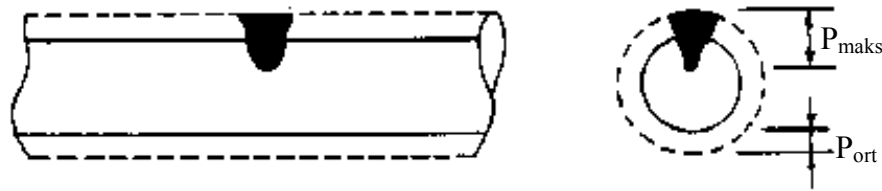
LOKAL SALDIRI

ÖRNEK ALANI NEDENİYLE I_{corr} 'DA BAĞIL HATA



Şekil 4.4 Korozyon hızı ve lokal penetrasyon arasındaki fark.

Bu hatayı en aza indirmek için ilk tavsiye küçük boyutlarda örnekler kullanmaktır. Bir diğer olasılık akımın toplam alan için değil de, korozyondan zarar gören ve görsel olarak tanımlanan bölge için (anodik bölge) ölçümüdür. Ancak bu prosedür görsel inceleme için örneğin parçalanmasını veya alan ölçümünün sadece deney sonunda yapılmasını gerektirir. Ortalama penetrasyon ve maksimum çukurcuk derinliği arasındaki P_{maks}/P_{ort} oranı Şekil 4.5'te incelenmiştir. Farklı atmosferlere maruz çelikler için bu oran 3 ile 5 arasındadır.



Şekil 4.5 Maksimum çukurcuk derinliği ile ortalama korozyon arasındaki fark.

Benzer çalışmalar beton yapılar için nadirdir. Bunlardan, çelik donatı için P_{ort}/P_{maks} oranının benzer değeri açıklanmıştır ve P_{av} ile P_{maks} arasındaki 10 oranının korunumlu limit olarak kullanımı önerilir. Lokal hasar söz konusu olduğunda, elektrokimyasal teknik ile bulunan I_{corr} değeri 10 ile çarpılmalıdır.

4.2 Korozyonun İzlenmesi

Betonarme yapılarda korozyon problemlerini incelemek ve değerlendirmek üzere kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Yapıda ne kadar hasar olduğunun ve bu hasarın zamanla nasıl büyüdüğünün anlaşılması için tek bir yöntem yeterli olamamakta ve ne yapılacağına karar vermek mümkün olmamaktadır. Donatı korozyonu dışında donma-çözülme, termal etkiler, alkali-agrega reaksiyonu, yapıda farklı oturmalar gibi sebepler de yapıda hasara neden olabilmektedir. Bazı durumlarda çoklu sebeplerle ortaya çıkan hasar korozyon hasarının şiddetini arttırmaktadır.

Betonarme yapının tam olarak değerlendirilmesi iki aşamalı bir süreçtir. İlk aşamadaki ön inceleme, problemin yapısını karakterize etmeli ve detaylı inceleme için oluşturulacak plana yön vermelidir. Detaylı inceleme ise, problemin nedenleri ile hasarın boyutları ortaya konmalıdır (Broomfield 2003). Yapısal hasarların ortaya çıkmış olması veya yapı güvenliğinin belirsiz olduğu durumlarda ise yapısal analiz gerekmektedir.

Ön incelemede genellikle görsel tetkik, çatlak ve tabaka atmaların boyutlarının belirlenmesi, birkaç noktada karbonatlaşma ve yarı hücre potansiyeli ölçümleri, laboratuvar analizleri için betondan numune alımı (kırık parça veya karot), işlemleri gerçekleştirilir. Betonda veya donatıdaki kayıplar sebebiyle yapısal bütünlüğün tehlikede olup olmadığı kontrol edilir.

Detaylı incelemede hasarın veya bozulmanın miktarı ve şiddeti mümkün olduğunca hassas bir şekilde tespit edilmeye çalışılır. Tüm elemanlarda detaylı görsel inceleme, çekiç deneyleri ile gerekli elemanlarda yarı hücre potansiyeli ölçümleri, klorid içeriği, karbonatlaşma derinliği, paspayı kalınlığı ölçümleri yapılmalıdır. Yapıdaki tüm bozulmalar, yapının maruz kaldığı koşullar not edilmeli gerekli numune alım işlemleri yapılmalıdır.

Tablo 4.1’de uygulamada kullanılan yöntemler özetlenmiştir (Broomfield 2003).

Tablo 4.1 Betonarme yapılarda inceleme teknikleri

Yöntem	Ölçülen	Kullanım	Yaklaşık hız
Görsel inceleme	Yüzey hasarları	Genel	1 m ² /s
Çekiçle kırma	Tabaka atma	Genel	0,1 m ² /s
Paspayı ölçer	Donatı derinliği ve boyutu	Genel	1 okuma / 5 d
Phenolphtalein	Karbonatlaşma derinliği	Genel	1 okuma / 5 d
Klorid içeriği	Klorür korozyonu	Genel	Karot alma veya delme + laboratuvar veya özel şantiye analizleri
Yarı hücre potansiyeli	Korozyon riski	Genel / uzman	1 okuma / 5 s
Lineer polarizasyon	Korozyon hızı	Genel / uzman	Ekipmana bağlı olarak 1 okuma / 5–30 d
Direnç	Beton direnci / korozyon riski	Genel / uzman	1 okuma /20 s
Permeabilite	Difüzyon hızı	Genel / uzman	1 okuma / 5 d veya karot + laboratuvar
Ultrases	Betondaki hasarlar	Uzman	1 okuma /2 d
Petrografi	Beton özellikleri	Genel	Karot+laboratuvar
Radar ve radyografi	Hasarlar, çelik yeri, koşullar	Uzman	Araçlı sistemde >1 m ² /s, el sisteminde 1 m ² /20s + yorumlama

Görsel inceleme, karbonatlaşma ve klorid ölçümleri ve pas payının belirlenmesi her durumda gerekli metotlardır. Diğer tekniklerin kullanımı ile korozyon sebepleri, hasarın miktarı ve korozyonun yayılımı ile ilgili detaylar edinilir.

4.2.1 Gözlemsel İnceleme

Bir yapının bozulma sürecinde özellikle korozyon hasarının takip edilmesinde en basit yöntem görsel incelemedir. Yapıda gözlem için herhangi bir ekipman gerekmemekte, insan gözü yeterli olmaktadır. İnceleme sırasında sistematik bir plan takip edilmeli, yapı elemanlarının durumu, maruz kaldıkları koşullar not edilmelidir.

Değerlendirme, gözlem yapan mühendisin bilgi ve tecrübesine dayanmaktadır. Bazı durumlarda yapıdaki hasarın nedeni yanlış anlaşılmakta ve dolayısıyla hatalı çözüm önerileri öngörülebilmektedir. Doğru bir değerlendirme için dikkatli olunmalıdır.

4.2.2 Paspayı Ölçümü

Yeni yapılarda yeterli paspayı tabakasının oluşturulduğunun kontrol edilmesi, eski ya da donatı korozyonuna maruz yapılarda ise, agresif kimyasalların, nem ve oksijenin donatıya nasıl ulaştığının belirlenmesi için, beton örtü tabakasının kalınlığı ölçülmektedir. Pas payı tabakası kalınlığının yetersiz olması korozyon hızını arttıracığından yapıda hangi elemanlarda daha fazla korozyon hasarı oluşabileceği de tespit edilebilir.

Manyetik paspayı ölçerler ile betonarme elemandaki donatıların beton yüzeyindeki koordinatları ile yüzeyden derinlikleri ölçülebilir. Bu cihazlar ile donatının çapının belirlenmesi de mümkündür. Donatıların birbirlerine çok yakın olmaları, demir içeren agregaların kullanımı, farklı çeliklerin farklı manyetik özelliklerinin bulunması, cihazların yeterince hassas olmamaları yöntemi etkileyen faktörler olarak sayılabilir.

4.2.3 Yarı Hücre Potansiyeli

Bu test yöntemi, betonarme donatısının korozyon aktivitesini tespit etmek amacıyla laboratuvarında veya yerindeki betondaki kaplamasız donatıların elektriksel

yarı hücre potansiyellerinin tespiti amacıyla kullanılmaktadır. Kurutulmuş beton yüzeyleri veya dielektrik bir malzeme ile kaplanmış yüzeyler kabul edilebilir mertebelerde elektrik akımı sağlamadıklarından, böyle şartlarda kullanımları doğru değildir. Yöntemin ASTM C876 da belirtilen kullanım koşulları ve önemi şu şekildedir:

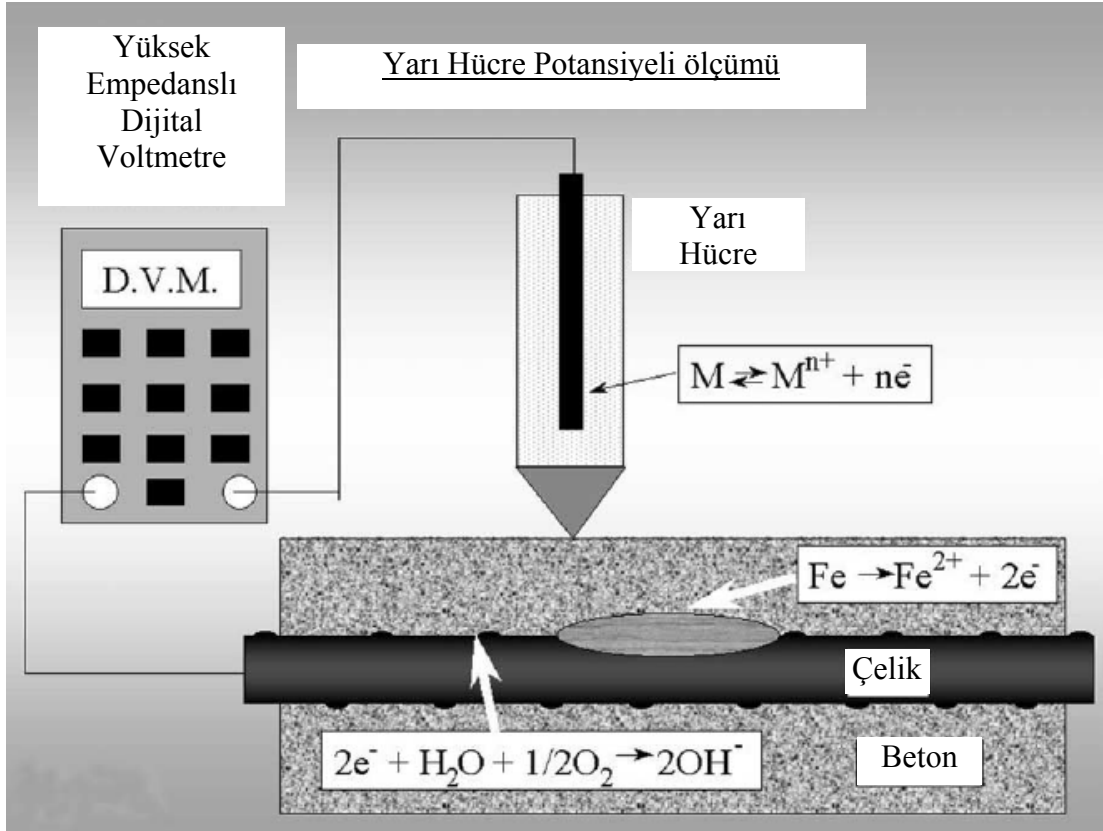
- Yöntem servisteki yapıların değerlendirilmesi ve araştırma-geliştirme işleri için uygundur.
- Bu metot elemanların boyutu ve betonarme çeliği üzerindeki beton paspayı kalınlığı ne olursa olsun kullanılabilir bir yöntemdir.
- Betonarme elemanın servis süresi boyunca herhangi bir zamanda kullanılabilir.
- Bu test metodunun kullanımıyla elde edilen sonuçlar, çeliğin veya betonarme elemanın yapısal özelliklerinin tahmini anlamında ele alınmamalıdır.
- Potansiyel ölçümleri, beton malzemeleri alanında ve korozyon deneylerinde tecrübeli mühendisler ve teknik uzmanlarca yorumlanmalıdır.

Betona gömülü çeliğin korozyon aktivitesinin incelenmesi ve yapının servis süresi boyunca yapıya olan muhtemel etkilerinin belirlenmesi amacıyla; potansiyel ölçümlerine ek olarak sıklıkla, klorid içeriği, karbonatlaşma derinliği, korozyon hızı sonuçları ve çevresel etki şartları gibi diğer bilgileri de kullanmak gereklidir.

Bir bakır-bakır sülfat elektrodu şu elemanlardan oluşur:

- Bakır veya bakır sülfat ile reaksiyona girmeyen elektriksel olarak yalıtkan bir malzeme ile kompoze edilmiş rijit bir tüp,
- Kapiler yolla sürekli ıslak kalan poroz bir ağaç ya da plastik tapa,
- Doygun bakır sülfat çözeltisi ile dolu tüpe koyulacak bakır çubuk.

Yarı hücre potansiyel ölçümlerine ait düzenek şematik olarak Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Yarı hücre potansiyel ölçümü.

Çözelti taneli bakır sülfat kristallerinin damıtılmış veya iyonize olmayan suda çözülmesi ile hazırlanmalıdır. Çözeltinin dibinde çözünmemiş fazla kristaller kaldığında doymun olarak kabul edilebilir. Rijit tüpün iç çapı 25 mm'den, poroz tıpanın çapı 12mm'den, çözeltiye daldırılmış bakır çubuğun çapı 6mm'den ve boyu 50 mm'den az olmamalıdır.

Bu metotta mevcut kriterler yarı hücre reaksiyonu olan $Cu \rightarrow Cu^{++} + 2e^{-}$ reaksiyonuna dayanmaktadır. Doymun bakır-bakır sülfat yarı hücresinin potansiyeli referans hidrojen elektroduna göre -0.316 V'dur (22,2 °C'de).

Bu test metodunda bakır-bakır sülfat yarı hücre tipinden başka benzer ölçüm aralığı ve hassasiyet karakteristikleri bulunan yarı hücreler de kullanılabilir. Laboratuvar çalışmalarında gümüş-gümüşklorür ya da civa-civaklorür (kalomel) hücreler de kullanılmaktadır. Ölçülen potansiyellerin istenen potansiyele dönüştürülmesi unutulmamalıdır.

Beton yüzeyi ile yarı hücre arasında düşük elektriksel dirençli köprü sağlamak amacıyla, düşük elektriksel dirençli sıvı ile önceden ıslatılmış bir veya birkaç sünger bulunmalıdır. Sünger, yarı hücrenin etrafına sarılmalı ve ucundan tutturulmalıdır. Böylece poroz tıpa ve beton eleman arasında elektriksel süreklilik sağlanmış olacaktır.

Devrenin beton yüzeyindeki potansiyel düşüşünü standardize etmek amacıyla elektriksel temas çözeltisi kullanılır. Bu çözelti, 95 ml kimyasal madde (ticari olarak bulunabilen) veya sıvı deterjanın 19 litre su ile karıştırılması ile elde edilebilir. 10°C'nin altındaki sıcaklıklarda elektriksel temas çözeltisinin bulutlanmasını engellemek amacıyla hacimce yaklaşık olarak %15 isopropil veya denature alkol eklenmelidir. Zira bulutlanma, test edilecek betonun içine sıvı girişini engeller.

Potansiyel ölçümlerini yapacak voltmetre kullanımdaki voltaj aralığının %3 mertebesinde kesin değerler alabilmelidir. Sağlıklı ölçümler için voltmetrenin giriş impedansı $10M\Omega$ 'dan düşük olmamalıdır. Kullanılan skaladaki bölmeler enterpolasyona gerek kalmadan 0,02 V'luk potansiyel farklarını okumaya uygun olmalıdır. Devrelerde kullanılacak elektrik kablolarının boyutları elektrik devresini 0,0001 V'dan daha fazla etkilemeyecek şekilde ayarlanmış olmalı ve yalıtımlı olmalıdır.

Beton eleman yüzeyinde ölçümler arası optimum mesafe bulunmalıdır. İki ölçüm noktası arasında önceden tanımlanmış minimum aralık bulunmadığında, virtüel olarak aynı noktadan iki ölçüm almak mantıklı değildir. Bunun tersine, çok geniş aralıklarda alınan ölçümler var olan korozyon aktivitesini tespit edemeyebilir veya değerlendirme için uygun olmayan sonuçlar verebilir. Dolayısıyla ölçüm aralıkları incelenen eleman ile ve ölçüm probu ile uyumlu olmalıdır. Köprü tabliyelerinin analizi için 1,2 m'lik aralıkların tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür. Genel olarak, geniş aralıklar olasılığı artırır, lokal korozyon bölgeleri tespit edilemez. Ölçümler bir kareyaj şeklinde veya rastgele alınabilir. 150 mV değerini aşan okuma

farkları görüldüğünde ölçümler arası aralık azaltılmalıdır. Minimum aralık genellikle okumalar arasında en az 100 mV şartını sağlamalıdır.

Donatı çeliğine basınç tipi mengene veya lehim ile doğrudan elektrik bağlantısı yapılır. Düşük elektriksel dirençli bağlantı elde etmek için bağlantıdan önce çubuk temizlenmelidir. Bazı durumlarda bu teknik donatıyı açığa çıkarmak için bir kısım betonun alınmasını gerektirebilir. Donatı çeliği voltmetrenin pozitif kutbuna elektriksel olarak bağlanır. Kılavuz kablonun bir ucu yarı hücreye ve aynı kablonun diğer ucu voltmetrenin negatif kutbuna bağlanır.

Bazı koşullarda ölçümlerden önce beton yüzeyi devrenin elektriksel direncini düşürmek için elektriksel temas çözeltisi ile nemlendirilmesi gerekebilir. Burada önemli olan doğru ölçümler alabilmek için devrenin kararlı durumda olmasıdır. Hatalı okumalara sebep olan dalgalanmaları engellemek amacıyla, ölçüm yapılacak yüzey sprej şeklinde, serbest yüzey suyu kalmadan nemlendirilmelidir.

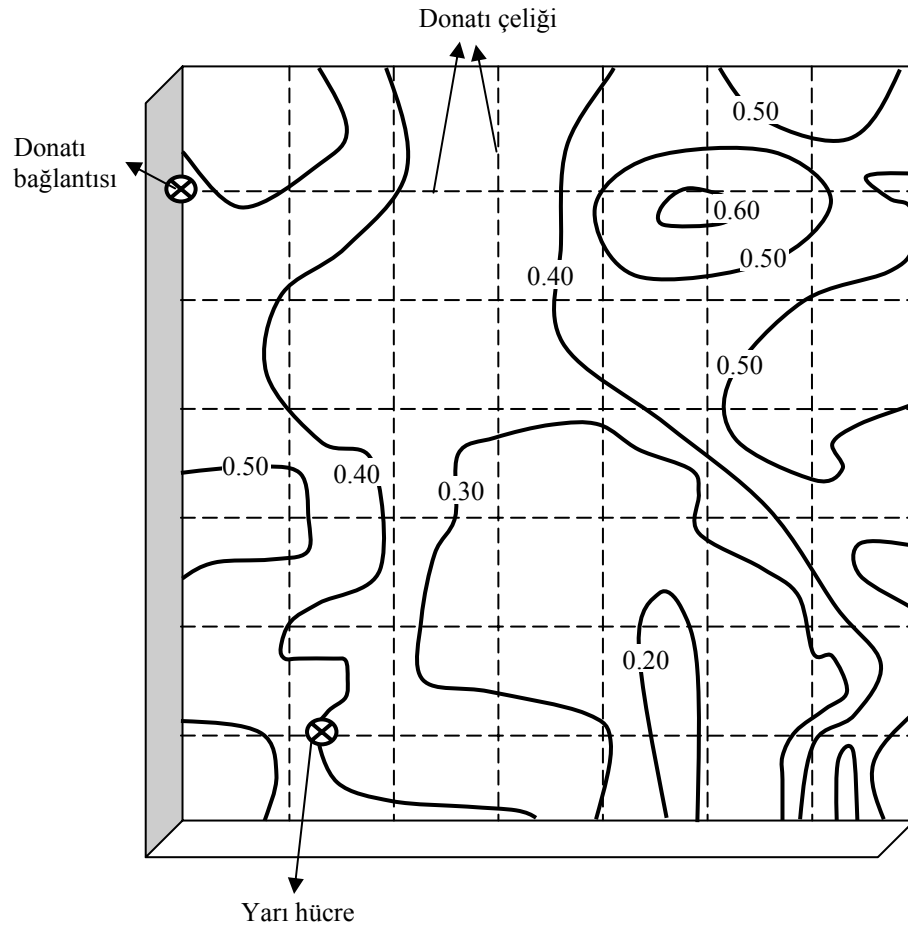
Potansiyel okumaları kaydedildikten sonra normal olmayan okumalar değerlendirilmelidir. Negatif yönde en büyük değerlerin okunduğu bölgelerde korozyon izleri ve korozyonun nedenleri araştırılmalıdır.

Potansiyel ölçümleri korozyon aktivitesini tespit eder ancak, korozyon aktivitesinin net yeri bu yöntemle bulunamaz. Korozyon aktivitesinin yerinin hassas olarak bulunması, yarı hücre ile korozyona uğrayan çelik arasındaki malzemenin elektriksel rezistansının bilinmesini gerektirir. Özellikle tuzlu su ortamlarında korozyon bölgesinin hassas tespiti genellikle mümkün değildir. Ancak okumaların büyüklüğü aktif korozyon oluşup oluşmadığını gösterir. Özellikle su altı ölçümleri sırasında yarı hücrenin kirlenmemesi, bakır-bakır sülfat elektrodu yarı hücresinin poroz başlığı dışında herhangi bir parçanın su ile temas etmemesi konusunda dikkatli olunmalıdır. Yatay ve düşey ölçümlerde dikkat edilecek diğer bir durum, yarı hücredeki bakır sülfat çözeltisinin sürekli olarak poroz tıpa ve bakır çubuk ile her zaman elektriksel temasta olması zorunluluğudur.

Yarı hücre potansiyeli ölçüm değerleri 0,01 V yaklaşıklıkla kaydedilmeli ve eğer ölçüm sıcaklıkları $22 \pm 5,5$ °C aralığı dışında ise mutlaka sıcaklık düzeltmesi yapılmalıdır.

Ölçüm sonuçları Eş Potansiyel Eğri Haritası veya Kümülatif Frekans Diyagramı ile verilebilir.

Beton elemanın ölçeklenmiş plan görünümü üzerinde beton içindeki çeliği yarı hücre potansiyel değerlerinin yerleri işaretlenerek, eşit veya interpolate edilmiş noktalar boyunca eşdeğer potansiyel eğrileri çizilir. En çok eğri aralığı 0,10 V olmalıdır. Şekil 4.7’de bir örnek gösterilmiştir.

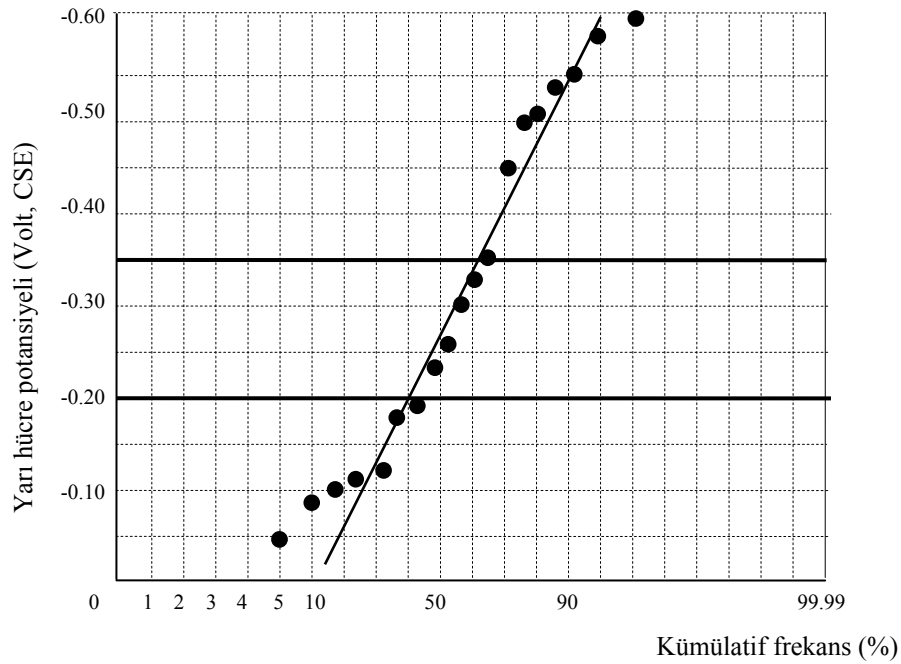


Şekil 4.7 Eş potansiyel haritası.

Kümülatif frekans dağılımı yönteminde ise, en küçük negatif potansiyelden en büyük negatif potansiyele doğru sıralanmış değerlerin aşağıdaki Denklem 4.2 ile uyumlu olarak normal olasılık kağıdı üzerine işaretlemesi yapılır.

$$f_x = \frac{r}{\Sigma n + 1} \times 100 \quad (4.2)$$

Burada, f_x işaretleme pozisyonu (%), Σn toplam gözlem sayısı, r yarı hücre potansiyelinin rankını ifade etmektedir. Düşey ekseninde yarı hücre potansiyeli (Volt), yatay ekseninde kümülatif frekans (%) olmak üzere veri çiftleri olasılık grafiğine işlenir. Noktalardan en uygun şekilde geçen doğru çizilir. Şekil 4.8’de örnek bir dağılım gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Kümülatif frekans dağılımı.

Yarı hücre ölçümlerinden bulunan açık devre potansiyelleri çelik korozyonunun termodinamik koşullarını temsil etmektedir. Potansiyel değerine göre korozyon durumu aşağıdaki Tablo 4.2’de özetlenmiştir (ASTM C876). Farklı ölçüm elektrotları kullanılması durumunda değerlendirme Tablo 4.3’e göre yapılabilir.

Tablo 4.2 Yarı hücre potansiyeli değerlerine göre korozyon olasılıkları

Yarı hücre potansiyeli		Korozyon aktivitesi
CSE*	SCE**	
-200 mV'dan daha pozitif	-120 mV'dan daha pozitif	% 90'dan daha büyük olasılıkla korozyon yok
-200 ile -350 mV aralığı	-120 ile -270 mV aralığı	Belirsiz bölge
-350 mV'dan daha negatif	-270 mV'dan daha negatif	% 90'dan daha büyük olasılıkla aktif korozyon

* Bakır/bakır sülfat elektrodu

** Doymun Kalomel elektrot

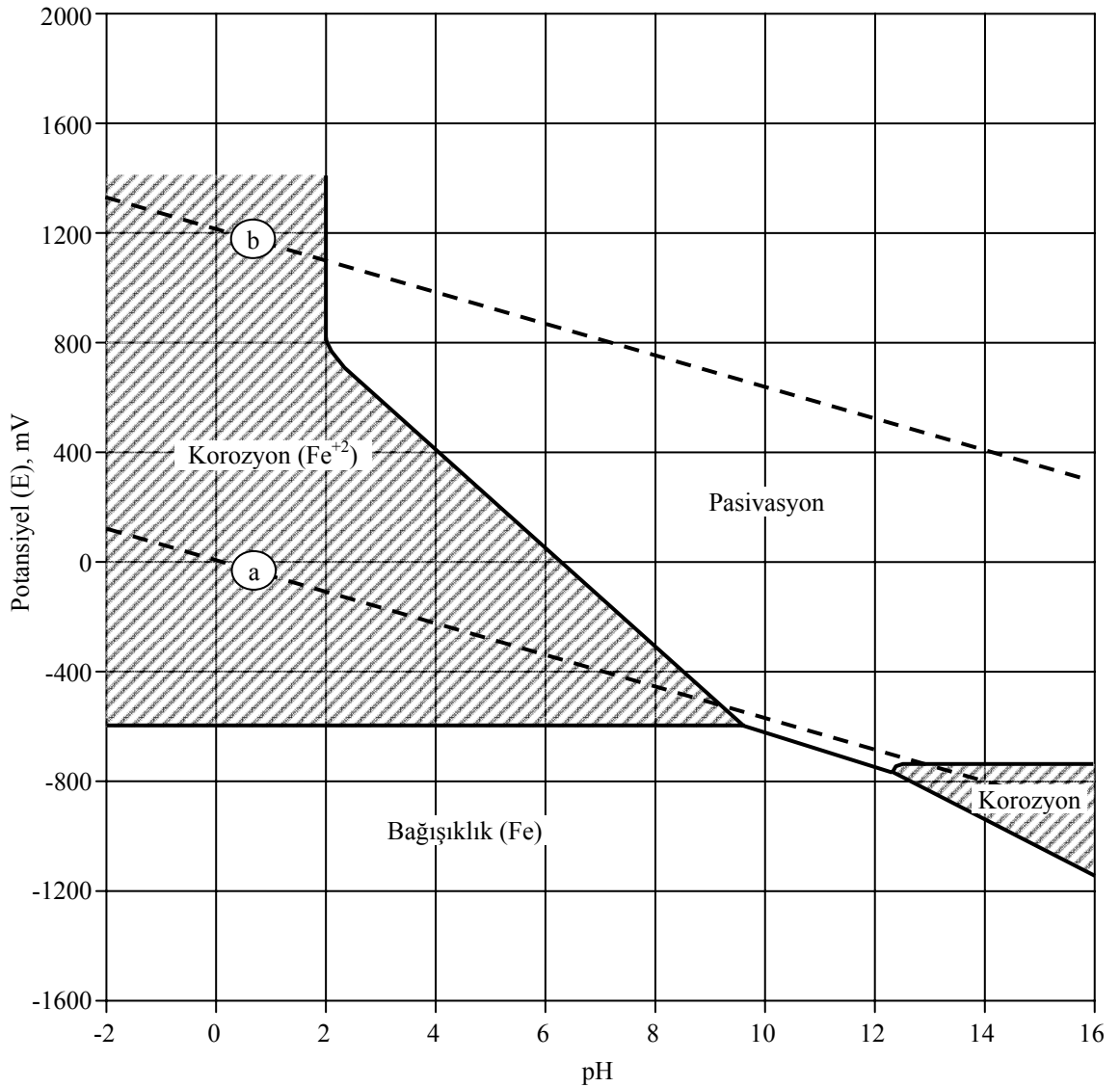
Tablo 4.3 Betondaki çeliğin korozyonu için farklı standart yarı hücelere göre korozyon durumları

Bakır/ bakır sülfat elektrodu	Gümüş/ gümüş klorid elektrodu	Standart hidrojen elektrodu	Doymun Kalomel elektrot	Korozyon durumu
> -200 mV	> -106 mV	> +116 mV	> -126 mV	Düşük (%10 risk)
-200 -350 mV	-106 -256 mV	+116 -34 mV	-126 -276 mV	Orta
< -350	< -256	< -34	< -276	Yüksek (%90 risk)
< -500	< -406	< -184	< -426	Şiddetli korozyon

Yarı hücre potansiyeli değerlerinin sayısal büyüklüğü genellikle karbonatlaşmamış portland çimentosu harcı ya da betonuna gömülü çeliğin korozyonunun varlığı veya yokluğunun tespitini sağlar. Ölçüm yapılan noktada yarı hücrenin ucundaki çeliğin, bazı özel şartlar dışında, korozyon hızını belirtmez. Betonun suya doymun olup olmadığı, paspayı tabakasının ne kadar karbonatlaştığı, çeliğin kaplanmış olup olmadığı, gibi birçok koşul altında yarı hücre potansiyeli değerleri değişkenlik gösterir. Örneğin, klorid konsantrasyonunun artması anotta

demir iyonu konsantrasyonunu düşürebilir. Dolayısıyla potansiyeli azaltır (daha negatif yapar). Ancak bu durum korozyon hızının fazla olduğu, ya da korozyon reaksiyonunun gerçekleştiği şeklinde yorumlanamaz. Sonuçların yorumlanması tecrübe ve uzmanlık gerektirir. Böyle durumlarda karbonatlaşma ve kaplama gibi faktörlerin ayrıca analiz edilmesi gerekmektedir.

Metalürjik açıdan bakıldığında, değişen potansiyel ve pH değerlerine göre metallerin korozyon performansları belirlidir. Bu grafikler Pourbaix diyagramları olarak bilinir ve çeşitli metal türleri için bu diyagramlar hazırlanmıştır (ASM Metals Handbook). Demir için potansiyel-pH diyagramı Şekil 4.9'da verilmektedir.



Şekil 4.9 Demir için potansiyel-pH diyagramı.

4.2.4 Karbonatlaşma Derinliği Ölçümleri

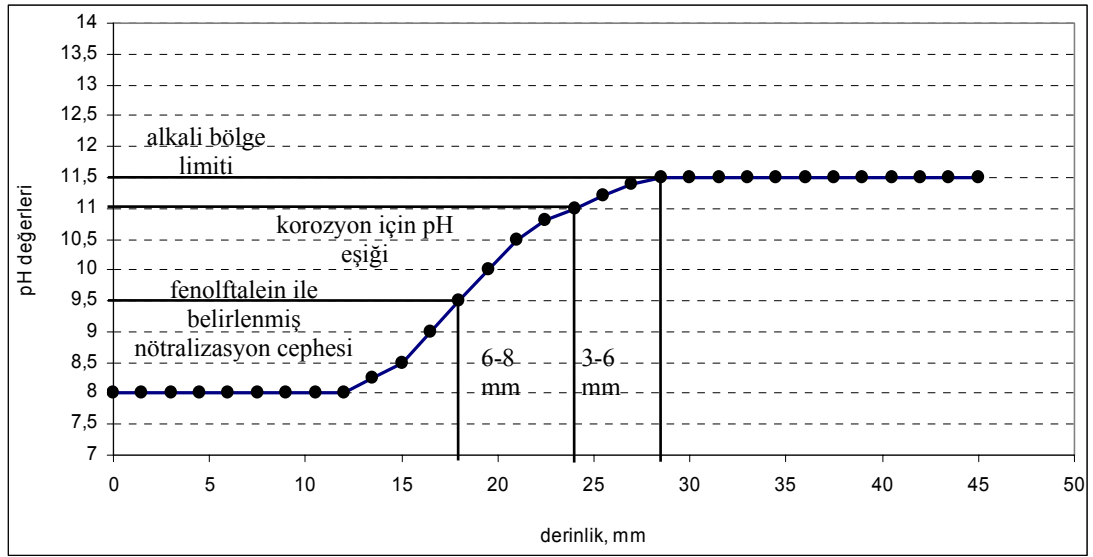
Bölüm 3'te anlatıldığı gibi karbonatlaşma olayı donatı korozyonunun önemli sebeplerinden biri olduğu için, yapılarda inceleme yapılırken bu olay da detaylı olarak araştırılmalıdır. Karbonatlaşma cephesinin paspayını aşmış donatıya ulaşması halinde, kararlı hali bozulan çelik korozyon eğilimindedir.

Karbonatlaşma olayının varlığı basit bir yöntem ile tespit edilebilir. Beton yüzeyine bir indikatör sıvı püskürtülerek renk değişimi gözlemlenir. Daha sonra karbonatlaşma derinliği paspayı ile karşılaştırılır. Böylece karbonatlaşma derinliğinin o ana kadarki gelişimi, karbonatlaşma hızı ve gelecekteki ulaşacağı nokta hakkında bilgi edinilir.

Beton elemanda delik açılarak veya betondan karot alınıp, karotu yarmak veya kesmek sureti ile beton yüzey elde edilir. İndikatör çözelti (fenolftalein) püskürtülerek renk değişimi gözlemlenir. İndikatör sıvı karbonatlaşmanın gerçekleştiği bölgede aynen kalırken, henüz karbonatlaşmamış alkali betonda pembe renk alır. Timolftalein, Alizarin sarısı gibi diğer indikatör sıvılar da kullanılsa bile fenolftalein en yaygın olarak ve en güvenilir indikatör olmaktadır.

Karbonatlaşma derinliğinin ortalama ve standart sapma değerleri ortalama paspayı kalınlığı ile karşılaştırılarak, donatıların ne kadarında pasif durumun bozulmuş olduğu belirlenebilir. Eğer karbonatlaşma hızı belirlenirse zamanla donatıların korozyon açısından aktifleşme süreci belirlenebilir.

Fenolftalein çözeltisi pH=9'da renk değiştirir. Donatı ise pH'ın 10-11 değerlerinde pasifliğini kaybeder. Karbonatlaşma cephesi donatıya 5-10 mm uzaklıktayken bile donatı pasif durumunu kaybedebilir (Şekil 4.10). Bu durum karbonatlaşma cephesinin tespit edilmesinde ve donatının durumunun değerlendirilmesinde dikkate alınmalıdır.

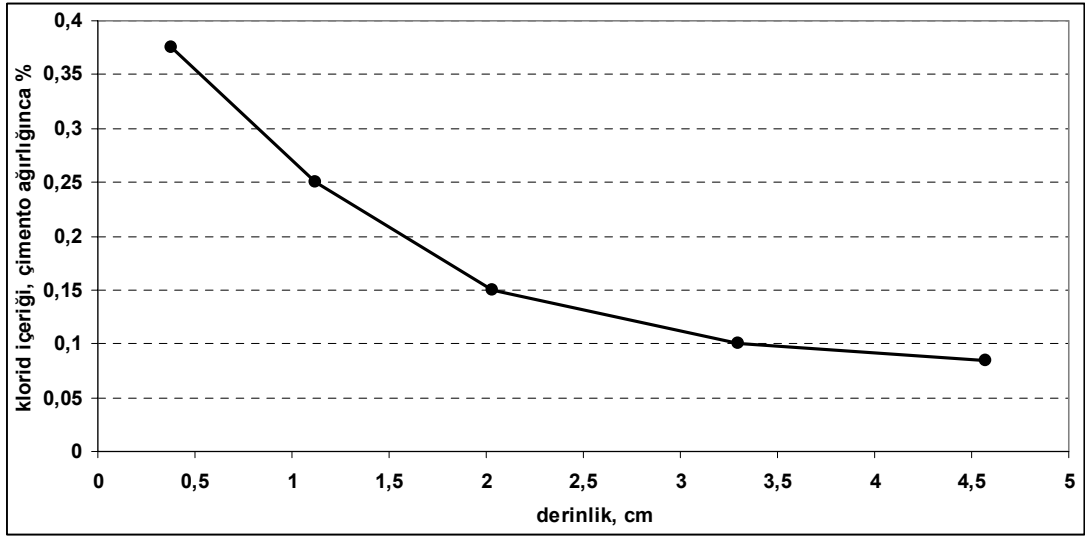


Şekil 4.10 Beton pH değerinin derinlik ile değişimi (Broomfiel 2003).

Bazı agregalar, fenolftalein ile yapılan ölçümlerde karmaşık sonuçlar verebilir. Rengi koyu olan betonlarda ise renk değişikliğini gözlemek zor olabilir. Ölçümden önce yüzeyin temiz olmasına ve deneyden önce başka sebeplerle karbonatlaşmamasına dikkat edilmelidir. Çok yüksek pH değerlerinde fenolftaleinin betonu beyazlatma etkisi olabilir. Renk değişimi için birkaç saat beklenmesi gerekebilir. Zemin altı yapılarda, karbonatlaşmanın zemin suyundan kaynaklandığı durumlarda ise, atmosferik karbonatlaşmada olduğu gibi keskin bir karbonatlaşma cephesi görülmeyebilir.

4.2.5 Klorid Ölçümleri

Yapıdan alınan toz ya da kırık beton numunelerinde klorid miktarlarının belirlenmesi donatıda korozyon gelişimi açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Değişik derinliklerden elde edilen numuneler korozyon profilinin belirlenmesinde yararlı olmaktadır. Karbonatlaşmada olduğu gibi, paspayı ve betonda klorid profilinin belirlenmesi ile hangi donatıların aktif korozyon durumunda hangilerinin ise kararlı pasif halinde olduğu ortaya çıkarılmış olur. Ayrıca klorid profili ile difüzyon katsayısı ve penetrasyon hızı belirlenebilir. Yüzeyden itibaren değişik derinliklerde klorid içeriği belirlendiğinde Şekil 4.11'deki gibi bir profil elde edilmiş olur.



Şekil 4.11 Betonda klorür içeriğinin yüzeyden itibaren değişimi (Broomfield 2003).

Donatı etrafındaki klorid mertebesi var olan korozyonun miktarı hakkında bilgi verirken, klorid profili ise penetrasyon hızını ve gelecekteki korozyon hızını belirleyecektir.

Klorid içeriği çeşitli metotlarla belirlenebilir. Laboratuarda toz haline getirilmiş numuneler asitte çözülür ve daha sonra geleneksel kimyasal yöntem ile konsantrasyonunun bulunması için titrasyon yapılır. Sahada ise klorid ölçümleri için özel şeritler ve özel iyon elektrotları kullanılmaktadır.

Test sonuçları toplam klorid içeriği ve asitte çözülebilir klorid içeriği olarak verilebilir. Serbest klorid içeriği veya suda çözülebilir klorid içeriği tayini için de yöntemler vardır. Beton boşluk suyunda çözünebilen klor iyonları korozyon sürecine katkıda bulunurlar. Çimento hamurunda kimyasal olarak bağlı kloridler (örneğin kloroalüminatlar) veya agregada bağlı olarak bulunan arka plandaki kloridler korozyon için klor eşik değerinde etkin değildirler.

Klor iyonları Bölüm 3.4.6'da anlatıldığı gibi beton bileşenlerinden kaynaklanabileceği gibi, çevreden de beton bünyesine taşınabilirler. Donatı etrafında önemli bir pH düşmesi olmasa bile, çelik yüzeyindeki pasif tabakaya saldırırlar.

Katalizör görevi yapan klor iyonları reaksiyonlarda tüketilmez. Çelik yüzeyindeki pasif oksit tabakanın kırılmasına yardımcı olarak korozyon prosesinin hızlanmasına sebep olurlar.

Betondaki klor iyonlarının test edilmesi ile;

- Korozyona sebep olacak klor iyonu konsantrasyonunun eşik değere ulaşip ulaşmadığı belirlenmiş olur. Tipik olarak çimento ağırlığına göre %0,4'den daha fazla klor içeren betonlar korozyon açısından risk altındadır.
- Klor iyonlarının beton bileşenlerinden kaynaklandığı ya da çevresel ortamdan beton içine girdiği belirlenir. Klorid profili yüzeyden itibaren azalan bir eğilimde ise, çevre kaynaklı klor iyonlarından söz edilebilirken, rastgele veya azalıp artan bir profil varsa klor iyonlarının beton bileşenlerinden kaynaklandığı söylenebilir.

Hausmann1967, korozyon için betondaki klorid/hidroksit oranına göre iyi bilinen bir klorid eşik değerinden söz etmiştir. Bu oranın 0,6 değerini aşması durumunda pasif tabaka kırılacaktır. Çimento ağırlığına %0,2–0,4 veya beton ağırlığına göre %0,05 klor içeriği bu eşik değere tekabül etmektedir (Broomfield 2003).

4.2.6 Direnç Ölçümleri

Korozyon elektrokimyasal bir olgu olduğundan, korozyonun oluşması için anottan katoda iyonik akım gerçekleşmelidir. Betonun elektriksel direnci bu iyonik akımı etkilediğinden, korozyon hızı üzerinde etkili bir parametredir. Çeliğin pasifliğini kaybettiği durumda, beton direnci ölçümleri korozyon aktivitesi hakkında bilgi verir.

Betonun elektriksel direnci dört problu sistemlerle ölçülebilir (Şekil 4.12). En dıştaki iki prob arasında akım uygulanırken içteki iki prob arasında potansiyel farkı ölçülür. Bu yaklaşım ile yüzey temas dirençlerinden kaynaklanan etkiler elimine edilir.



Şekil 4.12 Betonda direnç ölçümü.

Yarı-sonsuz, homojen bir malzemede elektriksel direnç şu formülle ifade edilir (Denklem 4.3):

$$\rho = 2\pi aV / I \quad (4.3)$$

Burada; a elektrot aralığı, I dış problar arasında uygulanan akım ve V iç problar arasında ölçülen potansiyeldir.

Daha ucuz iki elektrotlu sistemler de vardır ancak bunların hassasiyeti düşüktür. Yüzeyle tek elektrot ve donatı ağını kullanan yeni bir yaklaşımla paspayının elektriksel direnci ölçülebilir. Bu aynı zamanda korozyon hızını ölçme yönteminin bir parçasıdır. Pas payının rezistivitesini ölçmesi yöntemin avantajı olmakla beraber, temas direncinden kaynaklanan problemler mevcuttur.

Elektriksel rezistivite boşluklardaki nem miktarının ile boşlukların boyut ve bağlantısının bir göstergesidir. Çimento miktarı, su/çimento oranı, kür ve kullanılan katkılardan dolayısıyla beton kalitesinden oldukça etkilenir. Klorid mertebesi rezistiviteyi doğrudan etkilemez. Boşluk suyunda çözünen iyonların çokluğu sebebi ile birkaç fazla iyonun bulunması fark yaratmayacaktır. Ancak, betondaki klor iyonları higroskopik olduğundan betonun su tutmasına sebep olurlar. Kloridlerin betonun rezistivitesini azaltmasının sebebi budur.

Dört problu sistem ile elde edilen rezistivite ölçümleri şu şekilde değerlendirilir (Broomfield, 2003):

- $>20 \text{ k}\Omega\text{cm}$ düşük korozyon hızı,
- $10\text{--}20 \text{ k}\Omega\text{cm}$ düşük-orta korozyon hızı
- $5\text{--}10 \text{ k}\Omega\text{cm}$ yüksek korozyon hızı
- $<5 \text{ k}\Omega\text{cm}$ çok yüksek korozyon hızı

İki elektrotlu sistem ve lineer polarizasyon yöntemi ile çalışan araştırmacılar rezistivite ile korozyon hızı arasında aşağıdaki ilişkiyi kurmuştur(Andreade, Alonso, 1996):

- $>100 \text{ k}\Omega\text{cm}$ aktif ve pasif çelik ayırt edilemez
- $50\text{--}100 \text{ k}\Omega\text{cm}$ düşük korozyon hızı
- $10\text{--}50 \text{ k}\Omega\text{cm}$ çeliğin aktif olduğu orta-yüksek korozyon hızı
- $<10 \text{ k}\Omega\text{cm}$ korozyonu kontrol eden parametre rezistivite değildir.

Beton rezistivitesi ve yarı hücre potansiyeli kullanılarak korozyon akımına veya korozyon hızına geçmek tamamen yanlış bir yöntemdir. Korozyon hızı, çelik ile betonun arayüzey direnci kullanılarak belirlenebilir. Yarı hücre ile ölçülen potansiyel çelik yüzeyindeki potansiyel değildir. Laboratuvarında beton rezistivitesi, yarı hücre potansiyeli ve korozyon hızı arasında bazı ilişkiler bulunabilir. Ancak, gerçek dünyadaki değişkenlikler düşünüldüğünde bu ilişkiler rastlantısal olmaktadır.

Rezistivite ölçümlerinde çelik donatı kısa devre oluşturarak ölçümleri etkileyebilmektedir. Ancak, kullanılacak probun doğru yerde ve açıda olması ile bu etki minimuma indirilebilir.

Rezistivite beton tarafından korozyona izin verilen kapasiteyi belirtmektedir. Korozyonun devam ettiği ya da tam kapasitenin kullanıldığı konusunda bilgi vermez.

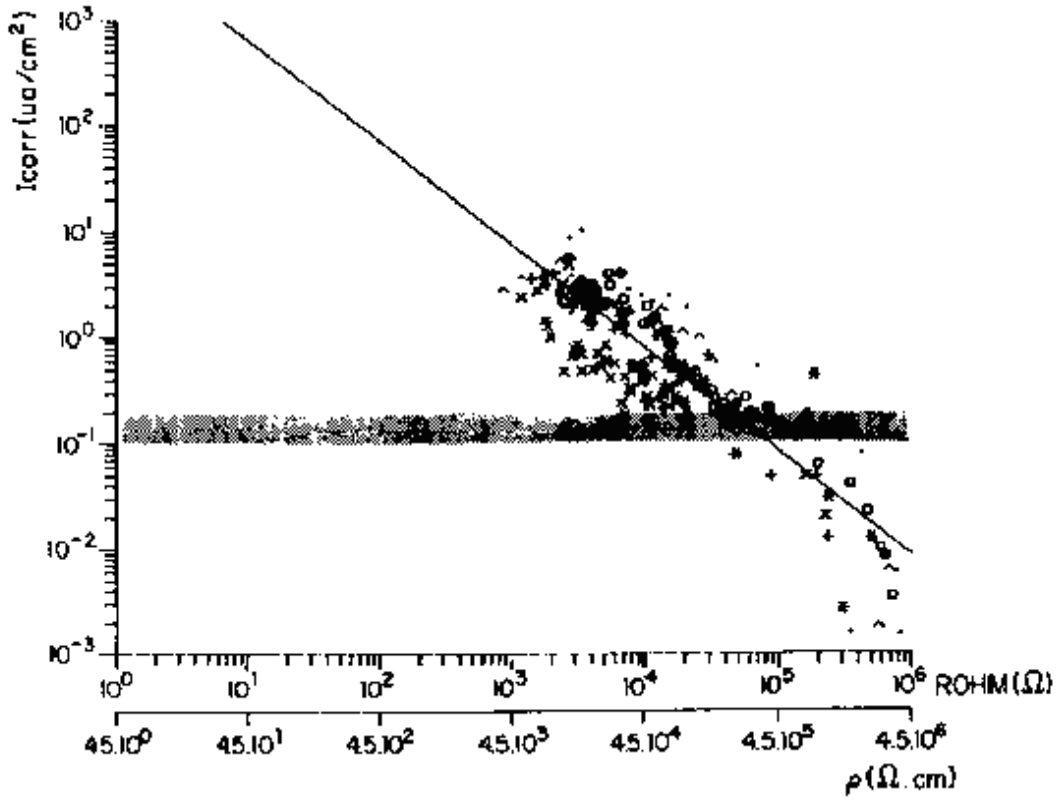
Rezistivite hesaplarında beton homojen bir malzeme olarak kabul edilir. Agregalardan ve donatı açısından kaynaklanan sistematik hatalar prob yerinin ve

aralıklarının düzenlenmesi ile minimize edilebilir. Karbonatlaşmış tabakadan veya dışarıdan emilmiş sudan kaynaklanacak heterojenlikler ölçümleri etkilemektedir.

Gerek çelik gerekse beton direnci, donatının I_{corr} değerleri ile ilişkilendirilmeye çalışılmıştır.

Beton gömülü donatıların ince metal kesitlerinin elektriksel direnci ölçümleri durumunda bu metot, korozyon oluştuğunda çelik kesit alanının azalması ile birlikte elektriksel dirençte artışın kuralı üzerine kurulmuştur. Dirençteki çok küçük değişiklikleri doğrudan izlemek zor olduğundan, örnekler iki kollu AC köprü ağı şeklinde özel problemlerdir. Bu teknik, toplam korozyon hızlarını ölçer. Gerçekçi verilerin elde edilmesinin zorluğundan dolayı bu metot seyrek kullanılır.

Daha sık kullanılan yöntem beton direnci ile I_{corr} değerlerinin ilişkilendirilmesidir. Aktif korozyon gerçekleştiğinde bu iki değişkenin orantılı olduğu kabulüne dayanır. Eğer çelik pasif ise dirençteki farklar önemsizdir. Karbonatlaşmış harcın dinamik direnci ve I_{corr} arasında bulunan ilişki Şekil 4.13'te görülmektedir (Andreade ve Alonso 1996). Bulunan değerlerin dağılımı tek bir direnç değerinden I_{corr} değerinin çıkarımını hükümsüz kılmaktadır.

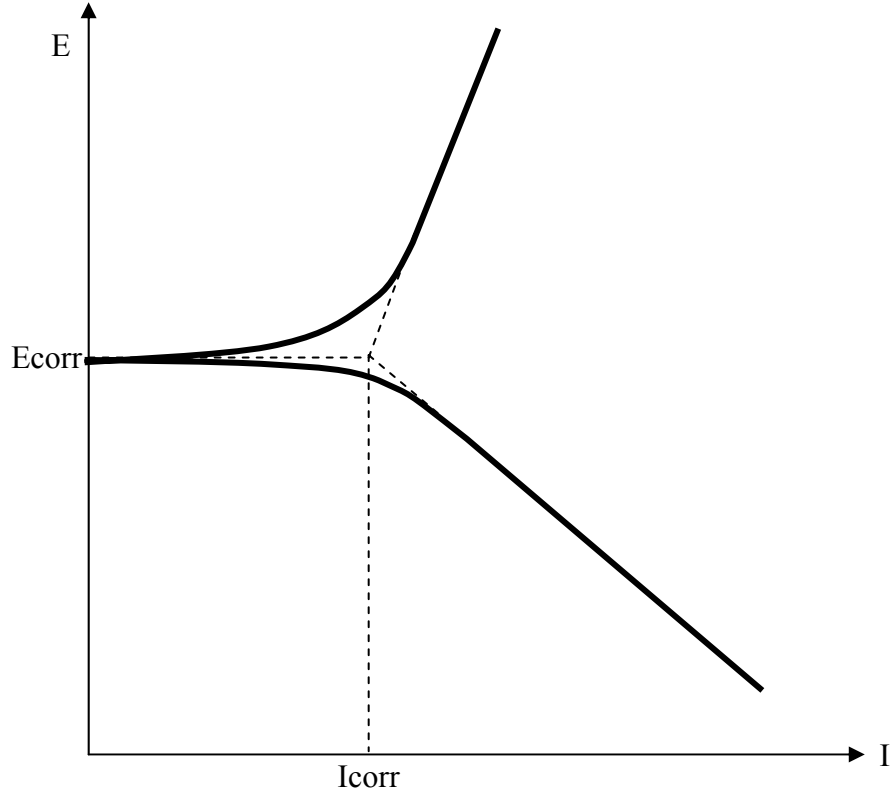


Şekil 4.13 I_{corr} değerinin elektriksel direnç ile ilişkisi (farklı tip çimentolar ile üretilmiş karbonatlaşmış harçlarda).

Kloritlerin varlığı durumunda, I_{corr} ve direnç arasında bulunan ilişki iki anlama gelebilir. Çünkü bu durum aynı zamanda Cl^-/OH^- oranına da bağlıdır. Eğimi -1'den daha küçük doğrusal çizgiler bulunabilir.

4.2.7 Polarizasyon

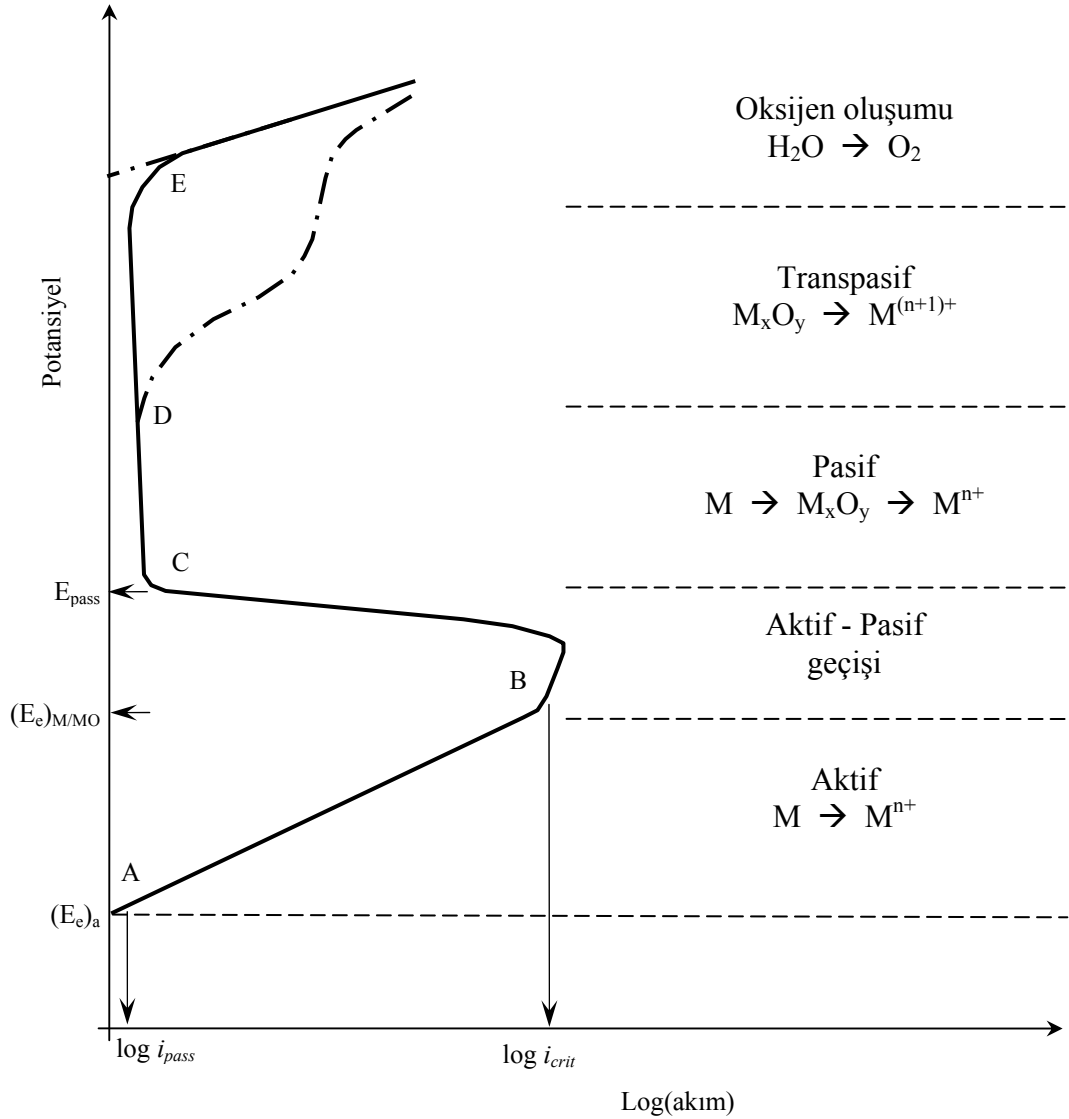
I_{corr} değerlerini ölçmek için kullanılan ilk elektrokimyasal teknik, polarizasyon eğrilerinde “intersection method” kesitler arası yöntem idi. Bu yöntem polarizasyon eğrisinin katodik ve anodik dallarının E_{corr} değerleri için ekstrapolasyonuna dayanır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Polarizasyon eğrisinin anodik ve katodik kollarının ekstrapolasyonu ile hesaplanmış korozyon yoğunluğu, I_{corr} .

Hasar veren bir yöntem olmasından dolayı kullanımı çok sınırlıdır. Anodik kolun polarizasyonu sırasında oluşan bozulmalar nedeniyle, her bir ölçüm için yeni çubuklara ihtiyaç vardır. Ancak, katkıların etkilerinin karakterizasyonu, gerilmeli korozyon kırılması hassaslığı veya katodik koruma için polarizasyon eğrilerinin kullanılması en etkili araçtır. Bu yöntemin ölçümleri, her deney için yeni bir örnek ve incelenen her potansiyelde direnç düşmesi için bir düzeltme kabul eder. Tarama hızı kendi başına önemli bir parametredir. Optimum değeri özel değişkenlere veya çalışılacak sisteme bağlıdır.

Aslında Şekil 4.14 bir metalin anodik polarizasyonunun çok küçük bir bölümünü göstermektedir. Geniş olarak bakıldığında polarizasyonun değişik evreleri ve bu evrelerde gelişen olaylar Şekil 4.15'de sunulmaktadır.

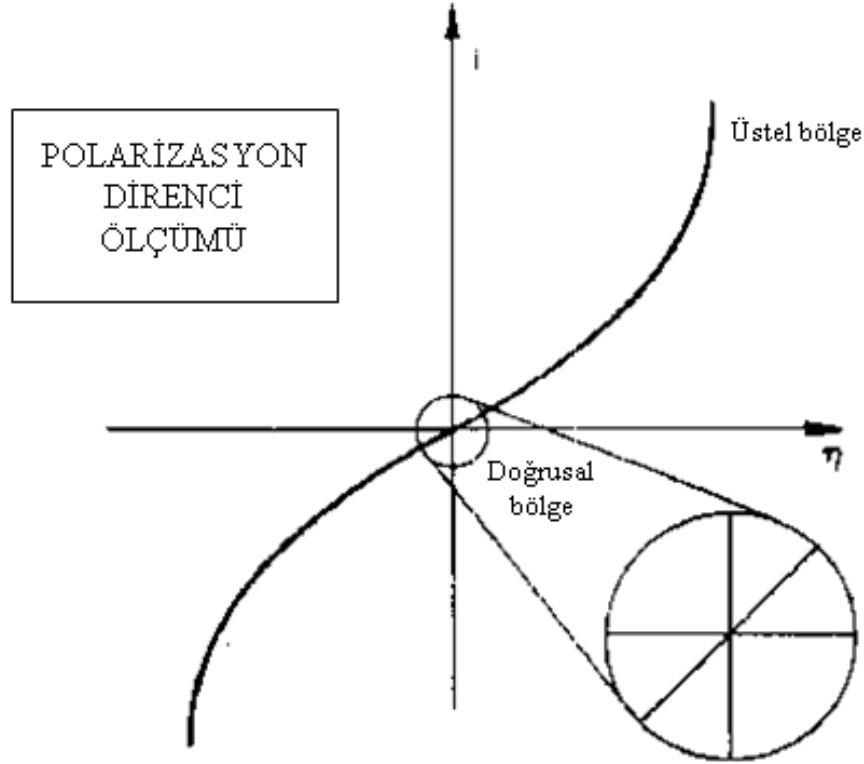


Şekil 4.15 Bir metal / metal iyon sistemi için aktiften pasife geçişte polarizasyon eğrisi (ASM Metals Handbook).

Korozyon potansiyeli civarında iken metalik malzemeye anodik yönde potansiyel uygulanırsa devreden geçen akım da artmaya başlar. Bu bölgede metal çözülmesi gerçekleşmekte olup anodik kolu barındırır. Pasif bölge başladığında ise akım aniden düşer ve bu potansiyel pasivasyon potansiyeli olarak tanımlanır. Pasif bölgede ($E > E_{pass}$) metal çözülmesi sabit bir hızda gerçekleşir. E noktasından daha büyük potansiyel değerlerinde ise oksit tabakası dışında oksijen oluşumu gerçekleşebilir. Kesikli çizgi ile gösterilen bölüm ise transpasif bölgeyi temsil etmektedir. Bu bölgede oksit tabakası çözülmeye başlar.

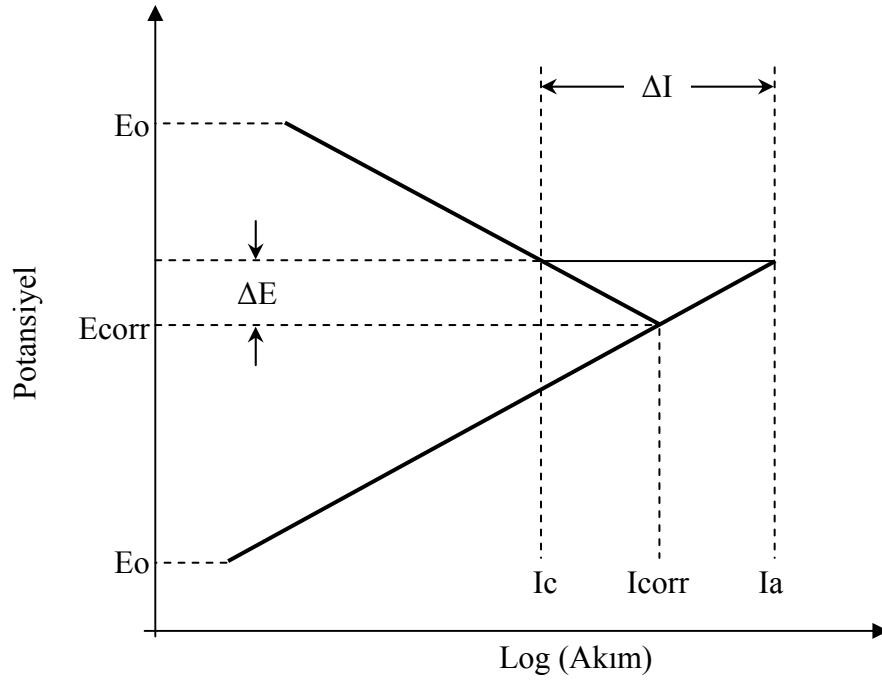
1957'de Stern'in konu üzerinde ilk yayınından sonra DC ile polarizasyon direnci tekniği, metalürji ve korozyon mühendisliğinde korozyon hızı belirleme ve izlemede en çok kullanılan yöntem haline gelmiştir.

Stern, Wagner ve Traud'un çalışması ile elektrokimyanın temel ilkeleri üzerinde çalışarak E_{corr} civarında polarizasyon eğrilerinin kayıtlarından korozyon hızı değerlerinin temellerini formüle etmiştir. Elektrokimyanın temeli hakkındaki detaylı bilgisi onun basit, hızlı ve hasarsız bir teknik geliştirmesine yardımcı olmuştur. Bunu, korozyon potansiyeli civarında, potansiyel ve akımın logaritmik ilişkisinin lineer davranışı yaklaşımı ile yapmıştır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Polarizasyon direnci, korozyon potansiyeli civarında polarizasyon eğrisinin eğimidir (Andreade ve Alonso 1996).

R_p tekniği (polarizasyon direnci tekniği) polarizasyon eğrisinin sadece E_{corr} civarında-yakınında doğrusal olması üzerine kuruludur (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Polarizasyon direncinin, R_p , bulunması.

Diğer bir deyişle, E_{corr} civarında polarizasyon eğrisinin eğimi $(\Delta E/\Delta I)$ 'dir. Bu ilişki Stern formülü olarak bilinir:

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta I} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (4.4)$$

R_p değerleri I_{corr} değerine bir sabit ile bağlıdır. Stern bu sabiti B ile simgelemiştir. Sonraki bir çalışmada birçok metal/elektrolit sistemi için B değerlerini bulmuştur. B değeri polarizasyon eğrilerinin Tafel sabitlerine bağlıdır. İncelenen çoğu sistem için 13 ile 52 mV arasında değişmektedir.

$$B = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \quad (4.5)$$

Burada β_a ve β_c sırasıyla anodik ve katodik Tafel sabitlerini göstermektedir.

Beton içine gömülü çelik için, aktif durumda (korozyon ilerlerken) $B=26$ mV bulunmuştur. Pasif çelik için $B=52$ mV daha uygundur. Bu B değerleri gravimetrik ve elektrokimyasal kayıplar arasındaki ilişkilerden tespit edilmiştir.

R_p ile I_{corr} değerlerini ilişkilendiren son ifade oldukça basittir:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (4.6)$$

Stern'in çalışması basitliğinden dolayı eleştirilmiştir. Sonraki yıllarda araştırmacılar karmaşıklığı arttıran ancak doğrulukta herhangi bir gelişme sağlamayan öneriler sunmuşlardır. Dolayısıyla metot ilk basit formülasyonu ile kalmıştır. Daha sonraki korozyon çalışmalarında kullanılan elektrokimyasal teknikler ile yapılan deneylerdeki hızlı gelişmenin temeli olmuştur. Beton için ilk uygulama 1970'lerin başlarında yapılmıştır.

Uygulaması ile ilişkili olarak üç ana husus göz önünde bulundurulmalıdır:

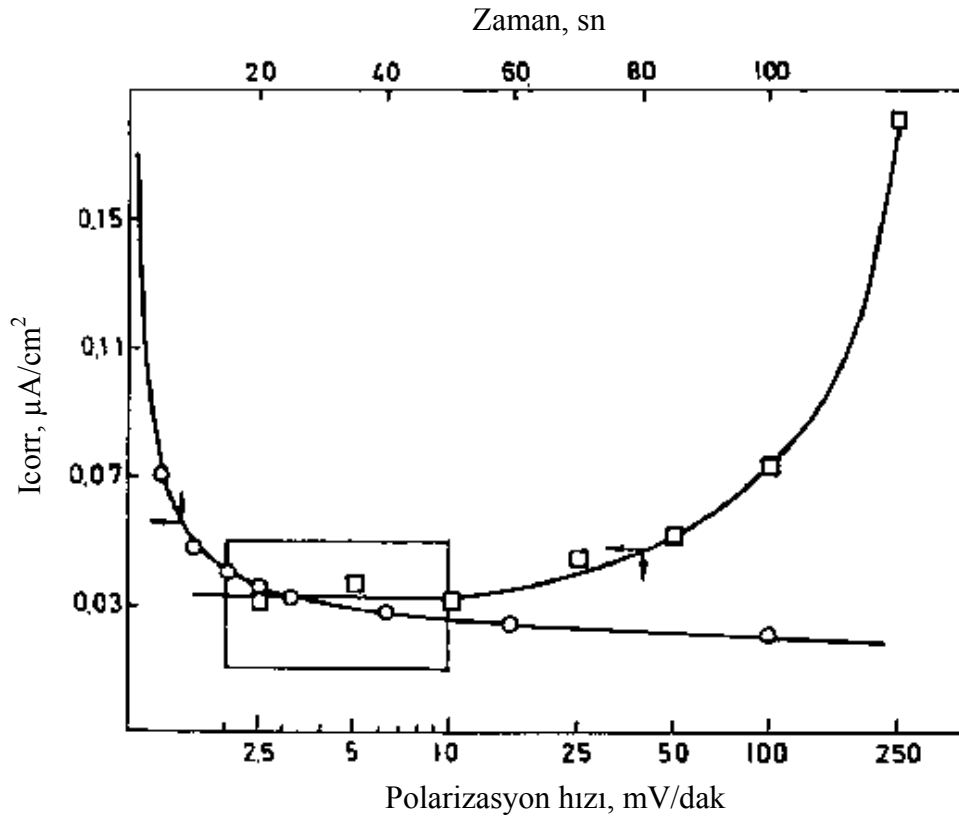
- a- Çalışma ve referans elektrotları arasındaki ohmik düşüşü karşılama ihtiyacı,
- b- Doğrusallık şartı,
- c- Sabit bir değere ulaşma gereksinimi.

Beton içine gömülü çelik için bu üç konu kapsamlı olarak tartışılmıştır (Gonzales ve diğ. 1985):

Ohmik düşüş (a) ile ilgili olarak, modern potansiyostatların tümünde istenmeyen ohmik düşüşleri elimine etme seçeneği bulunmaktadır. Dolayısıyla artık bu bir problem değildir. Betonda IR düşmesinin karşılanması ihmal edilirse düşük I_{corr} değerlerine ulaşılır.

Beton için ilişkinin doğrusallığın incelenmesi (b) 20-30 mV civarındaki potansiyelerde yapılmıştır. Ancak, 100 mV gibi yüksek adımlarda da doğrusal gidişin korunduğu durumlar vardır. Bu özelliğe dayanarak metot “doğrusal polarizasyon” adını almıştır.

Sabit bir değere ulaşma gereksinimi (c) statik ölçümlerde yeterli uzunlukta bekleme zamanları veya dinamik ölçümlerde uygun tarama hızları ile karşılanabilir. Beton için 30 ve 100 s arasındaki bekleme süreleri veya 2,5–10 mV/d tarama hızlarının benzer ve uygun sonuçlar verdiği Şekil 4.18’de görülmektedir. Benzerlik gravimetrik kayıplarla karşılanarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.18 Statik olarak 20 ve 90 s arasındaki bekleme süreleri veya dinamik olarak 2,5–10 mV/d tarama hızlarından tespit edilmiş yeterli doğrulukta R_p değerleri.

R_p 'yi doğru akım ile ölçmek için gerekli araç göreceli olarak daha basittir. Potansiyel veya akımın tarama hızı modülü bulunan veya bulunmayan potansiyostatlar geniş olarak kullanılmaktadır. Statik veya dinamik modlardan hangisinin kullanıldığına bağlı olarak 30 s'den 2–5 dakikaya kadar süren bir değer kaydedilme zamanı nispeten kısadır.

I_{corr} değerlerini tespit etmek için kullanılan diğer yöntemlerin temeli R_p tekniğidir. Gerçekte, R_p değerini bulmada hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın Stern kuralı aynı işlevi görür.

4.2.8 Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS)

Temel elektrokimyada uzun süreden beri bilinmesine rağmen, alternatif akım sinyali kullanan elektrokimyasal teknikler korozyon biliminde kısa süredir yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu tekniği betonarme sistemine ilk uygulayan Dawson ve Wenger'dir (John, Searson ve Dawson 1981, Lemoine, Wenger ve Galland 1990).

Bu yöntem çalışma elektrodu olan donatıya doğru akım sinyali yerine alternatif akım sinyali uygulanmasına dayanır. Kullanılan araçlar daha karmaşıktır. Çünkü E_{corr} değerini korumak ve kayıt almak için gerekli potansiyostata ek olarak, alternatif akım sinyali uygulayan ve ölçen bir spektrum frekans analizatörüne ihtiyaç vardır.

Bu teknik, bir potansiyostat ile E_{corr} 'da korunan çalışma elektroduna geniş bir frekans aralığında, 10–20 mV gibi küçük genliklerde sinüsoidal voltaj uygulamasını içerir. Her frekanstaki tepki başka bir sinüs sinyalidir. Ancak genliği farklıdır ve giren sinyale göre faz farkı bulunmaktadır.

$\Delta E/\Delta I$ oranı bir Z impedansıdır ve bu da sinüsoidaldir. İki bileşen halinde incelenebilen formül aşağıda Denklem 4.7'de sunulmuştur. Birinci terim giriş sinyali ile aynı fazda olan direnç terimi ikincisi faz farkı 90° olan kapasite terimidir.

$$Z = R_e + [R_T / (1 + j \cdot \omega \cdot c \cdot R_T)] \quad (4.7)$$

Burada;

w: açısal frekans ($\omega = 2\pi f$)

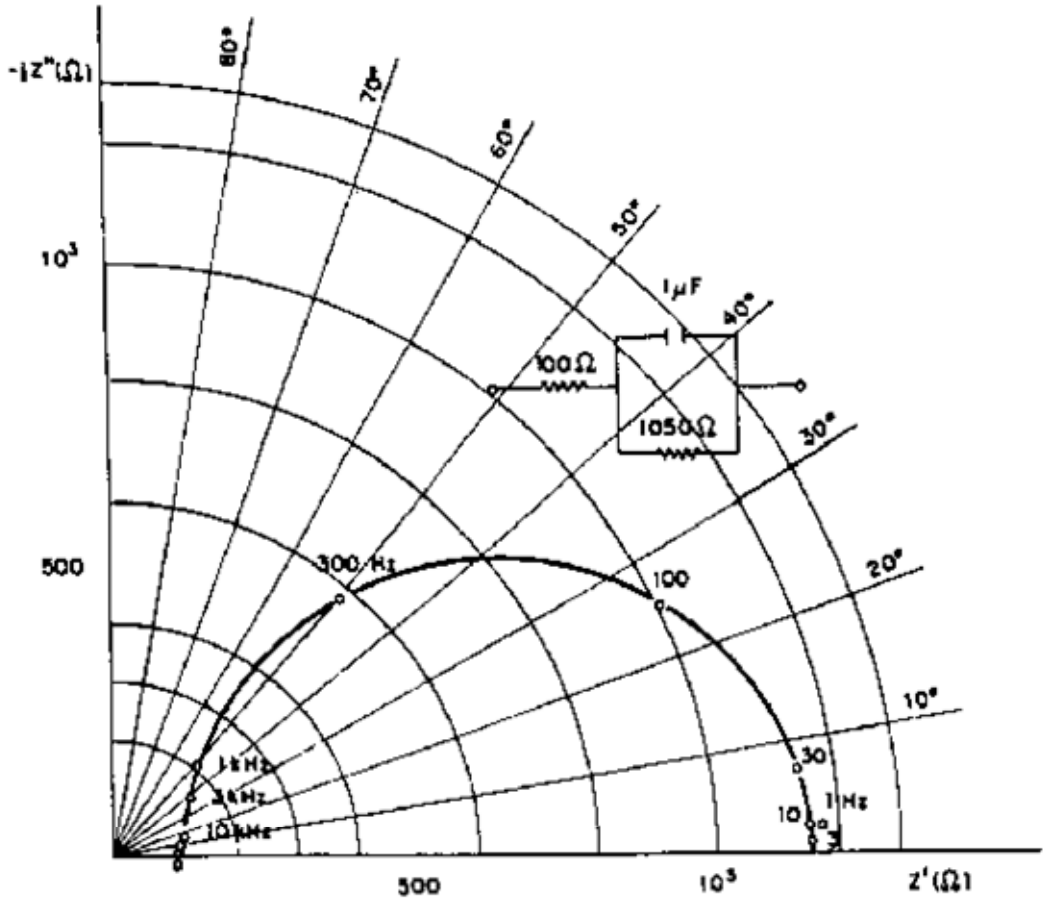
j: sanal birim ($j = \sqrt{-1}$)

R_e : elektrolit ohmik direnci

c: elektrot kapasitansı

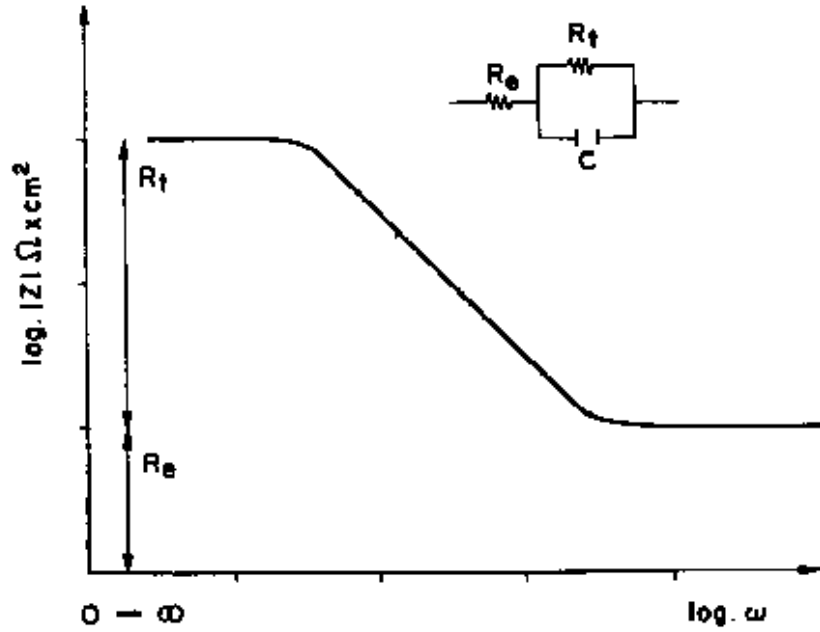
R_T : transfer direnci (R_p ile eşit kabul edilir).

Salt direnç davranışı durumu hariç Z frekansa bağlıdır ve metal-elektrolit ara yüzeyinin Randle'nin eşdeğer devresi ile modellendiği kabul edilir (Şekil 4.19). İmpedans vektörünün sonu bir yarım çember tanımlar. Bu diyagram genellikle "Nyquist diyagramı" adını alır. Yarım çemberin boyutlarından R_e , R_T ve c'nin hesabı mümkündür. R_e yüksek frekanslarda ($R_e + R_T$) düşük frekanslarda tespit edilir.



Şekil 4.19 Nyquist diyagramı.

İmpedans sonuçlarını vermenin bir diğer olası yolu, impedans modülü ve faz farkını frekansa bağlı olarak çizmektir (Şekil 4.20). Bu tipteki diyagramlar “Bode diyagramı” olarak bilinir.



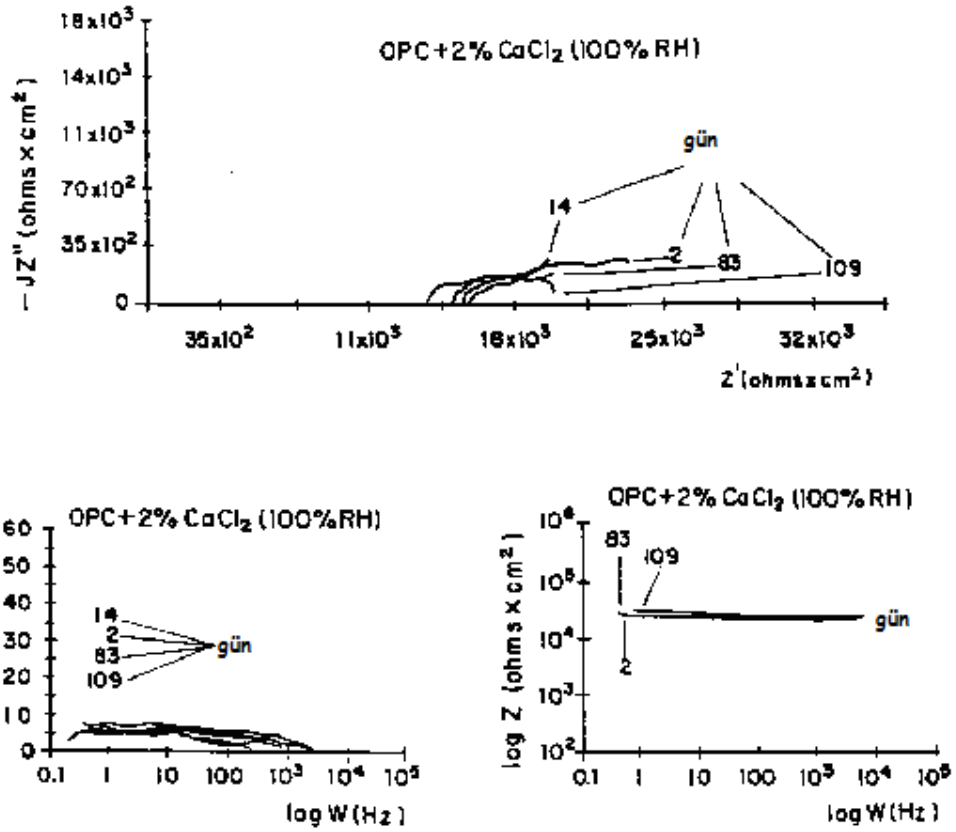
Şekil 4.20 Bode diyagramı.

Bu teknik kendi basit formülasyonu içerisinde oldukça işlevsel olabilir. Çünkü Stern formülü ile aynı olan korozyon hızı ile ilişkili R_T (R_P) değerlerini vermesine ek olarak;

- Korozyon prosesi,
- Betonun dielektrik özellikleri (yüksek frekans aralığında),
- Pasif film karakteristikleri (çok düşük frekanslarda)

konularında oldukça geniş bilgiler verebilir.

Ancak, yorumlanması kolay olmayan kompleks diyagramlar sebebiyle, bu yöntemin betona uygulanması önemli bir tartışmayı beraberinde getirir. Örnek olarak Şekil 4.21’de pasif ve korozyona uğrayan donatı çubuklarından elde edilen tipik sonuçlar verilmektedir. Düşük frekanslarda bulunan saf yarım çemberler nadirdir. İki veya daha fazla yarım çemberin çakışması veya tamamlanmamış olanlar oldukça fazladır.



Şekil 4.21 Karbonatlaşmış harçlara gömülü çelik çubukların farklı yaşlarda Nyquist ve Bode diyagramları.

Korozyon hızının ölçülmesi amacı göz önüne alındığında, R_p hesabı için AC tekniği kullanmanın dezavantajlarını vurgulamak gerekir. Kullanılan ekipmanın pahalı ve karmaşık olmasının yanı sıra, R_p değerinin bulunması için gerekli zaman da DC tekniklerine göre daha fazladır. Düşük korozyon hızlarında, 10⁻³ Hz veya daha düşük aralıklardaki frekanslara ulaşma zorunluluğundan ileri gelmektedir. Bir tek değer bulunması için birkaç saate gerek duyulur.

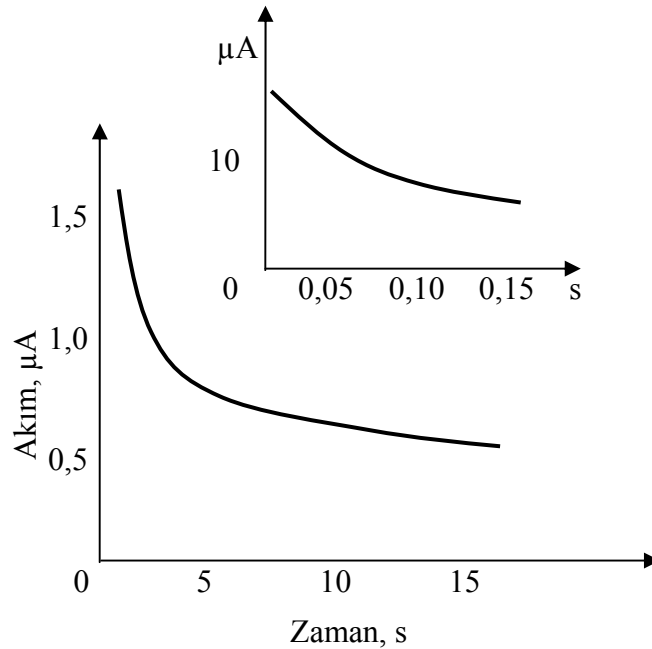
4.2.9 Galvanostatik Atım

Galvanostatik atım (galvanostatic pulse) tekniği, donatının yarı hücre potansiyeli ölçümlerine dayanan korozyon riski değerlendirmelerindeki problemlerin çözülmesi amacıyla, 1988' de saha uygulamaları için kullanılmıştır. Daha sonra da korozyon hızının sayısal analizlerinin yapılabilmesi için geliştirilmiştir. FORCE, ETH CH enstitüleri galvanostatik pulse tekniğine dayanan cihazlar geliştirmişlerdir.

Tasarımlarında farklılıklar olan bu cihazlar İsviçre’de art germeli bir köprünün karşılaştırmalı testlerinde kullanılmış. Test sonuçları, değerlendirmede karşıt elektrodun boyutları dikkate alındığında, iki cihazın aktif donatılarda aynı beton rezistivitesi ve aynı polarizasyon direncini verdiğini göstermiştir. Pasif donatılarda sonuçlar farklıdır, koruma çemberi (guard ring) olmayan cihaz dağınık bir akım sinyali göstermiştir (Elsener, Klinghoffer, Frolund, Rislund, Schiegg, Böhni, 1997).

DC ve AC teknikleri arasındaki benzerliğe dayanan geçici tepki (transient response, TR) analizi, metal/elektrolit sistemlerinin çalışmaları için uygulanmıştır ve donatı/beton ara yüzeyi için başlangıç çalışmaları yayınlanmıştır (Newton ve Sykes (1988) Dhouibi-Hachani, Raharinaivo, Triki ve Fiaud (1994) Elsener ve Böhni (1994))

Genelde TR metodu, ilk durağan olmayan periyot sırasında bir elektrodun voltaj veya akım sinyali uygulamasına karşı tepkisinin analizine dayanır (Şekil 4.22). Kaydedilen değerlerden R_e , c ve R_p hesaplanabilir.



Şekil 4.22 Betona gömülü bir çelik çubuğun 10 mV'luk bir etki uygulanmasından sonra tipik geçici tepkisi.

Çünkü elektriksel tepki, sinyal uygulamasından çok kısa bir süre sonra elde edilir. İlk yaklaşım için kütle transferi polarizasyonundan çıkan sonuç terim ihmal edilebilir ve dolayısıyla, elektrotta gerçekleşen değişmeler minimize edilebilir.

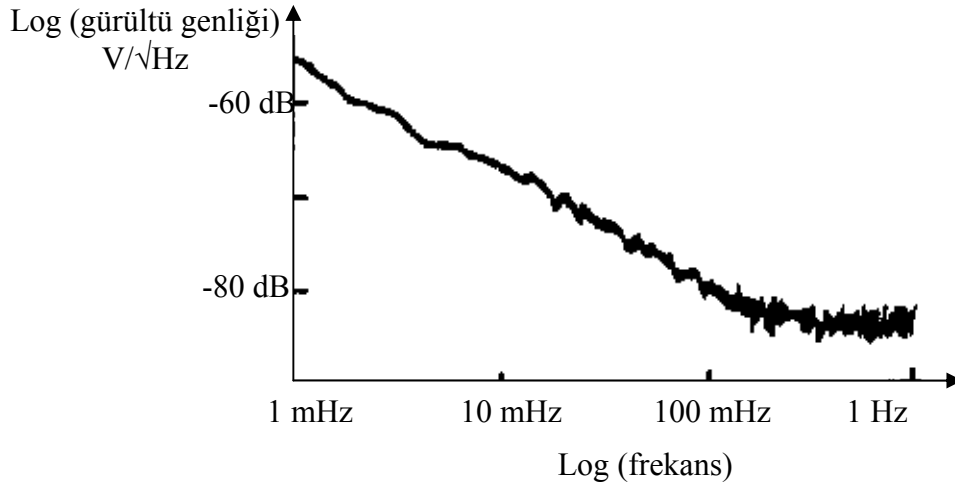
Bu teknikte esas zorluk AC tekniklerinde olduğu gibi elektriksel bir eşdeğer devre kabul edilmesi ihtiyacı ile ilgilidir. Daha önce sözü edildiği üzere, donatı-beton ara yüzeyi için gerçek eşdeğer modeller hala bulunamamıştır. Ancak, makul bir netlik ile Randle'nin devresi küçük örneklerin transient analizi için uygulanmıştır.

Gerekli araçlar, hızlı bir potansiyostat ve bir osiloskop veya çıkış sinyalini hızlı bir şekilde ölçebilen diğer ekipmanlardan oluşmaktadır.

4.2.10 Elektrokimyasal Gürültü

Bu teknik korozyon potansiyeli sırasında kaydedilen küçük voltaj veya akım değişimlerinin (mikrovolt mertebesinde) analizi üzerine kuruludur. Genelde çukurcuk oluşumu (pitting) prosesi ile ilgili deneylerde göz önüne alınır. Çok hassas ve net bir aygıtla dalgalanmalar kaydedildikten sonra, gürültü sinyali Fourier transformu ile zaman alanından frekans alanına dönüştürülür. Çizilecek genlik-frekans ilişkisine örnek Şekil 4.23'te verilmiştir (Dawson, Farrell, Aylolt & Hadky 1989).

Ölçümler için gerekli donanım bir mikrovoltmetre veya mikroampermetre ve spektrum analizatöründen oluşur. Çelik/beton sistemi için elektrokimyasal gürültü – I_{CORR} değerleri arasındaki ilişki hala net değildir.



Şekil 4.23 Betona gömülü bir çelik çubuğun elektrokimyasal 1/f gürültü dağılımı.

4.2.11 Galvanik Akım

Bu ölçüm tipi korozyon biliminde oldukça eskidir. Evans bu parametreyi ölçerek birçok deney gerçekleştirmiştir. Çelik/beton ara yüzeyi çalışmalarının başlarında da bu yöntem kullanılmıştır. Günümüzde I_{corr} değerlerinin bulunmasında çok kullanılır hale gelmiştir. Ancak hatalı sonuçlar verebilmektedir. Pasif çelik parçası ile korozyona uğrayan parça arasında galvanik akım ölçümü mümkündür. Böylece bu I_{galv} değerinin kinetik değerlendirmede kullanımı fikri gelişmiştir.

Ancak, bu uygulama risklidir, çünkü genellikle $I_{\text{corr}} \gg I_{\text{galv}}$ 'dir. Dolayısıyla makro hücre çalışmalarından çıkarılan sonuçların değerlendirilmesi hatalı olabilmektedir. Bu yanlış yorumlamaların sebepleri sıklıkla unutulur. Beton içindeki bir çelik parçası korozyona uğramaya başladığında anodik ve katodik alanlar aynı zamanda oluşur. Daha sonra bu korozyona uğrayan parça tamamen pasif olan bir parçaya bağlandığında, bu anodik ve katodik alanlar yeni bir potansiyele ulaşmak için polarize olurlar. Ancak, korozyona uğrayan parça hala katotlar içermektedir. Bir başka deyişle, mikro hücre aktivitesi korunmuştur ve dolayısıyla, korozyona uğrayan ve pasif olan çelik parçaları arasında oluşan galvanik akım, toplam korozyon aktivitesinin yalnızca bir parçasıdır.

Galvanik akım, I_{galv} , yalnızca korozyona uğrayan bölümün mikro hücre aktivitesi olmadan saf anot olması durumunda I_{corr} değerine eşittir. Bu durum betonda yalnızca, korozyona uğrayan alanın etrafındaki atmosferde oksijensiz ortam oluşması veya korozyona uğrayan alanın rölatif olarak çok küçük olması durumunda oluşabilir (Andreade ve Alonso 1996).

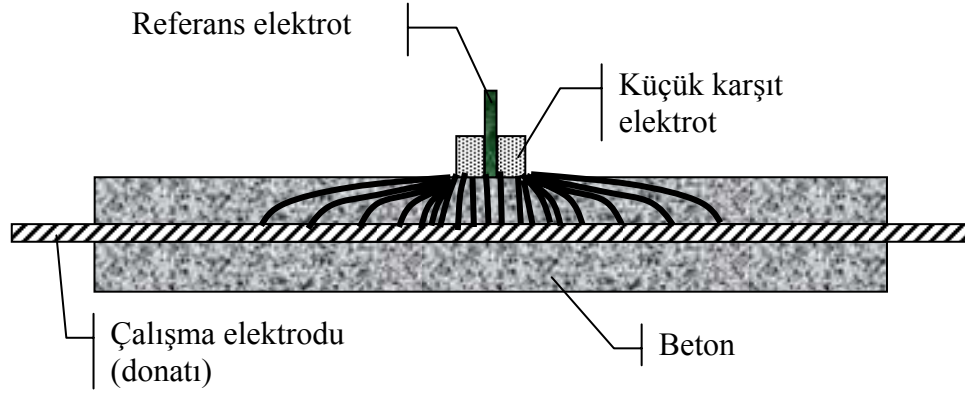
Betondaki makro hücre aktivitesinin karmaşıklığı sebebiyle betondaki makro hücre aktivitesinin doğru yorumlanması kolay değildir.

4.3 Korozyon Hızının Yerinde Ölçümü

Korozyon incelemeleri ele alındığında, gerçek boyuttaki bir yapının ana karakteristiği donatının sonsuz uzunluğudur. Bu durum metal boyutlarından etkilenmeyen tekniklerin kullanımını gerektirir.

Bu çerçevede potansiyel haritaları veya beton direnci gibi teknikler daha ilgi çekici olmaktadır. Ancak, bunların niceliksel olmayan karakteri yüzünden donatı korozyonu ölçümlerine uygun değildirler ve yanlış yorumlara, kesin olmayan sonuçlara yol açabilirler. Gerçekte, yalnızca R_p 'yi ve bunun üzerinden korozyon yoğunluğu, I_{corr} , değerini hesaplayabilen yöntemlerin yerinde ölçümler için uygun olduğu düşünülebilir.

Ancak, donatının polarizasyonu elverişli olmadığından elektrik sinyalini uygulamak için küçük boyutlu karşıt elektrotlar, CE, kullanılmalıdır. Ancak bu tarz bir düzenleme, elektrik sinyalinin donatılar boyunca üniform olmayan bir dağılım göstermesine sebep olur (Şekil 4.24). Sinyal, karşıt elektrottan uzaklaştıkça azalır ve yok olur. Donatı (çalışma elektrodu) üzerinde akımın gerekli üniform dağılımı ile karşılaşmaz ve dolayısıyla R_p hassas olarak hesaplanamaz. Büyük yapılarda $\Delta E/\Delta I$ oranı ölçüldüğünde sadece görünür bir R_p , R_{papp} , bulunur ve bu değer niceliksel değerlendirmelerde kullanılamaz (Feliu, Gonzales 1988).

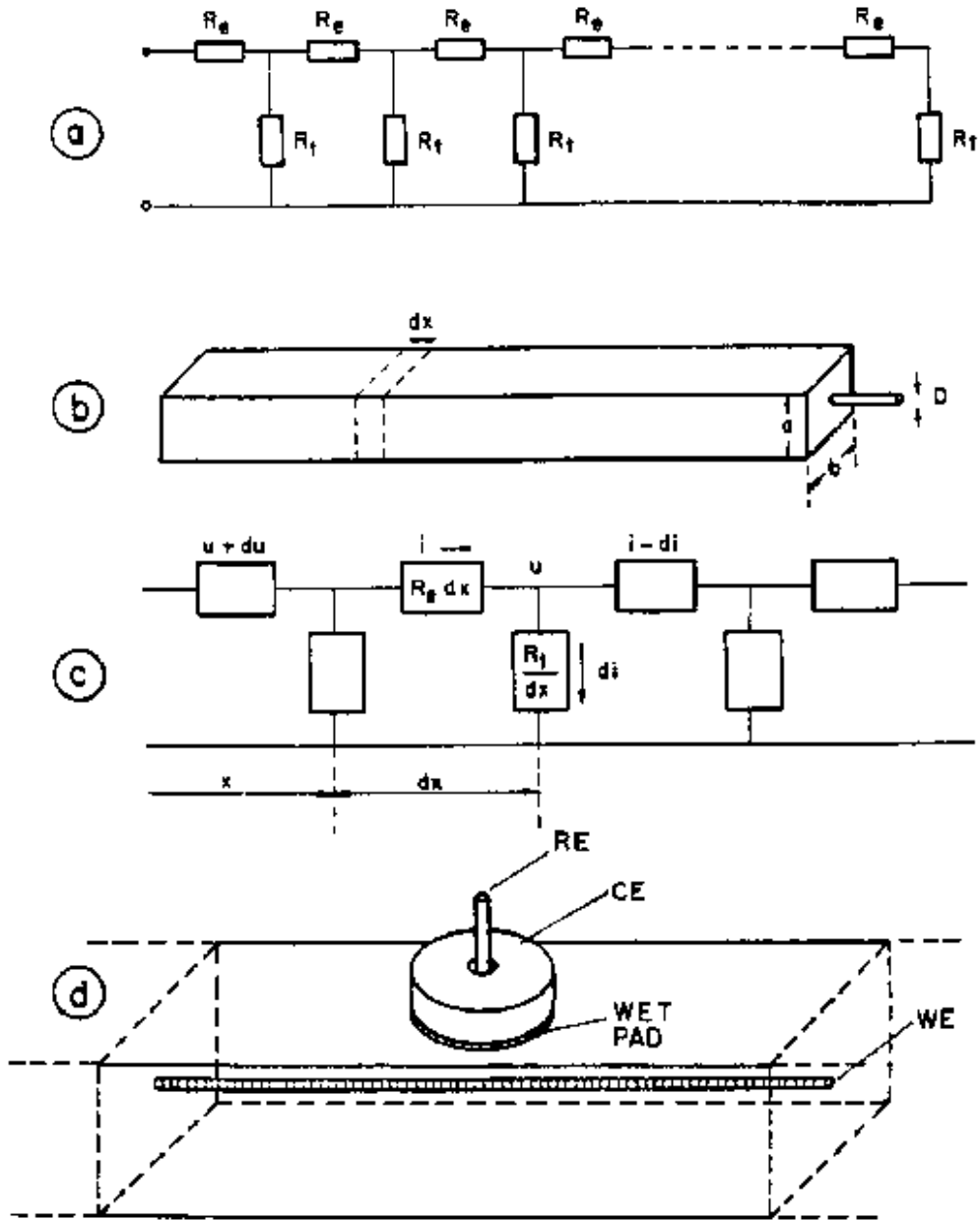


Şekil 4.24 Çalışma elektrodu olan donatıya akım uygulandığında elektrik alan çizgilerinin dağılımı.

Akım tarafından gerçekten polarize edilmiş donatı yüzeyinin belirsizliğini çözmek amacıyla birçok yaklaşım ele alınmıştır:

- Elektrik sinyalinin lateral yönde yayılımının hesaplanması,
- Akımın lateral yönde üniform olmayan dağılımının etkisinin en aza indirilmesi,
- Uygulanan elektrik sinyalinin sınırlandırılması.

Bir yayılma hattının elektriksel benzeşimi (Şekil 4.25) donatı boyunca akımın yayılımını modellemek için kullanılabilir. Akım çizgileri donatının uzunlamasına aksına paralel şekilde ilerler. Ek olarak elektriksel tahrik küçük genliklerde olmalıdır. Bu modelin matematiksel çözümünde gerçekten polarize olan alanın “kritik uzunluğu” kavramını kurmak mümkündür. Bu alana karşı gelen $\Delta E/\Delta I$ oranı (R_p) “gerçek R_p ” olarak tanımlanır ve sonuç olarak Stern formülü ile I_{corr} hesabı için kullanılabilir (Feliu, Gonzales 1988).



Şekil 4.25 Çalışma elektrodu olan donatıya akım uygulamak için küçük bir karşıt elektrot kullanıldığında çelik/beton davranışını modellemek için kullanılan elektrik devresi.

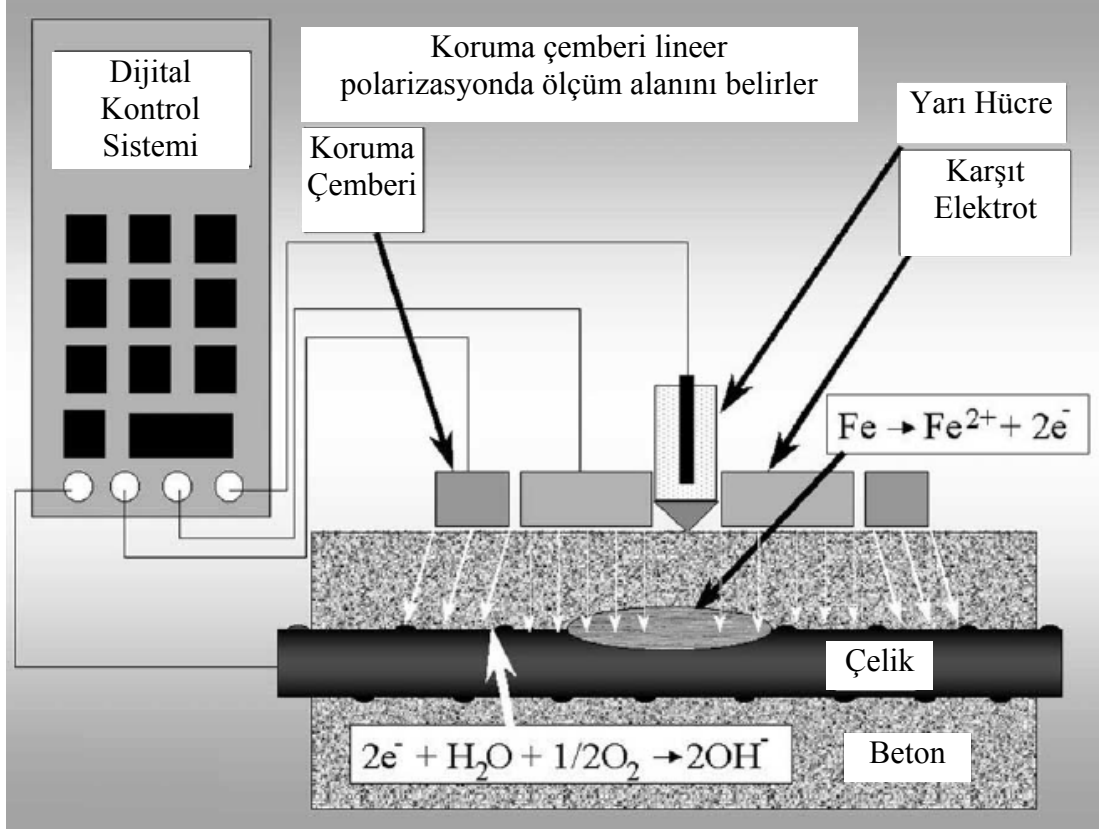
Akımın ulaşacağı kritik uzunluğun belirli bir değeri yoktur. Betonun elektriksel direncine ve çeliğin aktif/pasif olma durumuna bağlıdır. Kritik uzunluk $L_{crit} \approx \sqrt{R_p/R_e}$ beton direncinin ve korozyon hızının bir fonksiyonudur. Pasif çubuklarda bu kritik uzunluk büyüktür ve donatı boyunca 1m'ye kadar ulaşabilir. Ancak, korozyona uğrayan donatılarda kritik uzunluk çok küçüktür. Aktif bölgeler akımı tamamen çeker.

Kritik boy, karşıt elektrot (CE) boyutundan çok R_p ve R_e 'nin bir fonksiyonu olduğu için, karşıt elektrot büyüdükçe etkilediği donatı alanından bulunan hata azalır. Dolayısıyla, CE yüzeyi arttıkça bulunacak R_{papp} gerçek R_p 'ye daha yakın olur. Başka bir olası yöntem, artan boyutlarda CE kullanmak ve sonucu sonsuz büyüklük için ekstrapolasyon ile bulmaktır. Ancak, çok büyük bir CE kullanılırsa R_{papp} gerçek R_p 'den oldukça farklı olabilir. Küçük boyutlarda CE kullanıldığında hata faktörü 10 ile 100 arasında değişebilir. Sadece CE boyutuna bağlı olmayıp aynı zamanda R_p/R_e oranına da bağlıdır.

Diğer yandan, yerinde ölçümler için R_p 'nin değişken olmasının üstesinden sadece yeterince büyük boyutlarda CE kullanılarak gelinemez. Lokal korozyon veya donatı boyunca aktivitedeki değişimler tam olarak tanımlanamamaktadır.

Gerçek R_p değerlerini hesaplamak için bir diğer yaklaşım, çember şeklinde ikinci bir karşıt elektrot (guard ring) ile akımı sınırlamak esasına dayanır (Şekil 4.26).

Ana elektrottaki akımın sinyalinin dağılımı onu çevreleyen yüzük şeklinde bir elektrot ile dengelenir. Bu yolla, merkezden çıkan ana akım hatları donatının bilinen bir alanı içerisinde sınırlandırılır.



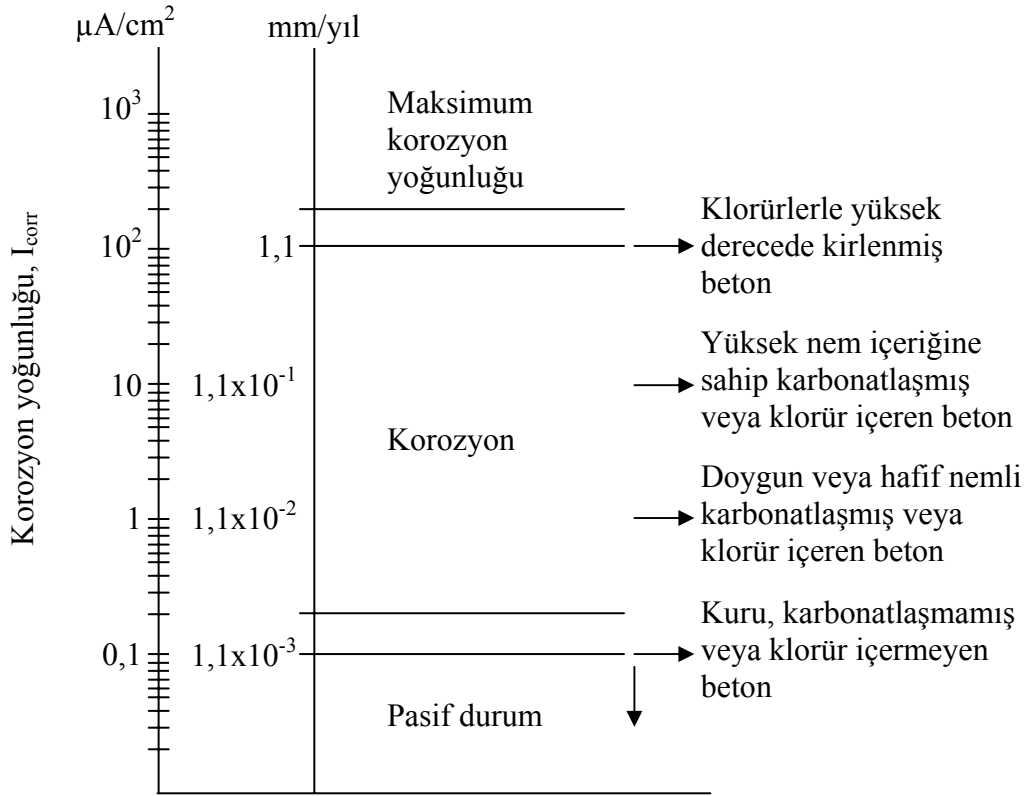
Şekil 4.26 Koruma çemberi şeklindeki elektrot (Guard ring) ile akımın sınırlandırılması (Broomfield, Davies, & Hladky, 2002).

BÖLÜM BEŞ

BETONARMEDE KOROZYON HIZI DEĞERLERİ

5.1 Laboratuvar Sonuçları

Laboratuvarda gerçekleştirilen birçok deneyden elde edilen I_{corr} değerlerinin mertebeleri Şekil 5.1’de özetlenmiştir (Andrade, Alonso, 2004). Bu sonuçlardan, aktif ve pasif çelik arasında bir sınır tanımlamak mümkündür. $I_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2$ ise ($< 1,1 \mu m/yıl$) değerleri için donatıdaki korozyon ihmal edilebilir. $I_{corr} > 0,2 \mu A/cm^2$ ise ($> 2,2 \mu m/yıl$) ise donatıda korozyon olabilir.



Şekil 5.1 Laboratuvarda farklı koşullarda yapılan birçok deneyden sonra elde edilen I_{corr} değeri aralıkları.

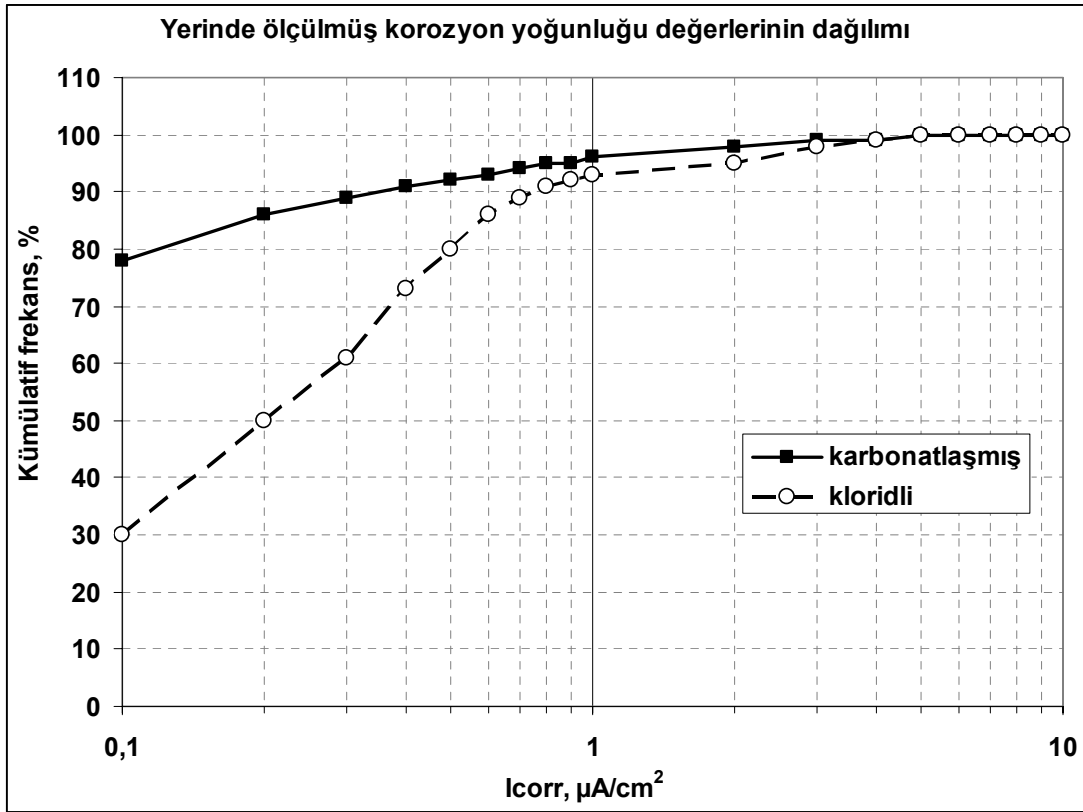
Şekilde görüldüğü gibi, laboratuvar deneylerinde ölçülen en büyük korozyon hızı değeri $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (deniz suyuna maruz çatlak betonda ölçülen) civarındadır. Bu lokal bir korozyon hızı olmayıp ortalama değerdir. Zira lokal korozyon durumunda değerler daha önce sözü edildiği gibi 10 kat daha büyük olabilmektedir.

Karbonatlaşmış örneklerde böyle yüksek değerler kaydedilmemiş olup maksimum $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değeri ölçülmüştür.

Polarizasyon direnci ölçüldüğünde I_{corr} değerleri ile birlikte E_{corr} ve R_e değerleri elde edilir. Laboratuvar deneylerinden bulunan sonuçlara göre, aktif-pasif sınırı olan $200\text{--}400 \text{ k}\Omega.\text{cm}$ 'e karşı gelen bir eşik beton direnci tanımlanabilir. Diğer bir deyişle, beton direncinin sadece çok yüksek değerleri için I_{corr} sınırın altında kalabilir.

5.2 Yerinde Yapılarda I_{corr} Değerleri

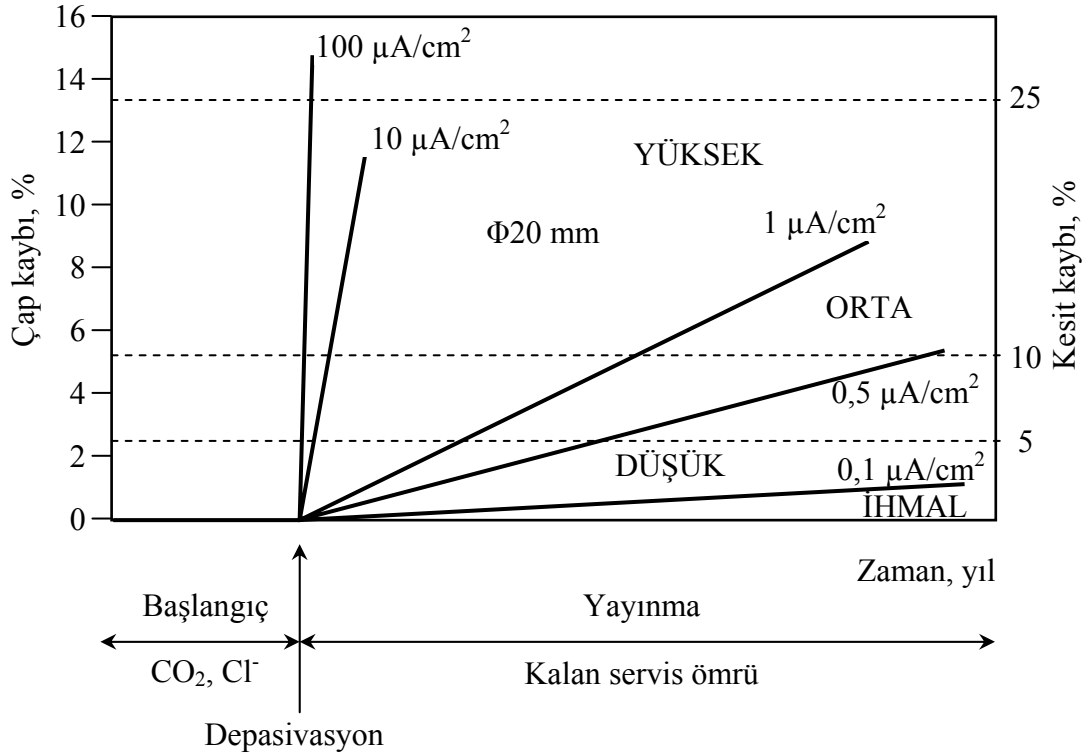
Gerçekçi portatif bir ekipman geliştirilmesinin üzerinden kısa bir süre geçmesine rağmen, fazla sayıda yapıda ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçülen I_{corr} değerlerinden bir veri bankası oluşturulmaya devam edilmektedir. Şekil 5.2'de karbonatlaşmış yapılarda ve kloritlere maruz yapılarda yerinde ölçülen I_{corr} değerlerinin kümülatif frekansları görülmektedir (Andrade ve Alonso, 1996).



Şekil 5.2 Akımın sensörlü sınırlandırılması ile yerinde yapılarda ölçülen I_{corr} değerlerinin kümülatif eğrisi.

Bu değerler, laboratuvarda yapılan ölçümlerde $10 \mu A/cm^2$ 'den büyük değerlere hiç rastlanmamasına ve $1-10 \mu A/cm^2$ arasındaki değerler çok nadir görülmesine rağmen laboratuvar ölçümleri ile oldukça uyumludur.

Bu durum Şekil 5.3 ile açıklanabilir. Şekilde laboratuvarda tespit edilen I_{corr} aralıkları için, zamanla donatının kesit alanının azalması görülmektedir. I_{corr} göz önüne alındığında $10 \mu A/cm^2$ 'den büyük değerler, kesit alanının hızlı bir şekilde azalacağını ve yapının çabuk bir bozulma sürecine maruz kalacağını göstermektedir. Diğer yandan, $0,1 \mu A/cm^2$ 'den küçük değerler 100 yıldan daha fazla bir süreye işaret eder. Donatıda % 5–25 kesit kaybı gerçekleşmesi için $0,5-5 \mu A/cm^2$ korozyon hızında 20–50 yıl geçmesi gerekir.



Şekil 5.3 I_{corr} değerlerinin fonksiyonu olarak donatı çapının zamanla azalması (Andrade, Alonso, 2004).

Bu verilere dayanarak Tablo 5.1'deki korozyon hızı sınıflandırması yapılabilir:

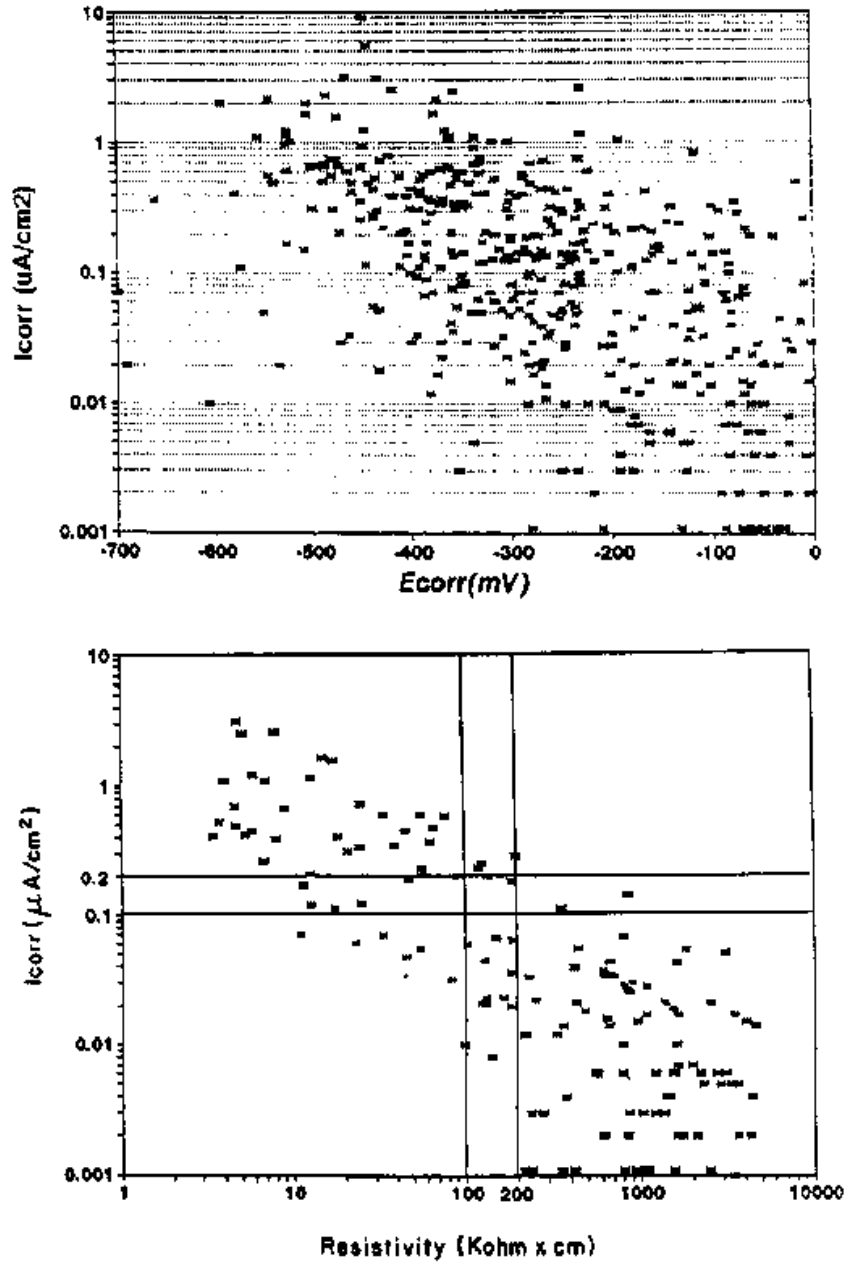
Tablo 5.1 Korozyon akım yoğunluğu değerlerinin sınıflandırılması (ACI 222R-01 2001, SHRP-S-330 1993)

Korozyon hızı ($\mu A/cm^2$)	Korozyon seviyesi
<0,1	İhmal edilebilir
0,1–0,5	Düşük
0,5–1,0	Orta
>1	Yüksek

Gerçekte yapının kalan ömrünün niceliksel olarak tahmin etmek için korozyon hızı anahtar parametredir. Korozyon hızı ile şu bilgilere ulaşılır:

- Zamanla kesit alanındaki kayıp,
- Pas payının çatlamasına kadar geçen süre,
- Çelik/beton aderansındaki artan kayıplar.

I_{corr} , E_{corr} ve R_e değerleri arasında pratikte bulunan ilişkiler dikkate alındığında elde edilen grafikler Şekil 5.4'de verilmektedir. E_{corr} ile I_{corr} arasında herhangi bir ilişki bulunmazken, I_{corr} ile beton direnci arasında bir ilişki vardır. Şu vurgulanmalıdır ki, gerçek yapılarda bulunan eşik direnci laboratuvar ölçümleri ile uyushmaktadır ve Tablo 5.2'de gösterilen korozyon riski sınıflandırılmasını mümkün kılmaktadır.



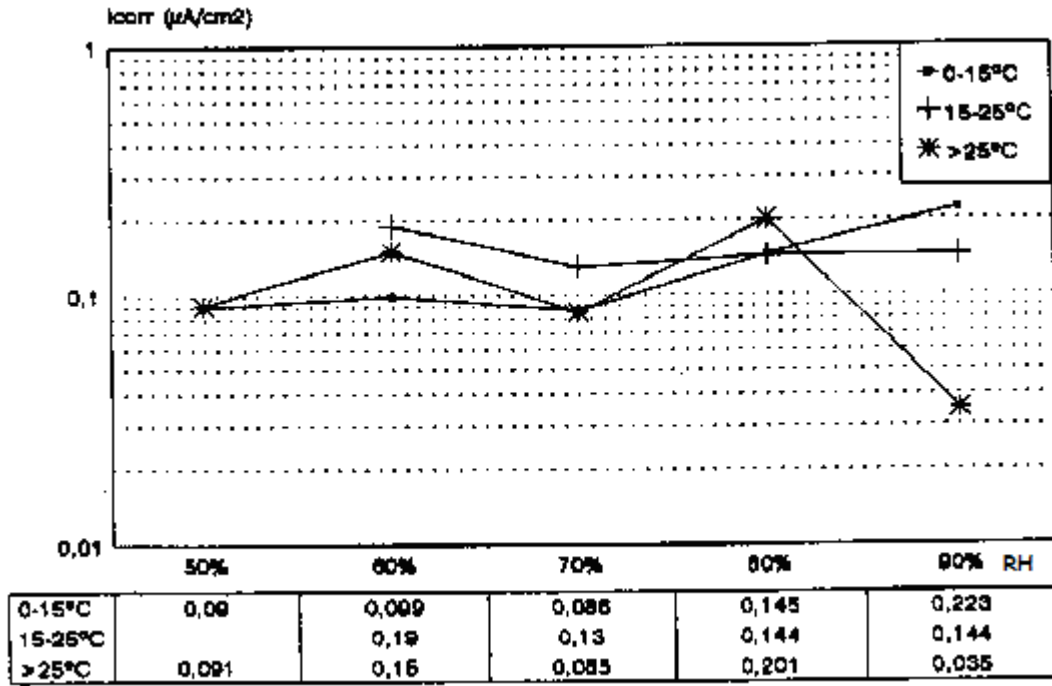
Şekil 5.4 Yerinde yapılarda tespit edilen I_{corr} değerleri ile E_{corr} /direnci ilişkisi (Rodriguez, Ortega, Garcia, Johansson, & Petterson, 1994).

Tablo 5.2 Korozyon riski sınıflandırması

Direnç (k Ω .cm)	Risk seviyesi
>100–200	Beton karbonatlaşsa veya kloritlere maruz kalsa bile korozyon hızı değerleri çok düşük olacaktır
10–100	Düşük-yüksek korozyon hızları
<10	Korozyon hızını kontrol eden parametre direnç değildir.

Kapalı ortamda veya değişmeyen ortam şartlarında I_{corr} hasarın gelişmesine bağlı olarak zamanla değişebilir. Ancak, dış şartlarda beton günlük veya mevsimlik sıcaklık ve bağıl nem değişimlerine maruzdur. Ayrıca yapının lokal ve genel nem durumları önemlidir. Örneğin, saçak ve giydirme cephe gibi korumalı şartlarda nem, dışarıdaki nemden fazla olabilmektedir. Bu lokal değişimler ve iklimsel çevrimler I_{corr} değişimlerini etkiler. Yapının ortalama karakteristik değerini tespit etmek için bu değerlerin bilinmesine gerek vardır.

Şekil 5.5’de atmosfer koşullarına açık bir kirişten, sıcaklık ve bağıl nem aralıklarında ortalaması alınmış I_{corr} değerleri görülmektedir (Andreade, Alonso 1996). Bağıl nemin yüksek olduğu ($T > 25$ °C’de buharlaşma fazladır) durum hariç I_{corr} değerlerinin sabit kaldığını söylemek mümkündür. Buharlaşmanın fazla olması ortalama I_{corr} değerinde önemli bir azalmaya yol açar.



Şekil 5.5 Ortalama i_{corr} değerleri.

Özet olarak, korozyon hasarının karakterizasyonu ve yapının servis ömrü tahmini için kullanılacak karakteristik değerler tanımlama ve yapı dış ortam şartlarında ise, i_{corr} değerleri için istatistiksel bir değerlendirme yapmanın gerekli olduğu vurgulanmalıdır.

BÖLÜM ALTI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sunulan çalışmanın amaç ve kapsamı ile çalışmalarda kullanılan malzemeler ve metotlar bu bölümde sunulmaktadır.

6.1 Amaç

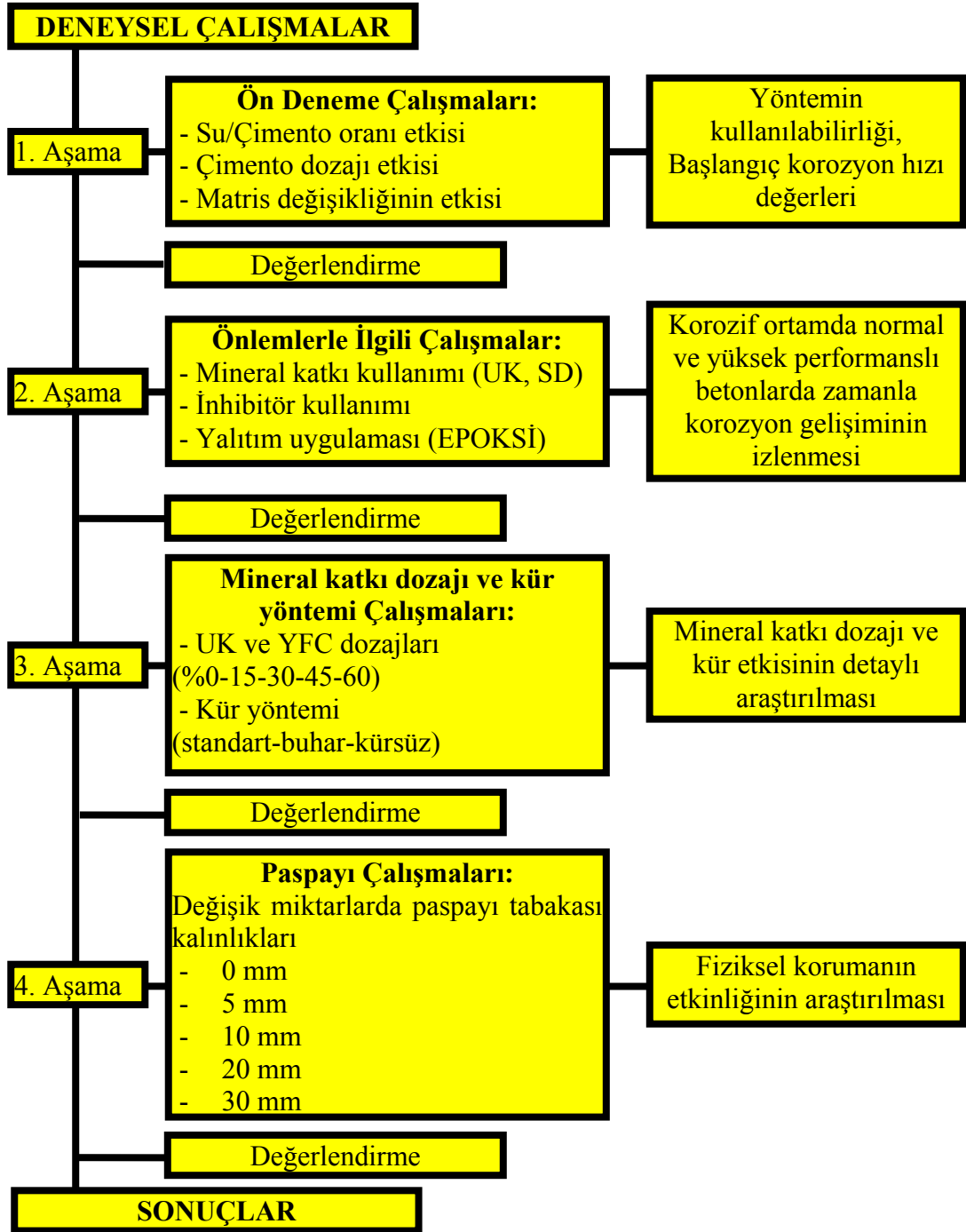
Bu tez çalışmasında, deprem bölgelerinde, sanayi alanlarında ve özellikle deniz atmosferinde bulunan çok sayıdaki, risk altındaki betonarme yapıda etkili olan donatı korozyonu olayına etki eden faktörlerin etki şekli ve derecelerinin uzun süreli deneylerle ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

Beton teknolojisine uygun olarak üretilmiş kaliteli betonların, içlerine gömülü çelik donatıları korudukları bilinmesine karşın, kompozisyonlarındaki ve üretim süreçlerindeki değişikliklerin etki dereceleri ve mertebeleri net olarak ortaya koyulamamıştır. Bazı durumlarda ise birlikte gelişen iki mekanizmadan biri olumlu etki yaparken, diğeri korozyonu hızlandırıcı etki gösterebilmektedir. Ayrıca literatürde, aynı değişkene ait çelişkili sonuçlara da ulaşmak mümkündür.

Yapı şartnamelerinde ve standartlarda donatı korozyonu açısından kalitatif değerlendirmelere göre çeşitli önlemlere yer verilse de niceliksel kriterlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yönden bakıldığında betonarmede donatı korozyonu çalışmalarının önemi büyüktür.

6.2 Kapsam

Deneysel çalışmalar temel olarak dört ana bölümden oluşmaktadır. Çeşitli aşamalarda yapılan çalışmalar ve incelenenler Şekil 6.1'deki deneysel çalışma akış şemasında sunulmuştur.

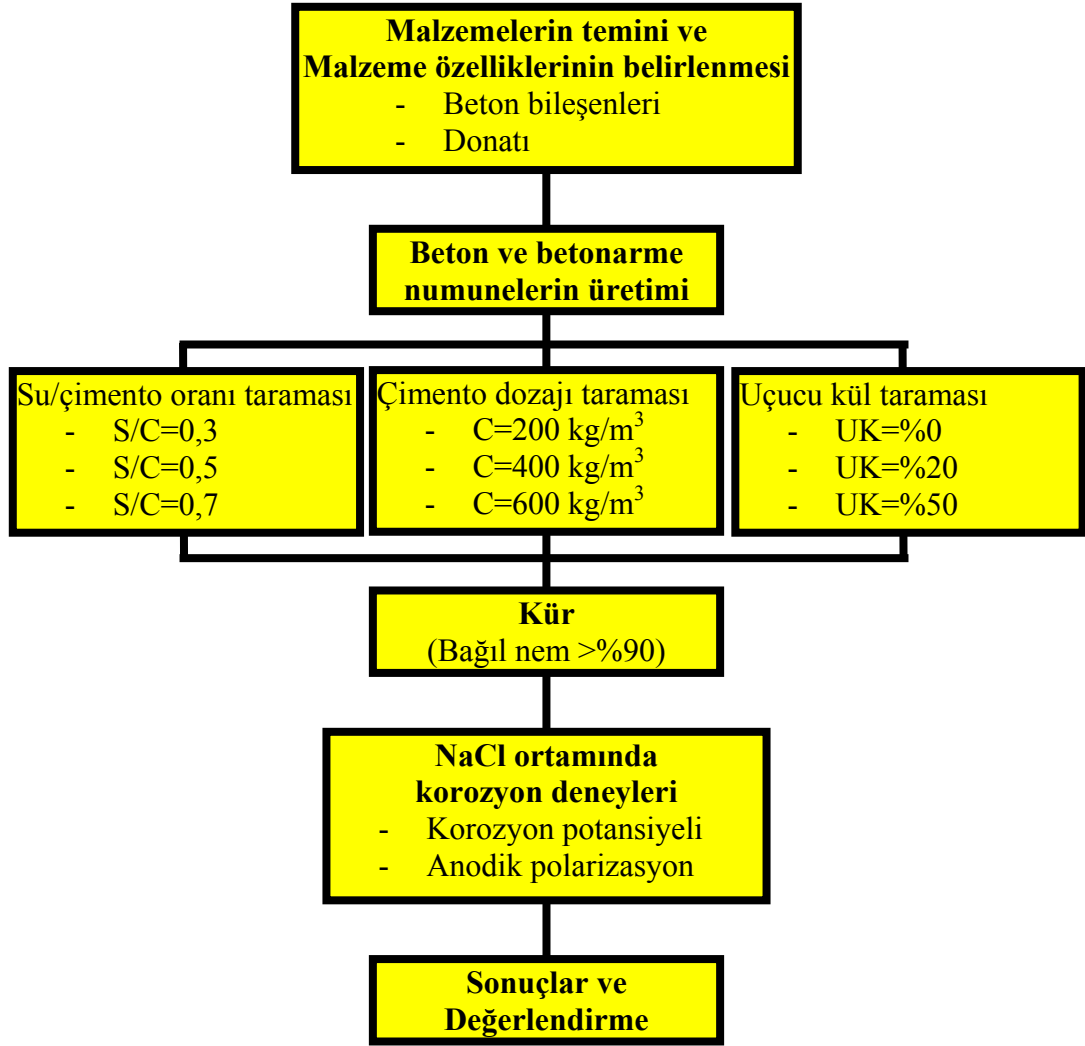


Şekil 6.1 Deneysel çalışma aşamaları.

İlk bölüm ön deneme çalışmalarından oluşmaktadır. Metalürji mühendisliği ve korozyon mühendisliğinin korozyon araştırmalarında kullanılan üç elektrotlu sistem ile anodik polarizasyon yönteminin deneysel program çerçevesinde kullanılabilirliği test edilmiştir. Literatürde yöntemin avantajları ve dikkat edilmesi gereken hususlar verilmiştir. Bu bölümde amaç, yöntemin gerçekleştirilecek sistematik deneylere uygunluğunun sınanmasıdır.

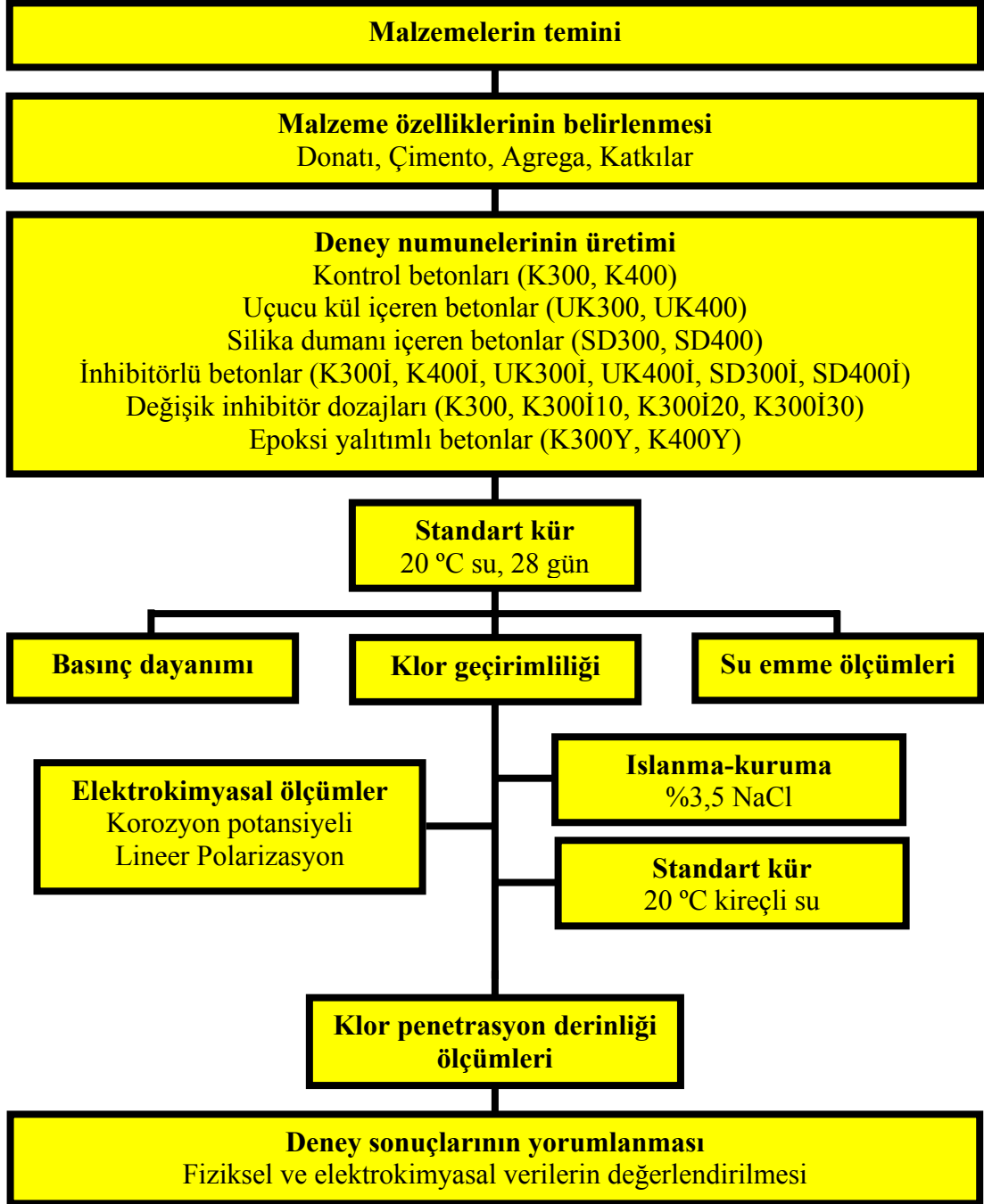
Bu amaçla, beton kalitesini büyük oranda etkileyen beton kompozisyonunda üç faktör değiştirilerek donatılı beton elemanlar üretilmiştir. Betonun su/çimento oranı (S/C) (0,3 – 0,5 ve 0,7), çimento dozajı (200 – 400 ve 600 kg/m³) ve mineral katkı (uçucu kül) kullanım oranı (%0 – %20 ve %50) değiştirilerek farklı özelliklerde betonarme numuneler hazırlanmıştır. Üç elektrotlu korozyon ölçüm sistemi kurularak örnekler üzerinde korozyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonunda numunelerin korozif ortamda başlangıç korozyon hızı değerleri belirlenmiştir.

Birinci aşama deneysel çalışmalara ait çalışma planı Şekil 6.2’de sunulmaktadır. Sonuçların mantıklı ve kabul edilebilir olduğunun anlaşılmasının ardından sistematik çalışmalara geçilmiştir.



Şekil 6.2 Birinci aşama deneylere ait çalışma planı.

İkinci aşamadaki deneylerde, betonarme elemanlarda korozyona karşı beton kompozisyonunda alınacak önlemlerin bazıları incelenmeye çalışılmıştır. Normal ve yüksek performanslı betonlarda mineral katkı (uçucu kül ve silis dumanı) kullanımı, korozyon inhibitörü (kalsiyum nitrit esaslı) kullanımı ve epoksi yalıtım uygulamalarının betona gömülü donatılardaki korozyon gelişimine etkileri zamana bağlı olarak incelenmiştir. İkinci aşama deneysel çalışma planı Şekil 6.3'de verilmektedir.

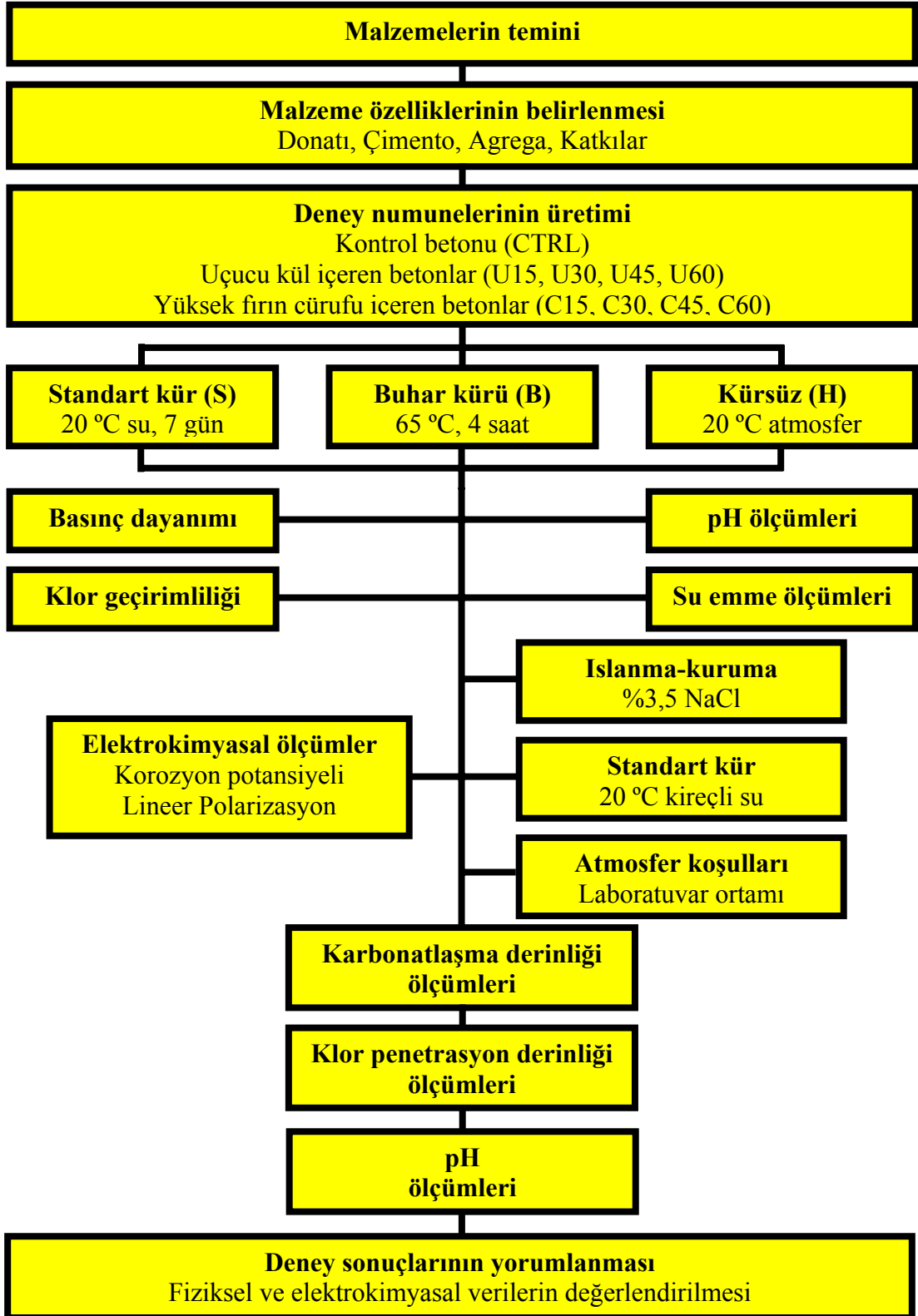


Şekil 6.3 İkinci aşama deneysel çalışma planı.

Deneysel çalışmaların üçüncü bölümünde ise, beton karışımlarında mineral katkı kullanım oranının ve betona uygulanan kür yönteminin çelik donatıdaki korozyon gelişimine etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Mineral katkı içermeyen kontrol numunelerinin yanında değişik oranlarda (çimento ağırlığınca ikame olarak %15, %30, %45 ve %60) uçucu kül veya yüksek fırın cürufu kullanılan donatılı beton numuneler hazırlanmıştır.

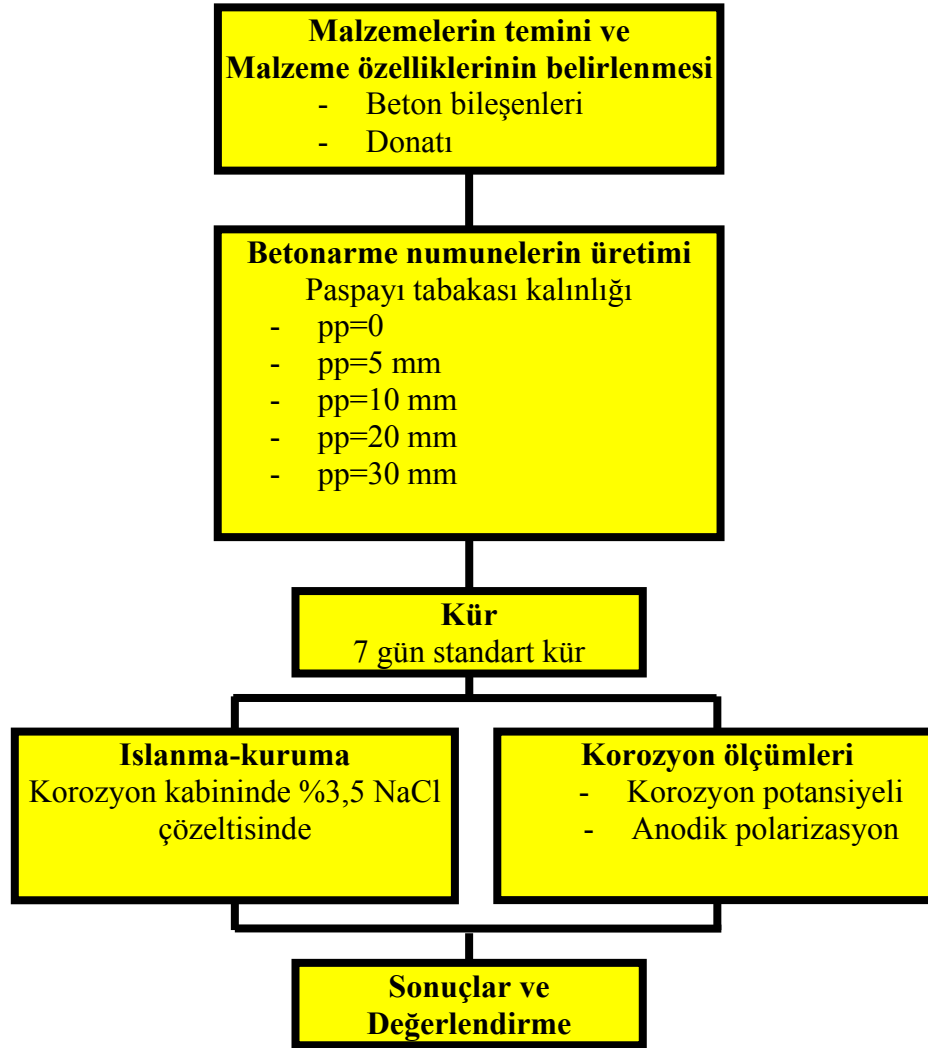
Sözü edildiği gibi bu bölümde bir diğer amaç, kür yönteminin korozyona etkisinin belirlenmesidir. Bu amaçla numunelerin bir bölümüne standart kür uygulanmış, bir bölümü buhar kürü uygulamasına tabi tutulmuş ve kalan bölümüne ise herhangi bir kür işlemi yapılmamıştır.

Mineral katkı tipi, oranı ve kür kombinasyonlarına karşı gelen her seriden numuneler değişik ortamlarda saklanmıştır. Havada ve kireçli suda bekleyen numuneler açık devre potansiyeli ölçümleri ile izlenirken, sodyum klorür çözeltilisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz numunelerde periyodik olarak korozyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar hızlı klor geçirimsizliği, klor penetrasyon derinliği ve karbonatlaşma derinliği ölçümleri ile birlikte sunulmaktadır. Üçüncü bölüm deneysel çalışma akış şeması Şekil 6.4'te verilmektedir.



Şekil 6.4 Üçüncü aşama deneyleri.

Dördüncü bölümde incelenen değişken, betonun donatıyı korozyona karşı fiziksel olarak koruyan paspayı tabakasının kalınlığıdır. Önceki bölümlerde beton kompozisyonundaki değişiklikler ile kimyasal korumanın etkinliği araştırılmıştır. Bu bölümde ise, paspayı tabakası kalınlığının korozyon başlangıç süresine ve korozyon hızına etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Donatının beton yüzeyinde ve açıkta olmasını temsil eden 0 mm paspayına sahip numunelerin yanı sıra, 5, 10, 20 ve 30 mm paspayı tabakası kalınlığına sahip numuneler üretilmiş ve benzeştirilmiş deniz suyunda (%3,5 NaCl çözeltisi) ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Sonuçlar, fiziksel korumanın etkinliği açısından değerlendirilmiştir. Dördüncü aşama deneylerine ait çalışma planı Şekil 6.5’de gösterilmektedir.



Şekil 6.5 Dördüncü aşama deneyleri.

6.3 Ön Deneme Çalışmaları

Deney programında, betonun su/çimento oranının, çimento dozajının ve mineral katkı olarak uçucu kül kullanımının donatıdaki başlangıç korozyon gelişimine etkisi araştırılmaktadır. Bu amaçla beton özellikleri açısından önemli üç faktör seçilerek, aşağıda belirtilen farklı değerlerde deneyler gerçekleştirilmiştir:

S/Ç oranı:	0,3 – 0,5 ve 0,7
Çimento dozajı:	200, 400 ve 600 kg/m ³
Mineral katkı – uçucu kül:	0, %20 ve %50 (çimento ağırlığına ikame).

6.3.1 Malzemeler

Korozyon ölçümleri için hazırlanan betonarme numunelerde CEM-I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Mineral katkı olarak uçucu kül kullanılmış olup Soma B Termik Santrali'nden elde edilmiştir. Kullanılan çimento ve uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.1'de sunulmuştur.

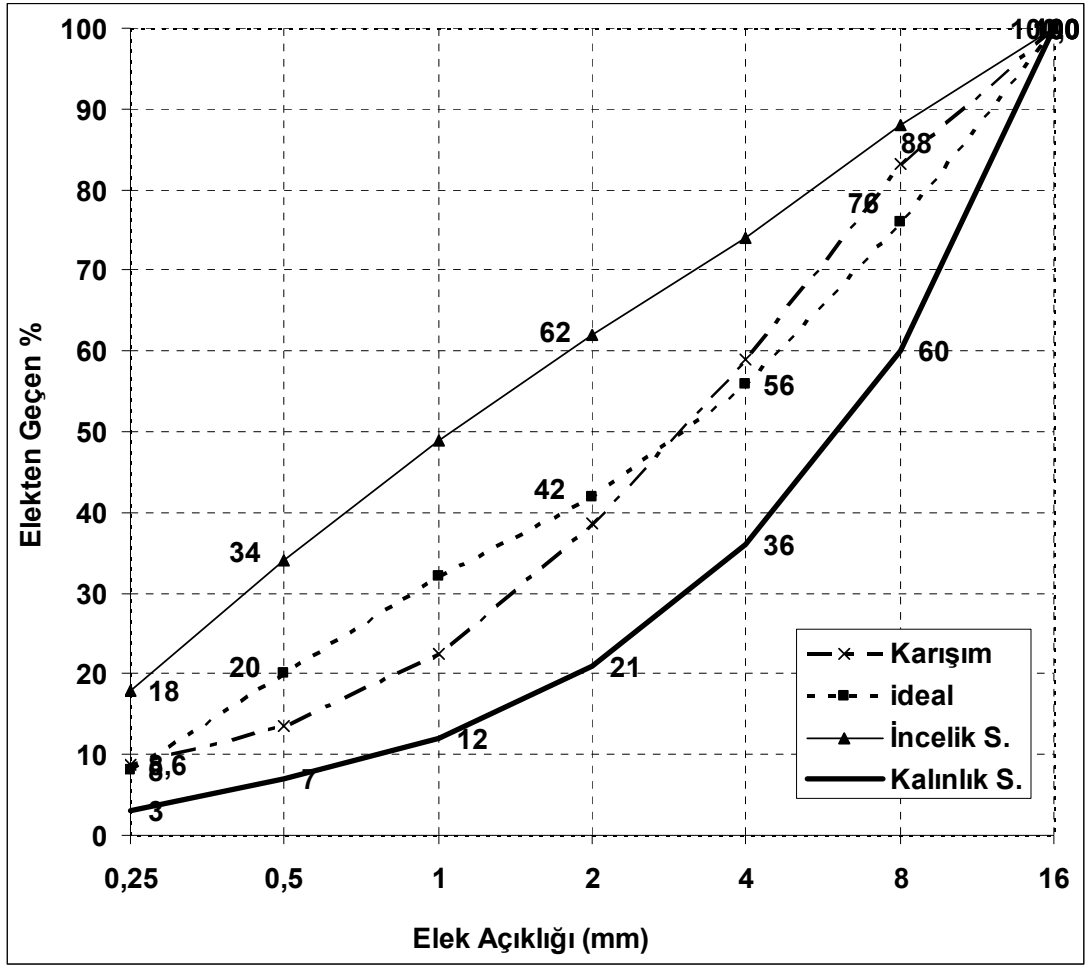
Beton karışımlarında agrega olarak 0–5 mm ve 5–15 mm boyut aralıklarında eşit oranda kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Kimyasal analize göre agregaların klor içeriği %0,0002 olarak tespit edilmiştir. İnce ve kaba agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 6.2'de, karışım granülometri eğrisi Şekil 6.6'da verilmiştir.

Tablo 6.1 Çimento ve uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Analiz (%)	Çimento	Uçucu Kül
SiO ₂	20,54	42,1
Al ₂ O ₃	4,83	19,4
Fe ₂ O ₃	4,68	4,6
CaO	63,15	27,0
MgO	1,43	1,8
Na ₂ O	0,22	---
K ₂ O	0,68	1,1
SO ₃	2,64	2,4
Cl ⁻	0,0103	---
Kızdırma kaybı	1,85	1,3
Çözünmeyen Kalıntı	0,61	---
Serbest CaO(%)	1,76	4,3
Özgül ağırlık	3,12	2,20
Özgül Yüzey (m ² /kg) Blaine	355	290
Puzolanik aktivite indeksi (%) ASTM C 311, 28 gün	---	88

Tablo 6.2 Agrega özellikleri

Özellik	İnce agreg	Kaba agreg
Boyut aralığı (mm)	0-5	5-15
Özgül ağırlık (KYD)	2,62	2,71
Su emme (%)	1,21	0,39
Karışım	50	50



Şekil 6.6 Birinci aşama deneylerde kullanılan agrega karışımı granülometri eğrisi.

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

Betonarme elemanlarda kullanılan donatılar, TS 708'e göre BÇ III-a sınıfı, tempcore yöntemi ile üretilmiş çelik çubuklardır. Nervürlü olarak imal edilen donatılar 16 mm çapındadır. Donatıların akma mukavemeti 487,4 MPa, çekme mukavemeti 598,1 MPa ve kopma uzaması %21 değerindedir. Kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.3'te sunulmuştur.

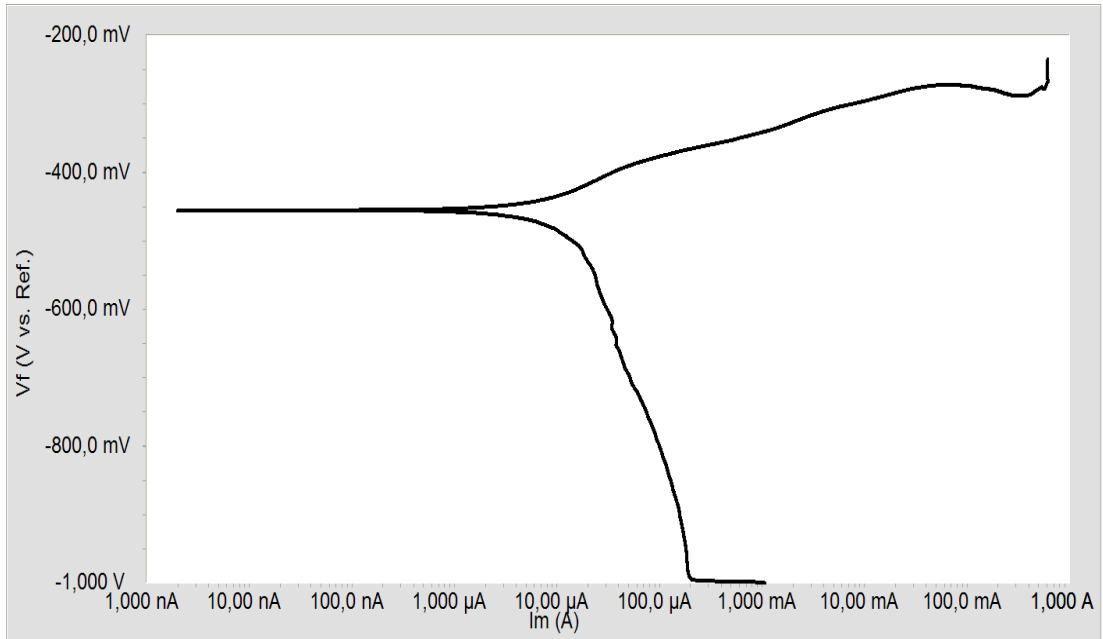
Tablo 6.3 Donatı çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Bileşen	Miktar (%)
C	0,2000
Si	0,1900
Mn	0,7000
P	0,0210
S	0,0240
Cr	0,0900
Ni	0,1100
Cu	0,5300
Mo	0,0160
Sn	0,0220
N	0,0110
Pb	0,0020
Fe	98,0840

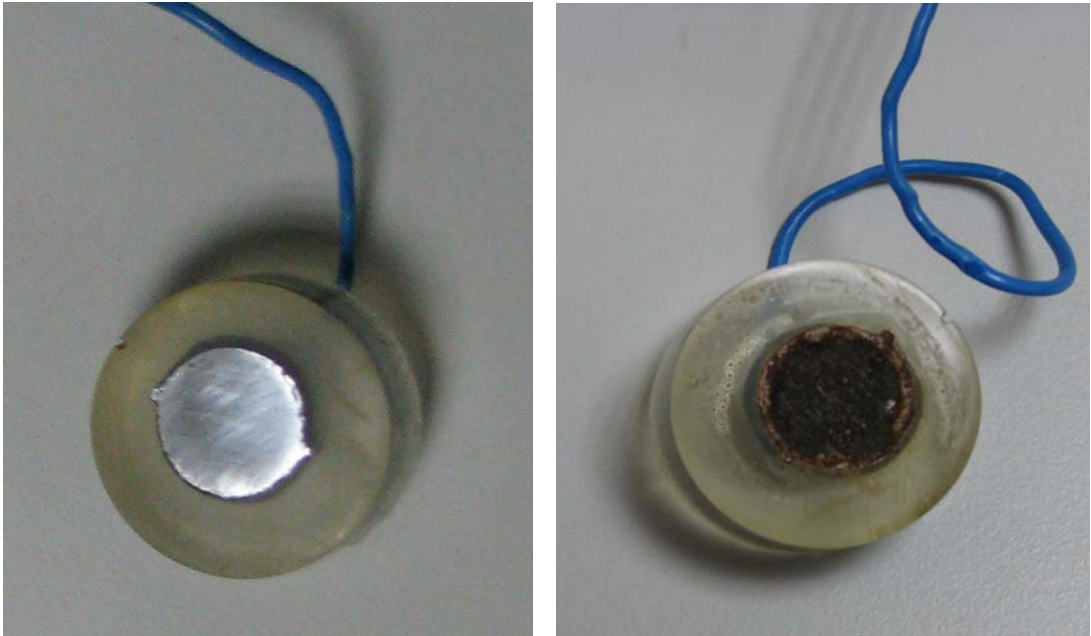
Çelik donatıların yalın halde korozyon davranışlarının tespit edilmesi amacıyla bölüm 6.3.4 de detayları verilen üç elektrotlu sistem kullanılarak testler yapılmıştır. Donatılardan enine kesit alınarak, parlak kesit üzerinde, potansiyel taraması ile anodik yönde polarizasyon tekniği kullanılarak potansiyel akım eğrisi elde edilmiştir. Eğri -1 V ile +1 V arasında 0,2mV/s potansiyel artış hızında çıkarılmaya çalışılmıştır. Ancak, üçüncü ve dördüncü aşamalarda kullanılan potansiyostatın kapasitesi (600mA) nedeni ile 600mA değerine ulaşıldığında deney sona erdirilmiştir. Elde edilen polarizasyon eğrisi Şekil 6.7’de sunulmuştur.

Tafel analizi sonucunda, korozyon potansiyeli $E_{\text{corr}}=-456$ mV, korozyon akımı $I_{\text{corr}}=8,66$ μA , korozyon akım yoğunluğu $i_{\text{corr}}=4,31$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, anodik Tafel sabiti $\beta_A=74,3$ mV, katodik Tafel sabiti $\beta_C=188,6$ mV, $B=23,14$ mV değerleri elde edilmiştir.

Örneklerin deneyden önce ve sonraki görünüşleri Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.7 Donatıda parlak kesit üzerinden elde edilen polarizasyon eğrisi.



Şekil 6.8 Donatıda parlak kesitlerin deneyden önce ve sonra görünümleri.

6.3.2 Beton Karışımları

Betonda kullanılan su, çimento ve mineral katkı miktarları betonun tüm özelliklerini etkilemektedir. Sertleşmiş betonun boşluk yapısı, alkalitesi, geçirimsizliği vb. içindeki çeliğin korozyon gelişimi ile doğrudan ilişkilidir. Betonun çeliği korumasındaki etkisinin araştırılması amacıyla düşük, orta ve yüksek mertebelerde S/Ç oranına sahip beton karışımları, çimento dozajı açısından düşük, orta ve zengin karışımlar, ayrıca düşük ve yüksek oranda uçucu kül içeren beton karışımları hazırlanmıştır. Yapılan taramalara göre beton karışım oranları Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6'da verilmiştir.

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 klor içeriği yüzdeleri elde edilmiştir. Karışımların klor içeriğine bakıldığında TS-EN 206-1'de betonarme elemanlar için çimento ağırlığına verilen %0,2 limitinin oldukça altında kaldığı görülmektedir.

Tablo 6.4 Su/Çimento oranı taraması yapılan serilerin karışım oranları

Dozaj 400 kg/m ³	T1	T2	T3
	S/Ç=0,30	S/Ç=0,50	S/Ç=0,70
Çimento, kg/m ³	400	400	400
Su, kg/m ³	120	200	280
0–5 mm agrega, kg/m ³	998	890	782
5–15 mm agrega, kg/m ³	998	890	782
Toplam, kg/m ³	2516	2380	2244
Çökme, cm	0	10	23,5
Cl- içeriği, % bağlayıcı	0,0113	0,0112	0,0111

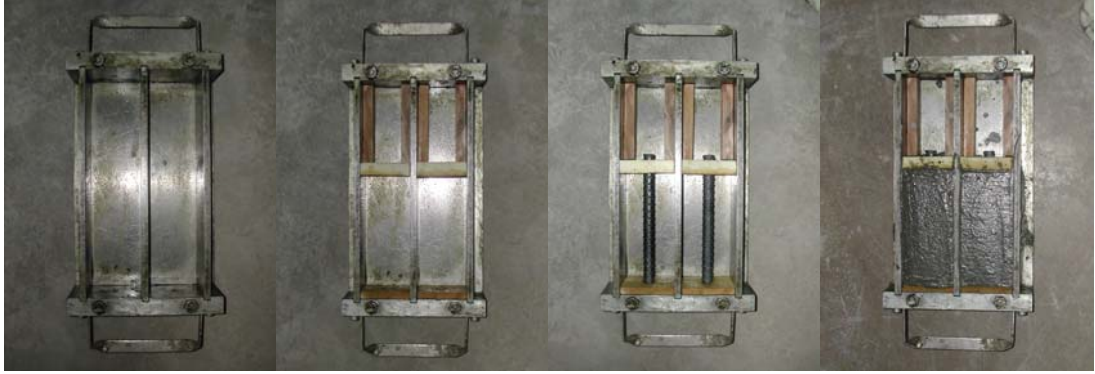
Tablo 6.5 Çimento dozajı taraması yapılan serilerin karışım oranları

Su/Bağlayıcı=0,50	T4	T2	T5
	200 Doz	400 Doz	600 Doz
Çimento, kg/m ³	200	400	600
Su, kg/m ³	100	200	300
0-5 mm agrega, kg/m ³	1112	890	668
5-15 mm agrega, kg/m ³	1112	890	668
Toplam, kg/m ³	2524	2380	2236
Çökme, cm	0	10	24
Cl- içeriği, % bağlayıcı	0,0125	0,0112	0,0107

Tablo 6.6 Uçucu kül ikame oranı taraması yapılan serilerin karışım oranları

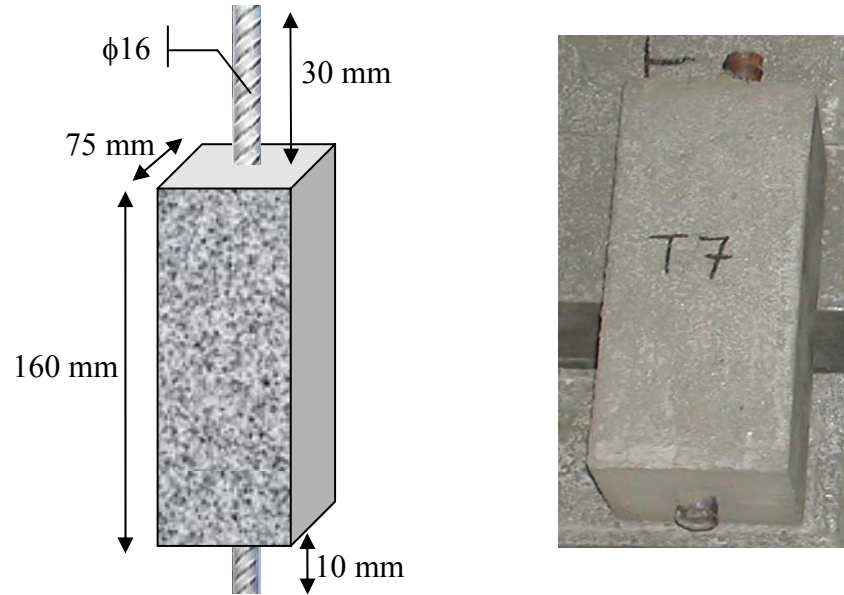
Su/Bağlayıcı=0,50 Dozaj 400 kg/m ³	T2	T6	T7
	UK %0	UK %20	UK %50
Çimento, kg/m ³	400	320	200
UK, kg/m ³	-	80	200
Su, kg/m ³	200	200	200
0-5 mm agrega, kg/m ³	890	875	854
5-15 mm agrega, kg/m ³	890	875	854
Toplam, kg/m ³	2380	2350	2308
Çökme, cm	10	11	7
Cl- içeriği, % bağlayıcı	0,0112	0,0091	0,0060

Korozyon analizlerinin gerçekleştirildiği betonarme numuneler 75x75x160 mm boyutlarında prizmatik örneklerdir. Çelik donatılar 200 mm uzunluğunda olup beton prizmanın tam ortasına yerleştirilmiştir. Numuneler yatay olarak dökülmüş ve donatıların yerleştirilmesi amacıyla prizmanın üst ve alt taban bölümlerinde ahşap takozlar kullanılmıştır. Çelik donatıların uçları, 160 mm uzunluğundaki beton prizmanın alt tabanından 10 mm, üst tabanından ise 30 mm kalacak şekilde açıkta kalmıştır. Betonarme örneklerin hazırlanış aşamaları Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



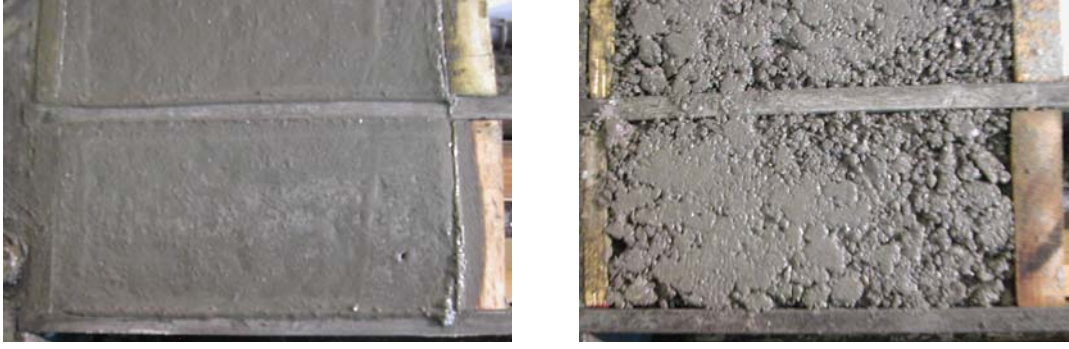
Şekil 6.9 Betonarme numunelerin hazırlanışı.

Betonarme numunelerin şematik çizimi ve fotoğrafı Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10 Betonarme numuneler.

Bu çok farklı tipteki betonların taze haldeki işlenebilirlik değerleri oldukça farklılık göstermektedir. Bazı karışımlar oldukça iyi sıkıştırılabilirken bazıları çok yetersiz sıkışmıştır (Şekil 6.11). Yetersiz sıkışmış ve çok fazla boşluk içeren karışımlarda betonun fiziksel koruması ortadan kalktığından değerlendirmede bu durum özellikle dikkate alınmıştır.



Şekil 6.11 Yeterli ve yetersiz sıkışmış numuneler.

Yüksek dozajlı betonların ve bunun yanında mineral katkı içeren betonların hidratasyon ürünleri ve hidratasyon ürünlerinin miktarları farklı değerler alacağından, bu farklılıkların da korozyon gelişimine etkisi değerlendirilmiştir.

6.3.3. Kür

Hazırlanan betonarme numuneler üretimden sonra 7 gün süre ile sıcaklığı 15 ile 20 °C, bağıl nemi $BN > \%90$ olan kür ortamında tutulmuştur. Bu şartları sağlamak üzere numuneler kapalı kür havuzunda su ile temas etmeden bekletilmiştir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12 Kür ortamındaki numuneler (t: 15–20 °C, BN: >%90).

İlk kürlenme süresinin ardından betonarme numunelerde açıkta kalan çelik donatılarda nemli ortam şartları nedeni ile korozyon ürünlerinin oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 6.13 – 6.15). Donatılar bu sürede oluşan korozyon ürünlerinden arındırılmıştır. Temizleme işlemi döner çelik fırça ile yapılmıştır (Şekil 6.15 – 6.16). Bu işlemin ardından açıktaki donatılara epoksi kaplama aşamasına geçilmiştir.



Şekil 6.13 İlk kür periyodunda donatıda gelişen paslanma.



Şekil 6.14 Açıkta kalan çelik donatı (7. günde, temizleme işleminden önce).



Şekil 6.15 Açıkta kalan donatılardan korozyon ürünlerinin temizlenmesi.



Şekil 6.16 Açıkta kalan çelik donatı (7. günde, temizleme işleminden sonra).

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 (DEGUSSA-YKS Masterseal 180) ile iki tabaka halinde kaplama yapılmıştır (Şekil 6.17).

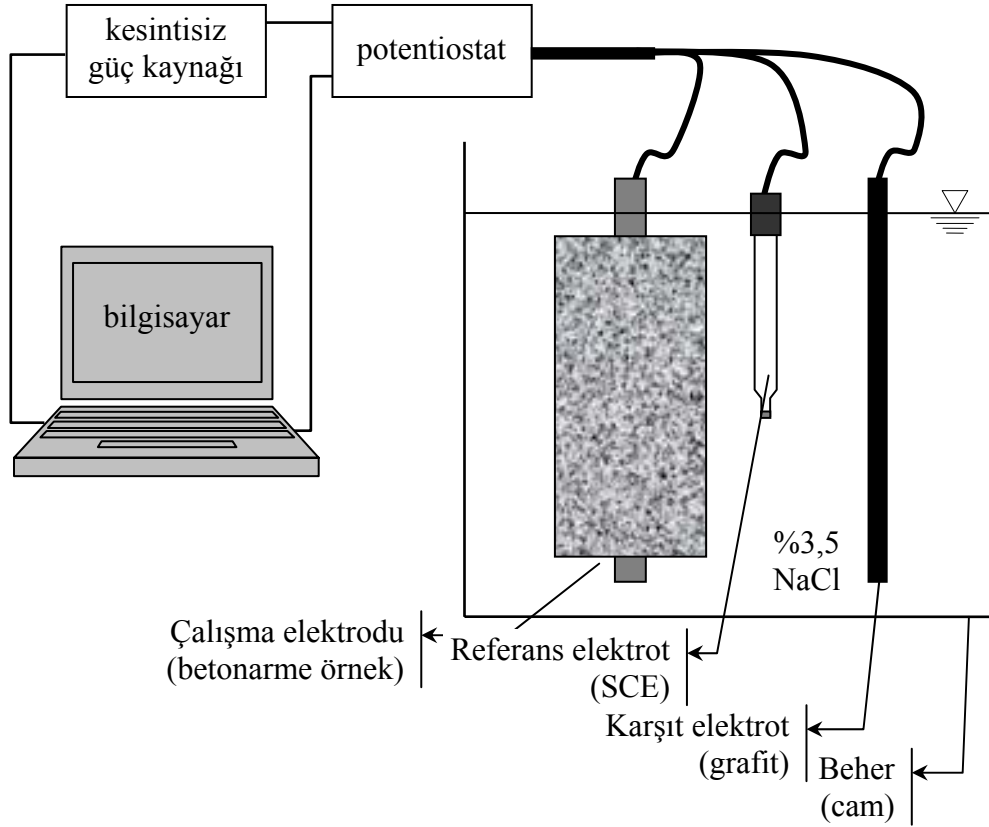


Şekil 6.17 Açıkta kalan donatıların ve prizma tabanlarının epoksi ile kaplanması.

Epoksi kaplama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler aynı kür ortamına geri bırakılmış ve korozyon analizlerinin yapıldığı zamana kadar bu ortamda saklanmıştır.

6.3.4 Korozyon Analizleri

Korozyon ölçümlerinde Gamry PCI4/750 Potentiostat kullanılmıştır. Sistemde elektrolitik ortam, sodyum klorür ve saf su kullanılarak hazırlanmış %3,5 NaCl çözeltisidir. Ortam sıcaklığı 20 °C'dir. Referans elektrot doygun kalomel elektrot (SCE) olup karşıt elektrot grafitir. Çalışma elektrodu ise T1-T7 kodlarına sahip analizi yapılan numunelerdir. Deneyler sırasında betonarme numuneler 175 günlüktür. Oluşturulan elektrokimyasal hücrenin şematik çizimi Şekil 6.18'de, fotoğrafı ise Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Şekil 6.18 Üç elektrotlu sistem ile korozyon deneyleri için deney düzeneği.



Şekil 6.19 Ölçümlerde kullanılan elektrokimyasal hücre.

Öncelikle deney yapılan numunelerin açık devre potansiyelleri belirlenmiştir. Çalışma elektrodunun potansiyeli, referans elektroda göre bir voltmetre ile ölçülmüştür. İkinci aşamada numunelere doğru akım ile anodik polarizasyon uygulanmıştır. Potansiyel değerleri olarak -1 V ile +1,5 V arasında, 0,2 mV/s tarama hızı ile polarizasyon eğrileri çıkarılmıştır.

Analizler sonucunda numunelerin korozyon potansiyelleri (E_{corr}), korozyon akım yoğunlukları (I_{corr}) ve korozyon hızları (CR) belirlenmiştir. Sonuçlar 7. bölümde sunulmaktadır.

6.4 İkinci Aşama Deneyler (Mineral Katkı, İnhibitör ve Yalıtım Uygulamalarının Donatı Korozyonuna Etkisi)

Beton kalitesinin donatı korozyonuna etkisinin belirlenmesi amacıyla iki farklı kalitede beton karışımları hazırlanmıştır. Normal dayanımlı beton 300 kg/m^3 çimento dozajı ile su/çimento oranı 0,65 olarak üretilirken, yüksek dayanımlı beton 0,40 su/çimento oranına sahip olup 400 kg/m^3 çimento ile üretilmiştir. Kontrol betonlarında (K) karışım kodlarında 300 sayısı normal dayanımlı betonu, 400 sayısı ise yüksek dayanımlı betonu temsil etmektedir.

Çalışmanın bu bölümünün bir diğer amacı, beton üretiminde kullanılan mineral katkıların korozyon olayına etkilerinin belirlenmesidir. Bu amaçla normal ve yüksek dayanımlı beton karışımlarında çimento yerine ağırlıkça %40 oranında uçucu kül veya %10 oranında silis dumanı kullanılarak betonlar hazırlanmıştır. 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 katkılu beton karışımlarında UK için %40, SD için %10 kullanım oranları seçilmiştir. 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 korozyon önleyici katkı malzemelerinin (inhibitör) kullanımının etkilerinin araştırılması amacıyla, yukarıda sözü edilen betonlarda (normal ve yüksek dayanımlı, mineral katkılu ve katkısız) kalsiyum nitrit esaslı inhibitör kullanılarak yeni numuneler üretilmiştir. Bu serilerde 20 lt/m^3 dozajında inhibitör kullanılmıştır. Ayrıca, kullanım dozajının etkisinin incelenmesi amacıyla, normal dayanımlı kontrol betonunda 0, 10, 20 ve 30 lt/m^3 oranlarında inhibitör kullanılarak yeni seriler hazırlanmıştır. İnhibitör kullanılmayan karışımlarda

kodlamaya herhangi bir numara yazılmazken, İ10, İ20 ve İ30 kodları sırasıyla 10, 20 ve 30 lt/m³ oranlarında inhibitör kullanımını belirtmektedir.

Betonarme elemanların çevre koşullarından yalıtılması, korozyonu engellemek için en etkili yöntem olarak kabul edilmektedir. Normal ve yüksek dayanımlı kontrol betonu karışımlarından hazırlanan numuneler çift bileşenli epoksi kaplama malzemesi ile yalıtım yapılarak donatı çeliğinin durumu izlenmiştir. Kodlamalarda Y harfi tüm numunenin epoksi ile kaplandığını ifade etmektedir.

Potansiyel dayanımının tespit edilmesi amacıyla tüm beton karışımlarından 3'er adet 10x10x10 cm boyutlarında küp numuneler alınmış ve 28. günde tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur.

Hızlı klor geçirimliliği deneyi sonuçları, betonun durabilitesi ve içine gömülü çelik donatıların klorür korozyonuna eğilimi açısından fikir verebilmektedir. Bu amaçla her beton karışımından 10 cm çapında ve 5 cm yüksekliğinde disk numuneler alınmıştır. İlgili kür periyodundan sonra "ASTM C 1202-97 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration" standardına göre test edilmiştir.

Yukarıda sözü edilen değişik özelliklere sahip betonlara gömülü çelik donatıların korozyon davranışı elektrokimyasal olarak izlenmiştir. Bu amaçla 7,5x7,5x16 cm boyutlu, ekseninde 20 cm uzunluğunda çelik donatı barındıran betonarme prizma numuneler hazırlanmıştır. Betonarme numunelerin bir bölümü standart kür ortamında saklanırken diğer bölümü ise, korozyon etkisine maruz bırakılmıştır. Kabinde %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisinde saklanan numunelerde korozyon gelişimi hızlandırılmaya çalışılmıştır.

Deneysel çalışmanın kapsamının özeti ve numune sayıları Tablo 6.7'de sunulmaktadır.

Tablo 6.7 İkinci aşama deneysel çalışma programı

Test Yöntemi	Korozyon Testi		Basınç Deneyi	Hızlı Klor Geçirimsizliği	Klor Penetrasyon Derinliği
Numune formu ve boyutları	Prizma (7,5x7,5x16 cm)		Küp (10x10x10cm)	Silindir (10/5 cm)	Silindir (10/10 cm)
Saklama yöntemi	Standart	Hızlı korozyon	Standart	Standart	Hızlı korozyon
Karışım kodu	Numune sayıları				
K/300	3	3	3	2	2
UK/300	3	3	3	2	2
SD/300	3	3	3	2	2
K/400	3	3	3	2	2
UK/400	3	3	3	2	2
SD/400	3	3	3	2	2
K/300/İ20	3	3	3	2	2
UK/300/İ20	3	3	3	2	2
SD/300/İ20	3	3	3	2	2
K/400/İ20	3	3	3	2	2
UK/400/İ20	3	3	3	2	2
SD/400/İ20	3	3	3	2	2
K/300	3	3	3	2	2
K/300/İ10	3	3	3	2	2
K/300/İ20	3	3	3	2	2
K/300/İ30	3	3	3	2	2
K/300/Y	3	3	-	2	2
K/400/Y	3	3	-	2	2

6.4.1 Malzemeler

Beton karışımlarında CEM I 42,5 tip çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 6.8’de verilmektedir.

Tablo 6.8 Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)		Basınç Dayanımı (MPa)	
CaO	63,310	2 günlük	22,0
SiO ₂	19,552	7 günlük	39,5
Al ₂ O ₃	5,914	28 günlük	47,4
Fe ₂ O ₃	2,115		
MgO	1,105		
Na ₂ O	0,189		
K ₂ O	0,786		
		Fiziksel Özellikler	
SO ₃	2,418	Kıvam suyu (%)	29,6
Cl	0,002	Priz başlangıcı (dakika)	150
(Na ₂ O) _e	0,710	Priz sonu (dakika)	185
LOI	2,140	Hacimsel stabilite (mm)	2
Serbest CaO	1,370	Blaine-özgül yüzey (m ² /kg)	368
Çözünmeyen kalıntı	0,210	Özgül ağırlık	3,08

Beton karışımlarında kullanılan uçucu kül C sınıfında olup Soma B Termik Santralinden elde edilen ve ilk aşamada kullanılan mineral katkıdır (Tablo 6.1).

Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı içeren karışımlar da hazırlanmıştır. Ticari olarak kullanılan bu mineral katkı, silis dumanı içeren toz beton katkısı olarak tanımlanmaktadır. Özellikleri Tablo 6.9'da verilmektedir.

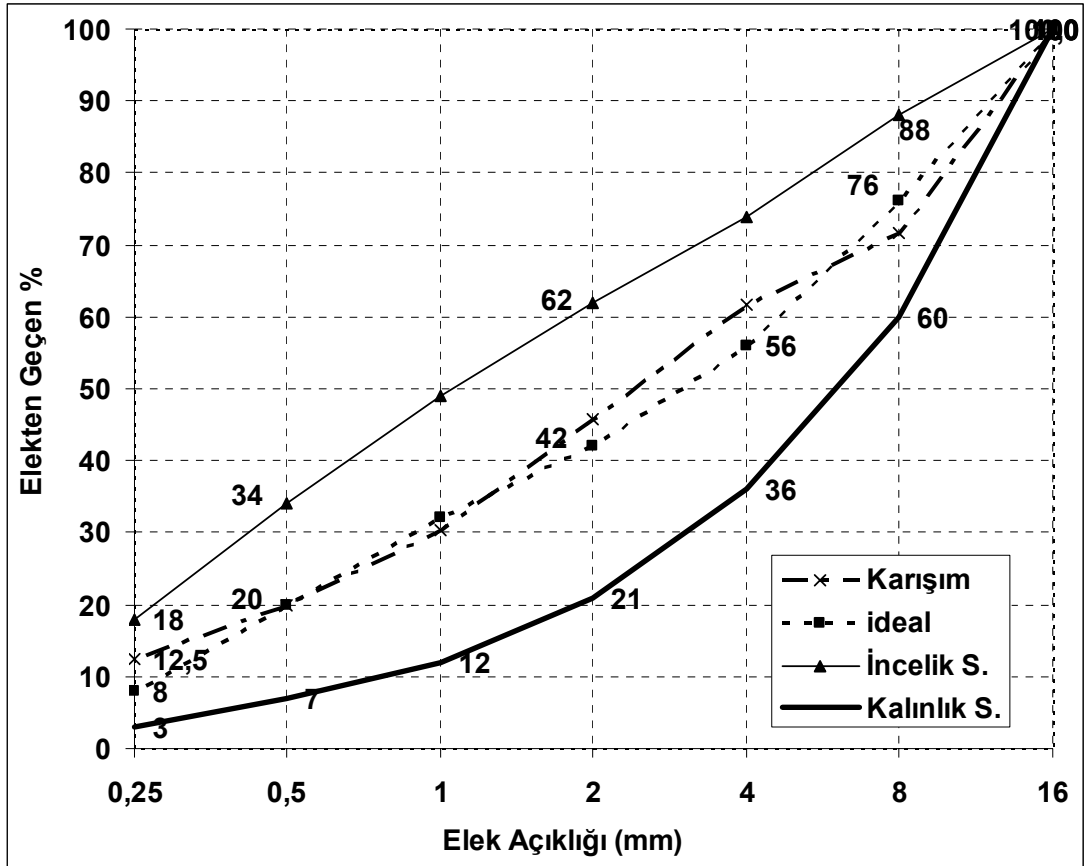
Karışımlarda agrega olarak birinci bölümde kullanılan kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Ancak, 0–5 mm ve 5–15 mm boyutlarındaki ince ve kaba agregalardan sırasıyla %65 ve %35 oranlarında kullanılmıştır. Karışımın granülometri eğrisi Şekil 6.20'de sunulmuştur.

Tablo 6.9 Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	(%)
CaO	1-2
SiO ₂	70-85
Al ₂ O ₃	2-5
Fe ₂ O ₃	1-2,5
MgO	4-8
Cr ₂ O ₃	1-4
Na ₂ O	-
K ₂ O	-
SO ₃	-
Cl	-
C	1-1,5
S	0,5-1,3
Kızdırma kaybı	<5
Serbest CaO	-
Çözünmeyen kalıntı	-

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

Betonarme elemanlarda kullanılan donatı çelikleri tempcore yöntemi ile üretilen ilk aşamada kullanılan donatıların aynısıdır. Nervürlü olarak imal edilen donatılar 16 mm çapındadır. Kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.3'de sunulmuştur.



Şekil 6.20 İkinci aşama deneylerde agrega karışımı granülometri eğrisi.

Değişken miktarlarda su/bağlayıcı madde oranlarına, bağlayıcı malzeme miktarlarına sahip beton karışımlarının, işlenebilirlik seviyelerinin yakın olması amacıyla karışımlarda süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Bu malzemenin 20 °C derecede yoğunluğu yaklaşık 1,023–1,063 gr/cm³ değerleri arasındadır. Klor içeriğinin %0,1 değerinden daha az olduğu belirtilmektedir. Açık yeşil renkte, homojen, sentetik polimer esaslı bir katkı malzemesidir. Katı madde oranı %40'tır. ASTM C 494 ve TS EN 934 ölçütlerine uymaktadır. Karışımlarda çökme değeri 10±2 cm hedeflenerek farklı dozajlarda kullanılmıştır.

Korozif ortamda betonarme donatısının paslanmasını önlemek/geciktirmek amacıyla karışımlar bir de inhibitör katkılı olarak hazırlanmıştır. Kullanılan inhibitör, kalsiyum nitrit esaslı sıvı formda bir katkı malzemesidir. Toplam ağırlığının en az %30'u aktif inhibitör malzemesidir. Tüm betonarme donatı tiplerinde kullanılabildiği

belirtilen bu katkı betonarme demirini koruyan pasif tabakanın korunmasını sağlar. Klorid iyonlarının saldırısı sonucu bozulan pasif tabakaya tekrar bu özelliğini kazandırır. ASTM C 494'e göre C tipi hızlandırıcı katkı malzemesidir. Betonun bir metreküpünde 5–30 lt arasında kullanılması tavsiye edilmektedir.

6.4.2 Beton Karışımları

Normal ve yüksek dayanımlı betonlara ait karışım oranları sırası ile Tablo 6.10 ve Tablo 6.11'de, çeşitli dozajlarda inhibitör kullanılan betonların karışım oranları ise Tablo 6.12'de verilmektedir.

Tüm karışımlarda, süperakışkanlaştırıcı ve inhibitör katkılarındaki su miktarı, net su/bağlayıcı madde oranı hesabında değerlendirmeye alınmıştır.

Tablo 6.10 Normal dayanımlı betonlar için karışım oranları

BİLEŞENLER	KARIŞIMLAR					
	K/300	UK/300	SD/300	K/300/İ20	UK/300/İ20	SD/300/İ20
Çimento (kg/m ³)	294	176	265	294	176	265
Uçucu kül (kg/m ³)	-	118	-	-	118	-
Silis dumanı (kg/m ³)	-	-	29	-	-	29
Su (lt/m ³)	189	189	189	171	172	171
0–5 (kg/m ³)	1180	1154	1174	1180	1154	1174
5–15 (kg/m ³)	644	630	640	644	630	640
Akışkanlaştırıcı (lt/m ³)	3,1	3,6	3,6	3,1	3,6	3,6
İnhibitör (lt/m ³)	-	-	-	20,0	20,0	20,0
S/B oranı	0,649	0,651	0,650	0,649	0,651	0,650
Klor içeriği (% bağlayıcı)	0,0043	0,0036	0,0042	0,0043	0,0036	0,0042
Çökme (cm)	9	10,5	8	8	8	6

Tablo 6.11 Yüksek dayanımlı betonlar için karışım oranları

BİLEŞENLER	KARIŞIMLAR					
	K/400	UK/400	SD/400	K/400/İ20	UK/400/İ20	SD/400/İ20
Çimento (kg/m ³)	400	240	360	400	240	360
Uçucu kül (kg/m ³)	-	160	-	-	160	-
Silis dumanı (kg/m ³)	-	-	40	-	-	40
Su (lt/m ³)	153	153	153	135	136	135
0-5 (kg/m ³)	1183	1147	1174	1183	1147	1174
5-15 (kg/m ³)	646	626	641	646	626	641
Akışkanlaştırıcı (lt/m ³)	7,3	8,4	8,4	7,3	8,4	8,4
İnhibitör (lt/m ³)	-	-	-	20,0	20,0	20,0
Net S/B oranı	0,393	0,395	0,395	0,393	0,395	0,395
Klor içeriği (% bağlayıcı)	0,0047	0,0042	0,0048	0,0047	0,0042	0,0048
Çökme (cm)	10	15	8	12,5	21	15

Tablo 6.12 Değişik oranlarda inhibitör katkısı içeren normal dayanımlı betonlar için karışım oranları

BİLEŞENLER	KARIŞIMLAR			
	K/300	K/300/İ10	K/300/İ20	K/300/İ30
Çimento (kg/m ³)	294	294	294	294
Uçucu kül (kg/m ³)	-	-	-	-
Silis dumanı (kg/m ³)	-	-	-	-
Su (lt/m ³)	189	180	171	163
0-5 (kg/m ³)	1180	1180	1180	1180
5-15 (kg/m ³)	644	644	644	644
Akışkanlaştırıcı (lt/m ³)	3,1	3,1	3,1	3,1
İnhibitör (lt/m ³)	-	10,0	20,0	30,0
Net S/B oranı	0,649	0,649	0,649	0,649
Klor içeriği (% bağlayıcı)	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043
Çökme (cm)	9	5	8	7

6.4.3 Numuneler ve Kür

Beton karışımlarının basınç dayanımlarının tespiti için 10 cm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır. Her karışımdan alınan numuneler standart kür (28 gün süre ile 20 °C kirece doymuş su) uygulamasına tabi tutulmuştur.

Korozyon analizleri için hazırlanan numuneler ilk aşamada olduğu şekilde 75x75x160 mm boyutlarında prizma örneklerdir. Prizma numunenin ekseninde 20 cm uzunluğunda 16 mm çapında donatı bulunmaktadır. Örneklerin hazırlanma süreci birinci aşamadaki deneyler ile aynıdır (Bölüm 6.3.2). Dökümden sonra numuneler 7 gün süre ile standart kür ortamında saklanmıştır. Kür süresinin ardından betonarme numunelerde açıkta kalan çelik donatılardaki korozyon ürünleri temizlenmiş ve prizma tabanları ile açığındaki donatılara epoksi kaplama yapılmıştır.

Hızlı klor geçirimsizliği deneyleri 10 cm çapında ve 5 cm yüksekliğinde disk örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dökümden sonra numuneler 7 gün süre ile standart kür ortamında saklanmış ardından 28. güne kadar laboratuvar ortamında havada bekletilmiştir.

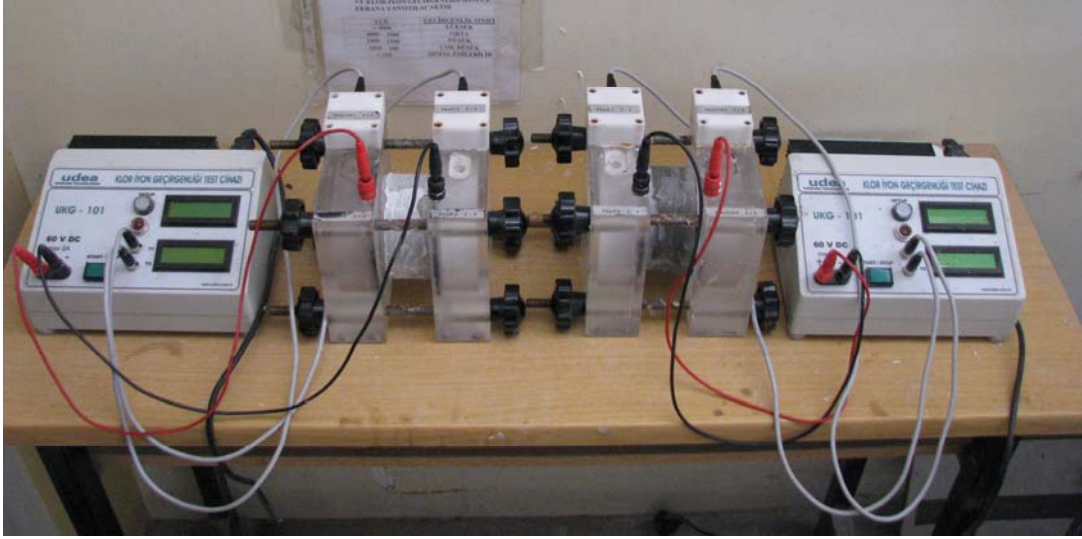
Klor penetrasyon derinliği ölçümleri 10 cm çapında ve 10 cm yüksekliğinde silindirik beton numuneler üzerinde belirlenmiştir. Bu örnekler, korozyon numuneleri ile birlikte hazırlanmış ve aynı kür periyodundan geçirilmiştir.

6.4.4 Ölçümler

Basınç dayanımının tespit edilmesi amacıyla 28 günlük 10 cm ayrıtlı küp numuneler üzerinde tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları 8. bölümde verilmektedir.

Hızlı klor geçirimsizliği deneyi 28 günlük disk numuneler üzerinde “ASTM C 1202–97 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” standardı esaslarına göre uygulanmıştır. Buna göre,

suya doygun hale getirilen numune test cihazının hücreleri arasına yerleştirilip, numune yan yüzeyleri geçirimsiz bir malzeme ile kaplanmıştır. Hücrelerin birinde %3 NaCl çözeltisi ve metal elektrot, diğerinde ise 0,3 N NaOH çözeltisi ve metal elektrot bulunmaktadır. Deney düzeneği Şekil 6.21’de görülmektedir.



Şekil 6.21 Hızlı klor geçirimliliği deney düzeneği.

Altı saat süre ile iki hücre arasında 60 V potansiyel uygulanmıştır. Test süresi boyunca beton diskten geçen elektrik yükü coulomb biriminde yarım saatte bir kümülatif olarak kaydedilmiştir. Deney verileri 8. bölümde sunulmaktadır.

Korozyon analizleri için hazırlanan prizma numunelerin yarısı 45. günde tekrar standart kür havuzuna bırakılmıştır. Kontrol numuneleri korozyon olmayan kirece doygun su ortamında saklanmıştır (Şekil 6.22). Örneklerin diğer yarısı ise, hızlandırılmış korozyon kabine konulmuş ve %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır (Şekil 6.23).



Şekil 6.22. Kirece doymun sudaki kontrol numunelerinin görünümü.



Şekil 6.23. Hızlandırılmış korozyon kabini.

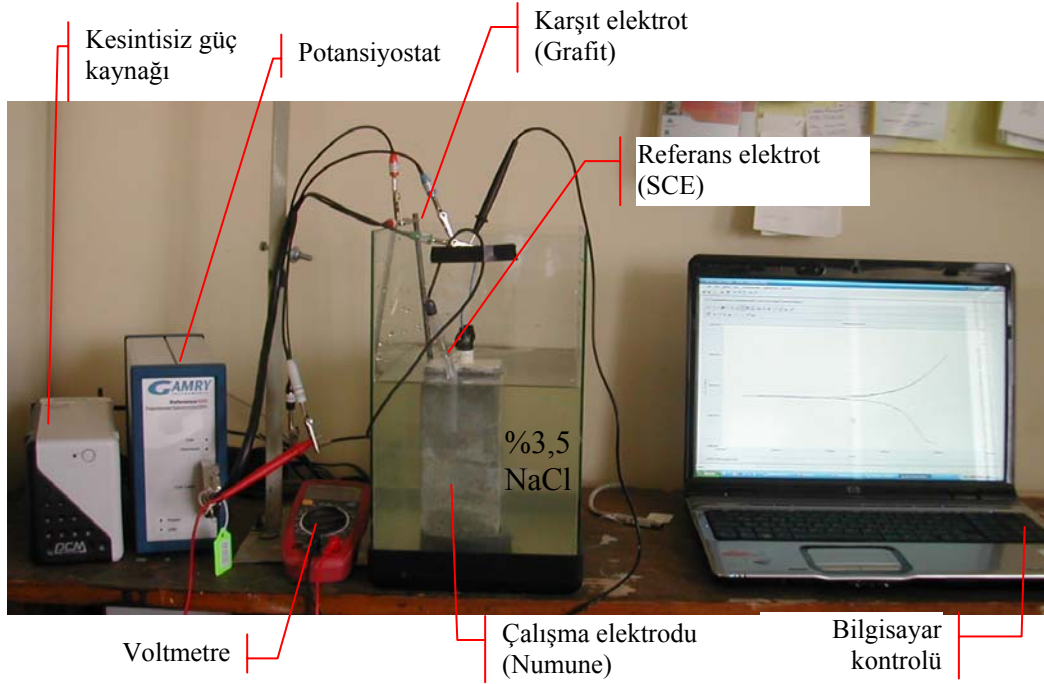
Hızlandırılmış korozyon kabinindeki numuneler %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Kabin içerisinde bir çevrim:

- 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)
- aşamalarından oluşmaktadır.

Tuzlu suda ıslanma-kuruma etkisine maruz numunelerin ilk ölçümleri, 5. çevrim sırasında ıslanma aşaması tamamlandıktan sonra doygun halde iken yapılmıştır. Kireçli suda bekleyen numunelerin ölçümleri ise bu zamana karşı gelen yaşta yapılmıştır.

Korozyon ölçümleri üç elektrotlu sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde Gamry REF600 Potentiostat/Galvonostat/ZRA sistemi kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı 20 °C'dir. Referans elektrot doygun kalomel elektrot (SCE) olup karşıt elektrot grafitir.

Hızlandırılmış korozyon etkisine maruz numunelerde (%3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma) korozyon hızlarının tespit edilmesine yönelik deneylerde elektrolitik ortam yine %3,5 NaCl çözeltisidir (Şekil 6.24).

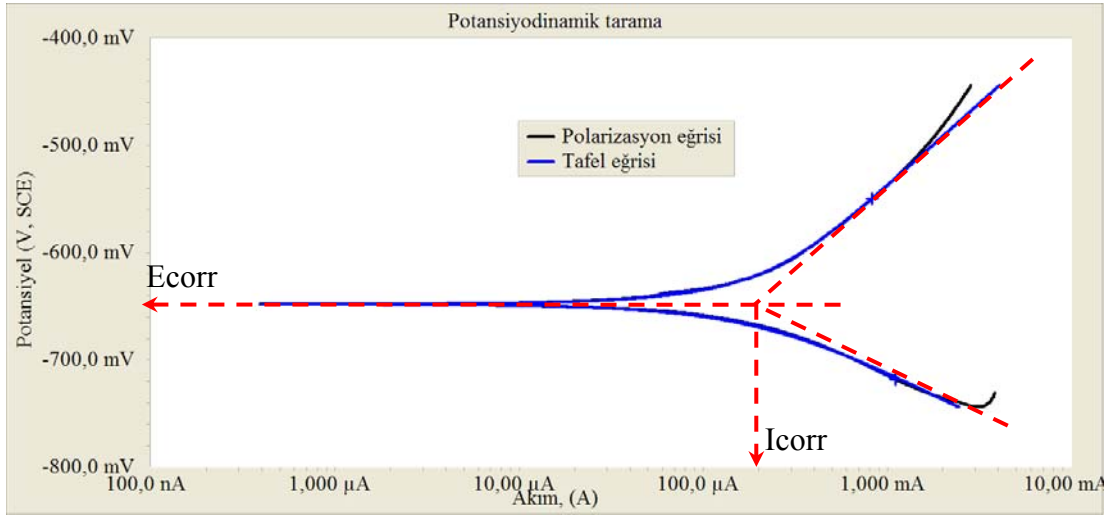


Şekil 6.24 Korozyon ölçüm sistemi.

Doymun kireç çözeltisinde saklanan numunelerin korozyon analizleri ise benzer şekilde doymun kireç çözeltisinde gerçekleştirilmiştir.

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 $\pm 150\text{mV}$ aralığında $0,2\text{mV/s}$ tarama hızı ile polarizasyon eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 6.25’de örnek bir eğri ve eğri üzerinde gerçekleştirilen ekstrapolasyon ile Tafel analizi görülmektedir.

Elde edilen elektrokimyasal verilerin Tafel analizleri sonucunda numunelerin, korozyon potansiyelleri (E_{corr}), korozyon akım yoğunlukları (I_{corr}) ve korozyon hızları (CR) belirlenmiştir.



Şekil 6.25 Betonarme numunelerde polarizasyon eğrisi ve Tafel analizi.

Klor işleme derinliğinin belirlenmesi için örnekler korozyon numuneleri ile benzer şekilde NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Çevrimler sonunda numuneler yarılarak klor penetrasyon derinlikleri tespit edilmiştir.

6.5 Üçüncü Aşama Deneyler (Uçucu Kül Ve Yüksek Fırın Cürufu Dozajı İle Kür Yönteminin Donatı Korozyonuna Etkisi)

Deneysel çalışmanın bu bölümünde betonda kullanılan mineral katkı tipinin ve kullanım miktarının donatı korozyonuna etkileri araştırılmıştır. Ayrıca, betona uygulanan değişik kür yöntemlerinin donatı korozyonuna etkileri incelenmeye çalışılmıştır.

Beton karışımlarında uçucu kül en yaygın olarak kullanılan mineral katkı olarak karışıma çıkmaktadır. Öte yandan deniz yapılarında veya klorür etkisine maruz kalacak betonarme yapılarda ise en yararlı mineral katkı yüksek fırın cürufudur. Çalışmanın bu bölümünde bu iki mineral katkı tipinin normal ve yüksek oranlarda bağlayıcı madde olarak kullanılmasının donatı korozyonuna etkileri incelenmiştir.

Değişik kür yöntemleri uygulanmış betonların farklı fiziksel yapıları sahip olması bilinen bir gerçektir. Uygulanan kürün etkinliğinin değişmesi ile bundan özellikle betonun boşluk yapısı etkilendiğinden, gömülü donatının korozyon performansı da değişecektir. Bu düşünceden hareketle, betona uygulanan kür yönteminin donatı korozyonuna etkisinin belirlenmesi bir diğer amaç olarak seçilmiştir.

Mineral katkı içermeyen kontrol betonunun yanı sıra, çimento yerine ikame olarak değişik oranlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı beton karışımlarından numuneler hazırlanmış, farklı kür yöntemleri ve farklı bekleme koşullarının ardından çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir.

Mineral katkı içermeyen kontrol karışımı “CTRL” harfleri ile kodlanmıştır. Karışımda uçucu kül bulunan numuneler “U” ile, yüksek fırın cürufu bulunan numuneler ise “C” ile simgelenmiştir. Karışım kodlarındaki sayılar ise çimento ağırlığına mineral katkı yüzdesini ifade etmektedir.

Ayrıca incelenen bir diğer değişken ise betonun kür yöntemidir. Yukarıda sözü edilen betonlar üretimlerinden sonra çeşitli şekillerde kür edilmiştir. Standart kür ve buhar kürü yapılmış numuneler ile hiç kür uygulaması yapılmamış beton ve betonarme elemanlar üretilerek içlerindeki donatıların korozyon davranışları incelenmiştir. Standart kür işlemi yapılmış numuneler “S”, buhar kürü yapılmış numuneler “B” ve havada bekletilmiş kürsüz numuneler ise “H” harfleri ile simgelenmiştir.

Mineral katkı tipi, oranı ve kür kombinasyonlarına karşı gelen her seriden numuneler değişik ortamlarda saklanmıştır. Havada ve kireçli suda bekleyen numuneler açık devre potansiyeli ölçümleri ile izlenirken sodyum klorür çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz numunelerde periyodik olarak korozyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneyler ve numune sayıları Tablo 6.13’de verilmektedir

Tablo 6.13 Yapılan deneyler ve numune sayıları

Test Yöntemi	Korozyon Testi			Basınç Deneyi	Hızlı Klor Geçirirliiği	Klor Penetrasyon Derinliiği
Numune formu ve boyutları	Prizma (75x75x160 mm)			Küp (100 mm)	Silindir (100/50 mm)	Küp (10x10x10cm)
Deney zamanı	Çeşitli zamanlarda			28 ve 150 gün	28 gün	Çeşitli zamanlarda
Bekleme koşulları	Korozyon kabini	Standart kür	Havada	-	-	Korozyon kabini
CTRL	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH
U15	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH
U30	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH
U45	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH
U60	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH
C15	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH
C30	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH
C45	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH
C60	4xS	2xS	2xS	3xS	2xS	2xS
	4xB	2xB	2xB	3xB	2xB	2xB
	4xH	2xH	2xH	3xH	2xH	2xH

6.5.1 Malzemeler

Tüm beton karışımlarında CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 6.14’de verilmektedir.

Tablo 6.14 Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal Kompozisyon, %		Fiziksel özellikler	
CaO	62,50	Özgül ağırlık	3,10
SiO ₂	19,65	Blaine-özgül yüzey (m ² /kg)	371,7
Al ₂ O ₃	4,38	45 µm elekte kalan, %	6,8
Fe ₂ O ₃	3,49	90 µm elekte kalan, %	0,7
MgO	2,39	Priz başlangıcı (sa:dk)	3:00
SO ₃	2,84	Priz sonu (sa:dk)	3:55
Cl	0,00	Hacimsel stabilite (mm)	1,00
LOI	2,90	Minerolojik bileşen	Miktar, %
Serbest CaO	1,68	C ₃ S	55,70
Çözünmeyen kalıntı	0,35	C ₂ S	14,32
Tayin edilemeyen	1,50	C ₃ A	5,70
LSF	0,97	C ₄ AF	10,62

Beton karışımlarında kullanılan uçucu külün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 6.15’de görülmektedir. Uçucu kül C sınıfında olup Soma B Termik Santralinden elde edilmiştir.

Karışımlarda kullanılan yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 6.16’da görülmektedir.

Tablo 6.15 Uçucu külün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal bileşim		Miktar
CaO	%	20,47
SiO ₂	%	47,15
Al ₂ O ₃	%	20,42
Fe ₂ O ₃	%	4,15
MgO	%	1,51
SO ₃	%	2,08
Na ₂ O	%	0,59
K ₂ O	%	1,36
Kızdırma Kaybı	%	0,97
Klorür	%	0,0149
F. CaO	%	1,2
Fiziksel özellikler		
45 Mikron Üzeri	%	38,4
90 Mikron Üzeri	%	17,8
Yoğunluk	gr/cm ³	2,15
Blaine	cm ² /gr	2922
Hacim Genleşmesi	mm	3
Mekanik özellikler		
7 Günlük Puzolanik Aktivite	%	74,88
28 Günlük Puzolanik Aktivite	%	82,95

Tablo 6.16 Yüksek fırın cürufunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal özellik	Miktar
Rutubet, %	7,00
Çözünmeyen Kalıntı, %	
SiO ₂ , %	39,62
Al ₂ O ₃ , %	11,54
Fe ₂ O ₃ , %	1,50
MgO, %	7,60
CaO, %	33,28
SO ₃ , %	
S=, %	0,64
Na ₂ O, %	
K ₂ O, %	
TiO ₂ , %	
Cl ⁻ , %	
Kızdırma Kaybı, %	0,90
Hidrolik indeks (CaO+1,40*MgO+0,56*Al ₂ O ₃)/SiO ₂	1,27
(CaO+MgO) / SiO ₂	1,03
(CaO) / SiO ₂	0,84

Betonarme elemanlarda kullanılan donatı çelikleri birinci ve ikinci aşamalardaki donatılardan farklıdır. Tempcore yöntemi ile nervürlü olarak imal edilen donatıların anma çapı 16 mm'dir. Donatılar, TS 708 Beton Çelik Çubukları standardına göre BÇ III-a sınıfındadır. Eksenel çekme deneyi sonuçlarına göre akma mukavemeti 511 MPa, çekme mukavemeti 605 MPa ve kopma uzaması %21'dir. Kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.17'de sunulmuştur.

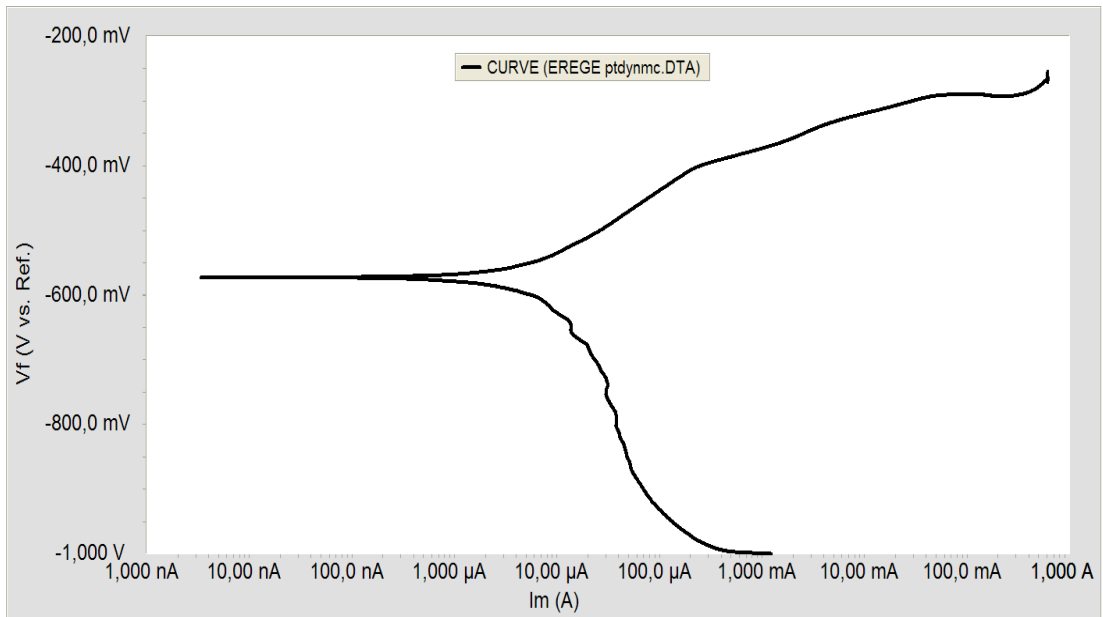
Tablo 6.17 Donatı çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Bileşen	Miktar (%)
C	0,150
Si	0,180
Mn	0,630
P	0,013
S	0,037
Fe	98,990

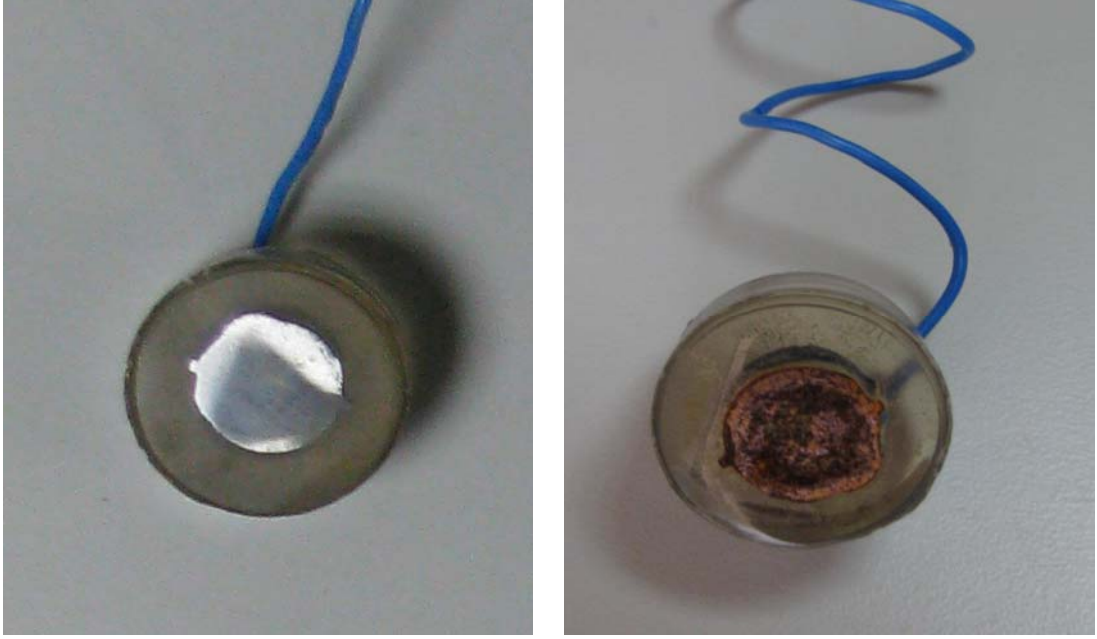
Yalın donatıların parlak kesit numuneleri üzerinden elde edilen polarizasyon eğrisi Şekil 6.26'da sunulmuştur.

Tafel analizi sonucunda, korozyon potansiyeli $E_{\text{corr}}=-573$ mV, korozyon akımı $I_{\text{corr}}=6,64$ μA , korozyon akım yoğunluğu $i_{\text{corr}}=3,303$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, anodik Tafel sabiti $\beta_A=114$ mV, katodik Tafel sabiti $\beta_C=216,6$ mV, $B=32,43$ mV değerleri elde edilmiştir.

Örneklerin deneyden önce ve sonraki görünüşleri Şekil 6.27'de verilmiştir.



Şekil 6.26 İkinci donatı tipinde parlak kesit üzerinden elde edilen polarizasyon eğrisi.



Şekil 6.27 İkinci tip donatıda parlak kesitlerin deneyden önce ve sonra görünüşleri.

Betonlarda kullanılan agregaların özellikleri birinci aşamadaki agregalar ile aynıdır. Agregaların özellikleri Tablo 6.2'den, karışım granülometrisi Şekil 6.6'dan görülebilir.

Beton karışımlarının işlenebilirlik seviyelerinin eşit olması amacıyla bazı karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Sentetik polimer esaslı katkı malzemesi TS EN 934-2 ölçütlerine uymaktadır. Yoğunluk değeri 1,023-1,063 g/cm³ arasında olup katı madde oranı %40'tır. Klor içeriğinin %0,1 değerinden daha az olduğu belirtilmektedir. pH değeri ise 6,5'dir. Karışımlarda çökme değeri 15±2 cm hedeflenerek farklı dozajlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

6.5.2 Beton karışımları

Normal dayanım sınıfında beton üretebilmek için kontrol karışımı 300 kg/m³ çimento içermekte olup, su/çimento oranı 0,65'tir. Kontrol karışımı, uçucu kül içeren karışımlar ve yüksek fırın cürufu içeren betonların karışım oranları Tablo 6.18 ve Tablo 6.19'da verilmektedir. Ayrıca ilgili tablolarda taze beton özellikleri de yer almaktadır.

Tablo 6.18 Uçucu kül içeren betonların karışım oranları

Bileşen	CTRL	U15	U30	U45	U60
Çimento, kg/m ³	300	255	210	165	120
Uçucu kül, kg/m ³	0	45	90	135	180
Su, kg/m ³	196	196	196	196	196
0-3, kg/m ³	888	880	872	864	857
5-15, kg/m ³	920	912	904	896	888
Akışkanlaştırıcı, kg/m ³	0,000	0,000	0,900	0,967	0,950
Toplam, kg/m ³	2304	2288	2273	2257	2242
Çökme, cm	14	13	16	16	18
Sıcaklık, °C	27	25	26	27	27
Hava içeriği, %	3,2	2,6	3,3	1,7	1,7

Tablo 6.19 Yüksek fırın cürufu içeren betonların karışım oranları

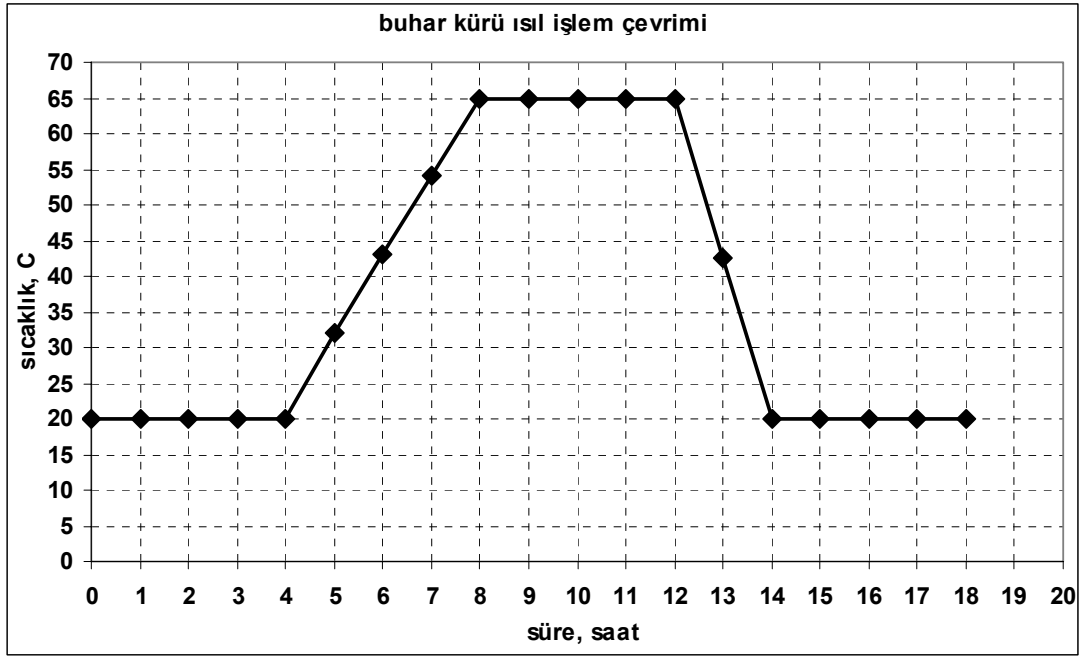
Bileşen	CTRL	C15	C30	C45	C60
Çimento, kg/m ³	300	255	210	165	120
Cüruf, kg/m ³	0	45	90	135	180
Su, kg/m ³	196	196	196	196	196
0-3, kg/m ³	888	886	884	882	880
5-15, kg/m ³	920	918	916	914	912
Akışkanlaştırıcı, kg/m ³	0,000	0,000	0,650	0,533	0,367
Toplam, kg/m ³	2304	2300	2297	2293	2288
Çökme, cm	14	13	17	15	15
Sıcaklık, °C	27	26	26	26	27
Hava içeriği, %	3,2	3,2	3,1	2,6	2,5

6.5.3 İncelenen Kür Yöntemleri

Çalışmada incelenen bir diğer değişken ise betonun kür yöntemidir. Yukarıda sözü edilen betonlar üretimlerinden sonra çeşitli şekillerde kür edilmiştir. Standart kür ve buhar kürü yapılmış numuneler ile hiç kür uygulaması yapılmamış beton ve betonarme elemanlar üretilerek korozyon davranışları incelenmiştir.

Standart kür numuneleri üretimlerinden sonra 24 saat kalıpta bekletilmiştir. Kalıptan çıktıktan sonra numuneler 6 gün süre ile 20 °C kirece doymun suda bekletilmiştir. Bu periyodun tamamlanmasının ardından numuneler kür havuzundan çıkarılarak laboratuvar ortamında havada bekletilmiştir. Standart kür uygulamasının bir hafta uygulanmasının sebebi şantiye ortamını laboratuvarında temsil edebilmektir. Pratik uygulamalarda kür uygulaması genellikle en çok bir hafta yapıldığından bu süre seçilmiştir.

Buhar kürü numuneleri ise üretimlerinin ardından 4 saatlik bir ön bekleme süresine tabi tutulmuştur. Daha sonra numuneler buhar kürü kabine konulmuştur. Kabin ortalama 11 °C/sa ısıtma hızı ile 65 °C' ye kadar ısıtılmış ve numunelere 4 saat 65 °C buhar kürü uygulaması yapılmıştır. Isıl işlemin ardından kabin kapakları açılmış ve termal şok oluşturmayacak şekilde laboratuvar ortam sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Isıl işlemde sıcaklık – zaman grafiği Şekil 6.28'de verilmiştir. Kalıptan alınan numuneler daha sonra laboratuvar ortamında saklanmıştır. Prefabrikasyonda sıkça uygulanan bir ısıl işlem çevrimi olması nedeni ile bu sıcaklık ve süreler seçilmiştir.



Şekil 6.28 Buhar kürü sıcaklık-zaman çevrimi.

Numunelerin bir bölümüne ise hiçbir kür işlemi uygulanmamıştır. Numuneler hazırlandıktan sonra laboratuvar atmosferinde 24 saat kalıpta bekletilmiştir. Kalıpları sökülen numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında saklanmıştır.

6.5.4 Yapılan Deneyler

Beton karışımlarının basınç dayanımlarının tespiti için 10 cm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır. Her karışımdan alınan numuneler ilgili kür uygulamasına tabi tutulmuştur. Karışımların basınç deneyleri 28. ve 150. günde yapılmıştır.

Hızlı klor geçirimsizliği deneyi ilgili kür periyodundan sonra “ASTM C 1202–97 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” standardına göre deneyler gerçekleştirilmiştir.

Beton karışımlarının pH değerleri, gömülü donatıya beton tarafından sağlanan kimyasal koruma seviyesinin bir göstergesi olmaktadır. Bu amaçla karışımların üretimlerinden itibaren pH değerleri takip edilmiş, böylelikle kimyasal koruma incelenmeye çalışılmıştır.

Taze betonların pH değerlerinin ölçümlerinde şu yöntem incelenmiştir: Beton pH değeri harç fazı ile ilgili olduğundan karışım reçetelerinden iri agrega çıkarılarak karışımlar tekrar hazırlanmıştır. Homojen bir karışım elde edilinceye kadara süren karıştırma işleminin hemen ardından HANNA marka portatif pH ölçer hazırlanan karışıma daldırılarak pH değeri kaydedilmiştir.

Sertleşmiş kontrol betonlarının ve mineral katkılı betonların pH değerleri ise numune parçalarından elde edilen tozlar üzerinde belirlenmiştir. Genç betonların pH değerleri 7. günde, 28. günde, çeşitli bekleme koşullarında (havada, suda ve NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma) saklanan betonların pH değerleri ise çeşitli yaşlarda ve çevrimlerde belirlenmiştir. Sertleşmiş betonun pH değerinin belirlenmesinde Ha ve diğerlerinin (Ha vd 2007) kullandığı yöntem izlenmiştir. Buna göre, normal ve mineral katkılı betonlardan alınan parçalar öğütülmüş ve 106 µm elekten elenmiştir. Daha sonra 10 g toz malzeme 100 ml distile su ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım 2 saat bekletilerek çözeltinin pH değeri portatif pH ölçer ile belirlenmiştir.

Sertleşmiş betonda boşluk miktarının tespit edilebilmesi için numunelerde su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Döküm ve kür işlemlerinin ardından 28.günde su emme değerleri belirlenmiştir. İki gün süre ile doymun hale getirilen numunelerin ağırlık tartımları kaydedildikten sonra örnekler yine iki gün süre ile 60 °C etüvde kurutularak kuru ağırlıkları alınmıştır. Deney sonuçları 9. bölümde verilmektedir.

Korozyon analizleri için hazırlanan donatılı beton numuneler 7,5x7,5x16 cm boyutlarında prizma örneklerdir. Örnek hazırlama aşaması önceki bölümleri ile benzerdir. Kür aşamasından sonra donatılara elektriksel bağlantı kabloları takılmış, ardından açıktaki donatılara epoksi kaplama yapılmıştır.

Kür aşamasını tamamlayan donatılı beton örnekler 28. günden sonra üç farklı bekleme koşulunda saklanmıştır. Numunelerin bir bölümü doymun kireç çözeltisine bırakılmıştır. Bir diğer bölüm ise laboratuvar ortamında havada bekletilmiştir. Bu iki seri numunelerde periyodik olarak açık devre potansiyeli değerleri kaydedilmiştir.

Üçüncü kısım örnekler ise hızlandırılmış korozyon etkisine tabi tutulmuştur. Hızlandırılmış korozyon kabiniindeki numuneler, %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Kabindeki çevrim süreleri ikinci aşamadaki çalışmalara benzer şekildedir. Koroziif ortamdaki numunelerde periyodik olarak korozyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

Korozyon ölçümleri Şekil 6.23'de görülen üç elektrotlu sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde ikinci aşamadaki ekipman ve hesaplarda yine aynı yöntem kullanılmıştır.

Ayrıca, korozyon numunelerine ek olarak beton karışımlardan 10 cm ayrıtlı küp numuneler alınarak, aynı kür periyotlarından geçirilmiştir.

Bu örneklerin bir bölümü ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmış ve çeşitli çevrim sayılarından sonra, küp örnekler bir eksenini doğrultusunda yarılarak klor penetrasyon derinlikleri tespit edilmiştir. Yöntemde kırılmış yüzeylere %0,2 konsantrasyonda $AgNO_3$ çözeltisi püskürtülür. Yönteme göre klorür ile kirlenmiş bölge gri renkte kalırken klorür içermeyen bölge kahverengi görünüm alır (Meck, Sirivivatnanon, 2003). Dış bölgedeki klorürlerce kirlenmiş bölgenin kalınlığı kumpas vasıtası ile ölçülür.

Küp örneklerin diğer bölümü ise atmosfer ortamında saklanarak karbonatlaşma derinliği ölçümlerinde kullanılmıştır. Benzer şekilde kür işlemi tamamlandıktan sonra havada bekletilen küp numuneler belirli günlerde yarılarak iki parçaya ayrılmıştır. Kırılmış yüzeye fenolftaleyn çözeltisi püskürtülmüş ve renk değişimi gözlenmiştir. Çekirdekdeki pembe renkli bölüm ($pH > 9,5$) henüz karbonatlaşmamış kısmı gösterirken, dış yüzeydeki renk değiştirmeyen ($pH < 9,5$) kısmın kalınlığı ölçülerek karbonatlaşma derinlikleri tespit edilmiştir.

Basınç dayanımı sonuçları, hızlı klor geçirimsizliği verileri, pH değerleri, su emme deney sonuçları, korozyon potansiyeli ve korozyon hızı değerleri, karbonatlaşma derinlikleri ve klor penetrasyon derinlikleri 9. bölümde verilmiştir.

6.6 Dördüncü Aşama (Paspayı Tabakası Kalınlığının Korozyona Etkisinin İncelenmesi)

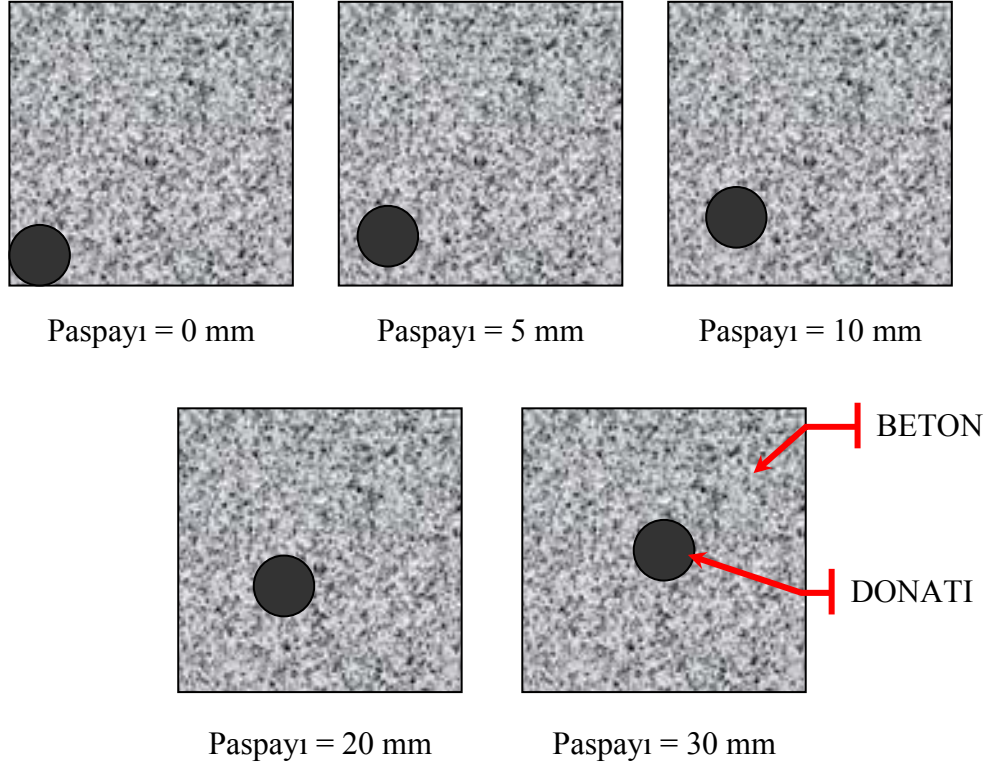
Bilindiği üzere paspayı tabakası donatıyı fiziksel olarak koruyan bir bariyerdir. Bu tabakanın kalınlığı ve geçirimsizliği donatıyı korumada en büyük iki etkidir.

Deneysel çalışmanın bu bölümünde, ilk üç bölümde sabit tutulan paspayı tabakası kalınlığının donatı korozyonuna etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Önceki bölümlerde paspayı tabakası kalınlığı sabit olarak 30 mm değerinde kullanılmıştır. Bu bölümde ise 0, 5, 10, 20 ve 30 mm paspayı tabakası kalınlığına sahip örnekler üretilerek içlerindeki donatılarda korozyon gelişimi incelenmiştir.

6.6.1 Malzemeler ve Yöntem

Dördüncü aşama olarak bu bölümde, üçüncü aşamadaki malzemeler (beton bileşenleri ve donatı) ve yöntemler kullanılmıştır. Beton karışımları, üçüncü aşamadaki kontrol betonu ile aynı olup herhangi bir mineral katkı içermemektedir. Kür yöntemi benzer şekilde 7 gün standart kür olarak uygulanmıştır.

Bu aşamada yalnızca betonarme numuneler üretilmiştir. Ancak örneklerin formlarında, paspayı tabakasının değişmesi gereği farklılıklar mevcuttur. Çeşitli paspayı tabakasına sahip örneklerin en kesitleri Şekil 6.29'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.29 Çeşitli paspayı kalınlıklarına sahip betonarme örneklerin şematik en kesit görünümü.

Örnekler, üçüncü aşamadakine benzer şekilde %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Çeşitli aşamalarda korozyon hızı değerleri ölçülmüş, deney bulguları 10. bölümde sunulmuştur.

BÖLÜM YEDİ

ÖN DENEME ÇALIŞMALARI SONUÇLARI

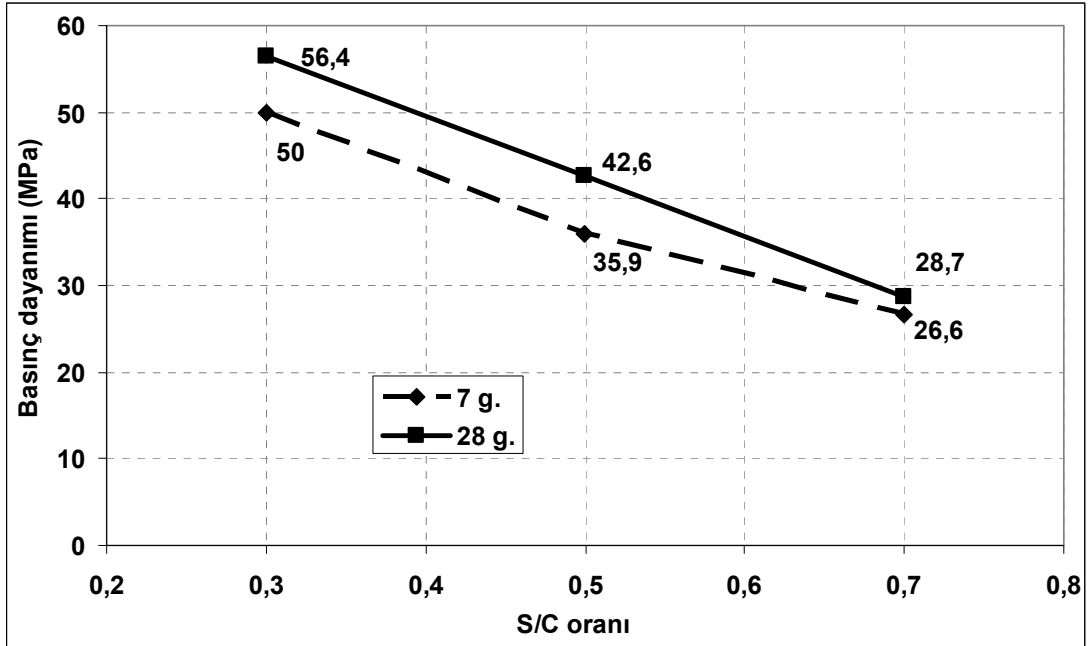
Ön deneme çalışmaları olarak nitelenen deneylerden elde edilen bulgular bu bölümde sunulmaktadır.

7.1 Beton Basınç Dayanımları

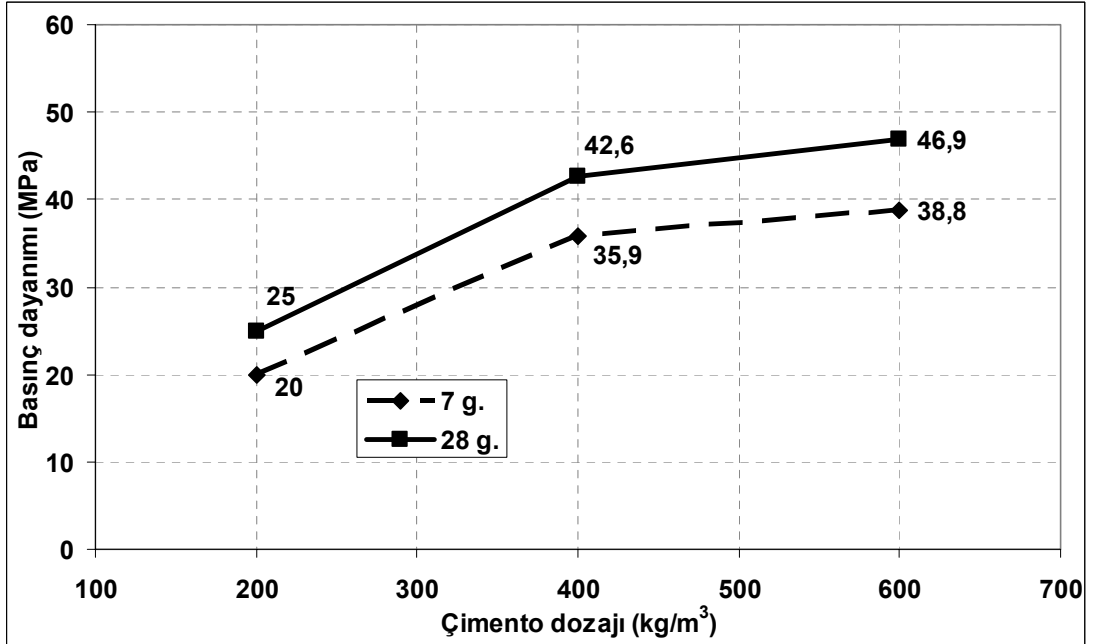
Hazırlanan karışımlardan korozyon ölçümleri için alınan örneklerin yanı sıra, betonların basınç dayanımlarının belirlenmesi için de numuneler alınmıştır. Basınç testlerinde kullanılan numuneler 100 mm ayrıtlı küp numunelerdir. Beton kalitelerinin belirlenmesi amacıyla korozyon testi numunelerinden farklı olarak standart küre maruz bırakılmışlardır. Tek eksenli basınç deneyleri 7. ve 28. günlerde yapılmış, deney sonuçları üçer numuneden elde edilen değerlerin ortalaması olarak verilmiştir.

Şekil 7.1’de su/çimento oranı değişkeninin incelendiği serinin basınç dayanımları görülmektedir. Grafik, beton basınç dayanımı için ortaya konan Abrams su/çimento oranı – basınç dayanımı kuralına tamamen uymaktadır. 7 günlük numunelerin basınç dayanımları 28 günlük numunelerin basınç dayanımlarının %84 - 93’ü mertebesindedir. Beton teknolojisinde yüksek kabul edilen bu oran, çimentonun R tipi erken dayanım kazanan ince bir çimento olmasından kaynaklanmaktadır.

Deney sonuçlarına göre bulunan beton basınç dayanımının çimento dozajı ile değişimi Şekil 7.2’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere karışımların çimento dozajı arttıkça basınç dayanımları da artmaktadır. Karışımında 200 kg/m³ çimento ile hazırlanan beton, hem yeterince bağlayıcı malzeme içermediğinden, hem de çok düşük işlenebilirliğe sahip olması sebebiyle tam olarak yerleştirilip sıkıştırılmadığından bünyesinde boşluklar içermekte ve dolayısıyla basınç dayanımları oldukça geride kalmaktadır.



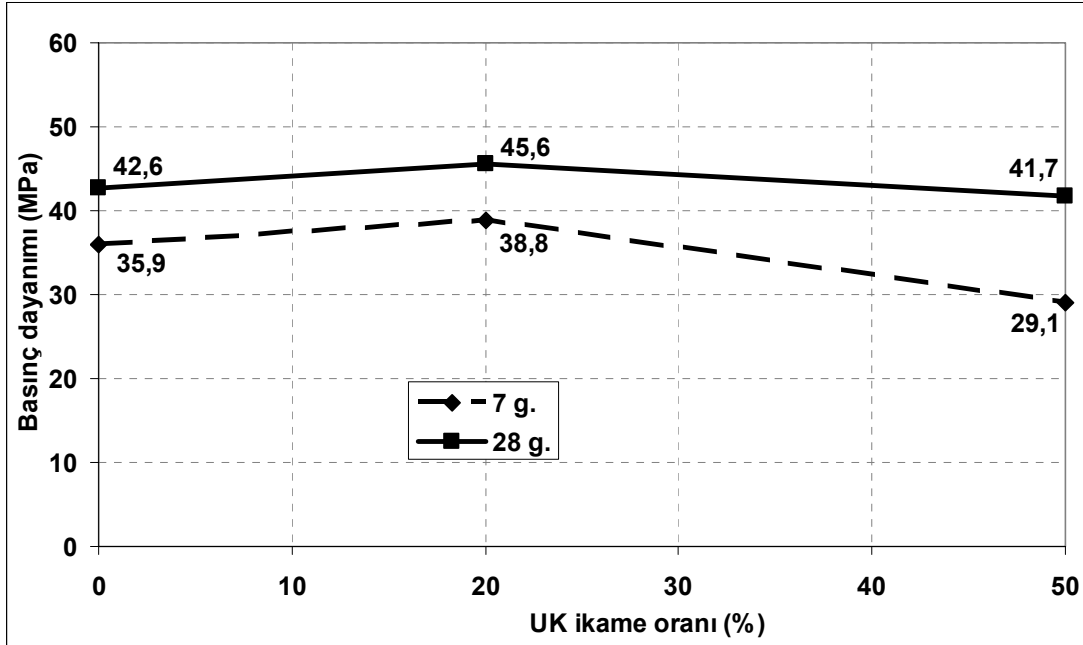
Şekil 7.1 Su/çimento oranı – basınç dayanımı ilişkisi.



Şekil 7.2 Çimento dozajı – basınç dayanımı ilişkisi.

Uçucu kül kullanımının beton basınç dayanımına etkisi Şekil 7.3'te görülmektedir. Çimentonun %20'si yerine UK kullanımı basınç dayanımlarını

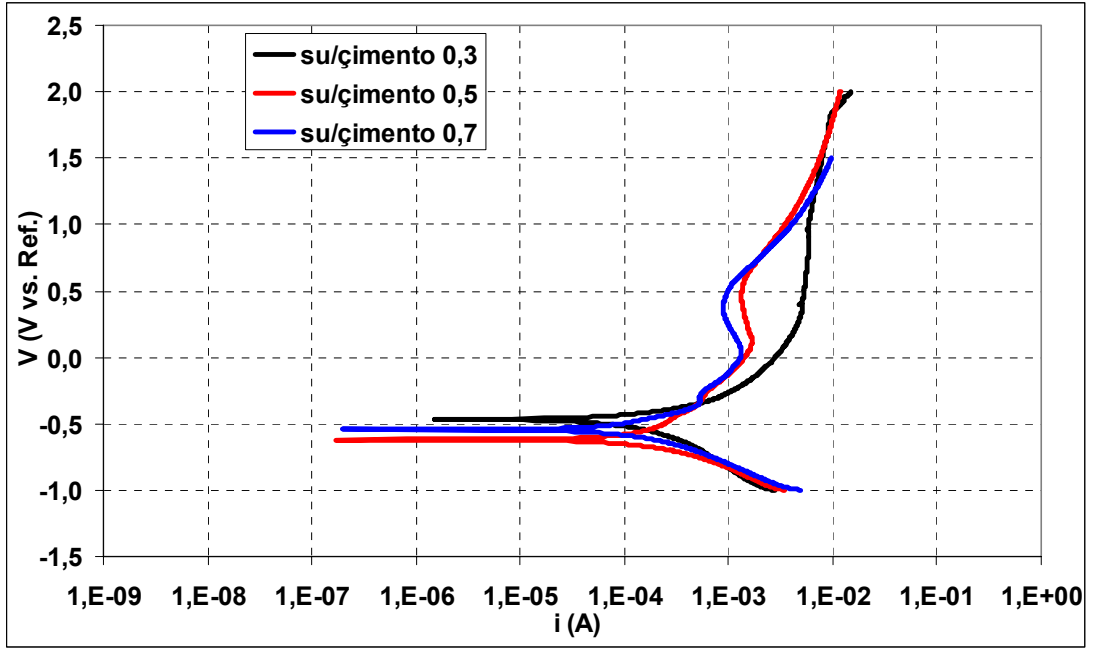
arttırmıştır. Karışımlarda %50 oranında UK kullanımı ile 28. günde kontrol numunelerine yakın basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Uzun dönemde gelişen puzolanik reaksiyonların sağladığı katkı %50 UK kullanım oranında daha belirgindir.



Şekil 7.3 Uçucu kül ikame oranı – basınç dayanımı ilişkisi.

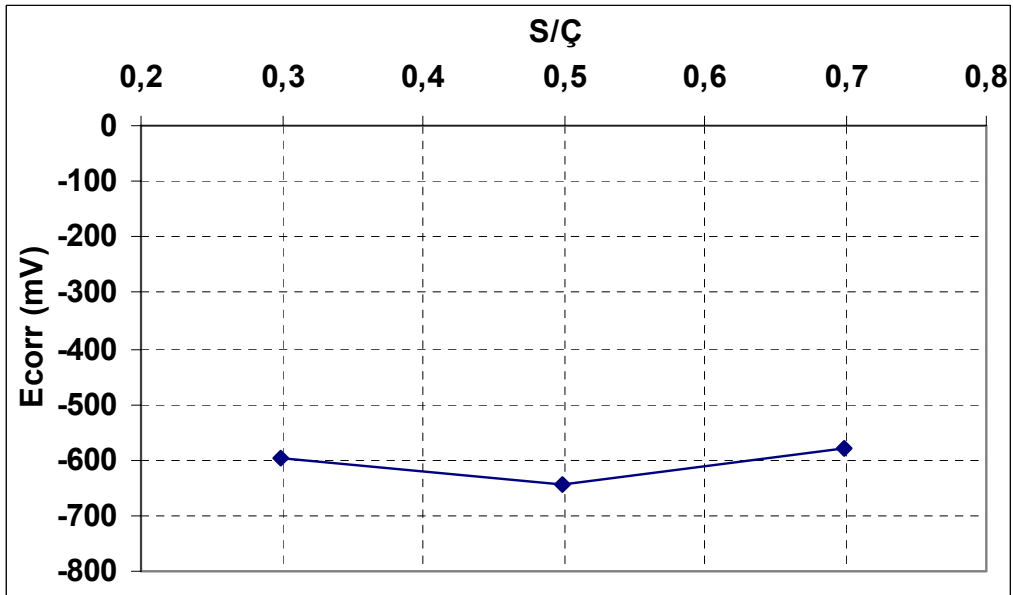
7.2 Su/Çimento Oranı Taramasından Elde Edilen Elektrokimyasal Veriler

Su/çimento oranı değişkeninin incelendiği seride, betonarme numunelerin %3,5 NaCl çözeltisindeki korozyon deneylerinde, anodik polarizasyon sonucunda elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 7.4'te verilmiştir.

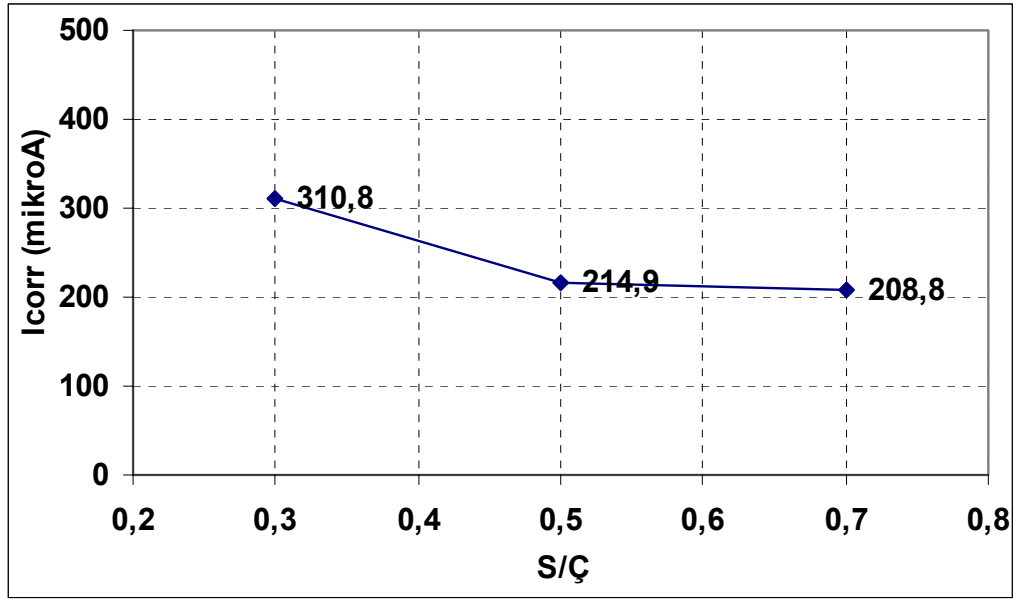


Şekil 7.4 S/Ç oranının incelendiği seride polarizasyon eğrileri.

Şekil 7.4'teki polarizasyon eğrilerinde Tafel Analizi ile hesaplanan korozyon potansiyeli değerleri Şekil 7.5'de, korozyon akım yoğunluğu değerleri ise Şekil 7.6'da sunulmaktadır.



Şekil 7.5 Betonarme numunelerde S/Ç oranı ile E_{corr}'nin değişimi.



Şekil 7.6 Betonarme numunelerde S/Ç oranı ile I_{corr} 'nin değişimi.

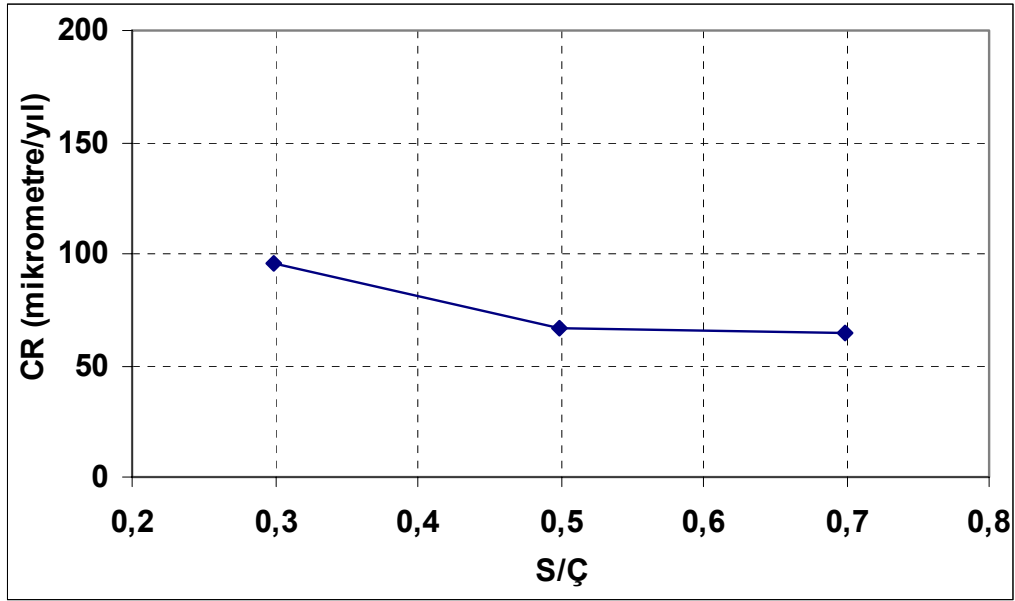
Korozyon akım yoğunluğu değerlerine karşı gelen korozyon hızı değerleri Denklem 7.1 ile hesaplanabilir:

$$CR = \frac{I_{corr} \cdot K \cdot EW}{d \cdot A} \quad (7.1)$$

Burada;

- CR : korozyon hızı (mm/yıl)
- I_{corr} : korozyon akımı (A)
- K : korozyon hızı sabiti (3272 mm/A.cm.yıl)
- EW : eşdeğer ağırlık (g/mol)
- d : yoğunluk (g/cm^3)
- A : örnek alanı (cm^2) olmaktadır.

Buna göre, betonarme numunelerde hesaplanan korozyon hızı değerleri Şekil 7.7'de grafik olarak verilmiştir.

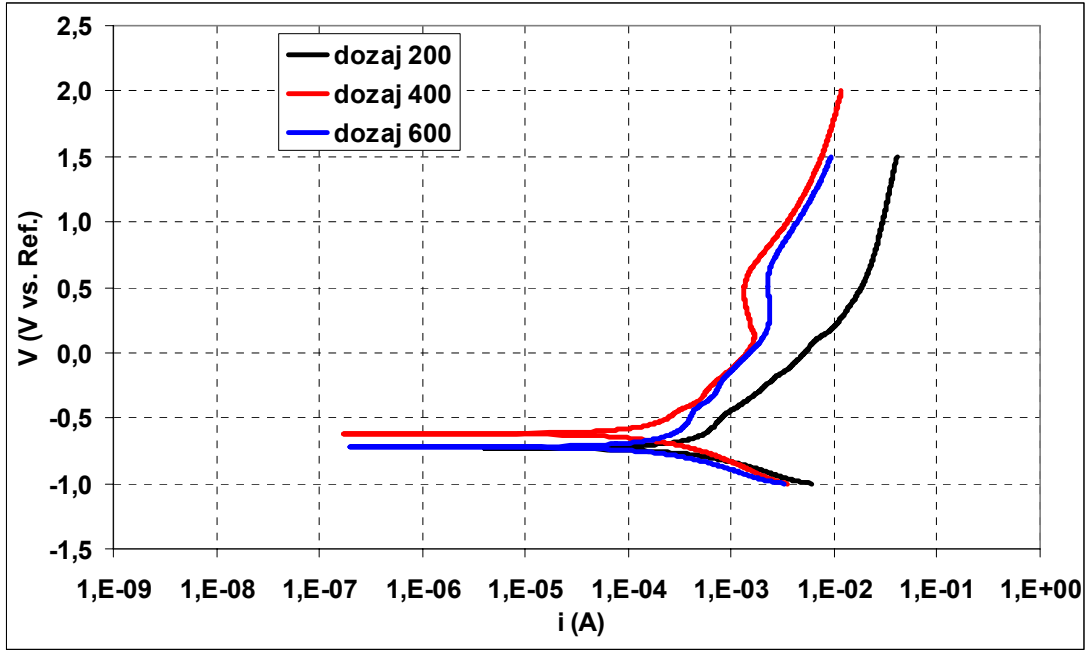


Şekil 7.7 Betonarme numunelerde S/Ç oranı ile korozyon hızının değişimi.

Taze halde iken yeterince sıkıştırılabilmiş düşük su miktarına sahip karışımların kompasitesi daha yüksek olacak ve içerisine gömülü betonarme donatısını fiziksel olarak daha iyi koruyacaktır. S/Ç oranının artması ile betonda boşluk miktarının artması ve fiziksel korumanın yavaş yavaş ortadan kalkması beklenir. Şekil 7.7'deki 0,3 su/çimento oranına sahip numunede diğerlerine kıyasla beklenenin aksine daha yüksek korozyon hızının ortaya çıkmasının sebebi olarak, işlenebilirliği çok düşük olan bu karışımda yetersiz sıkışma sonucu fiziksel korumanın etkisiz kaldığı düşünülmektedir.

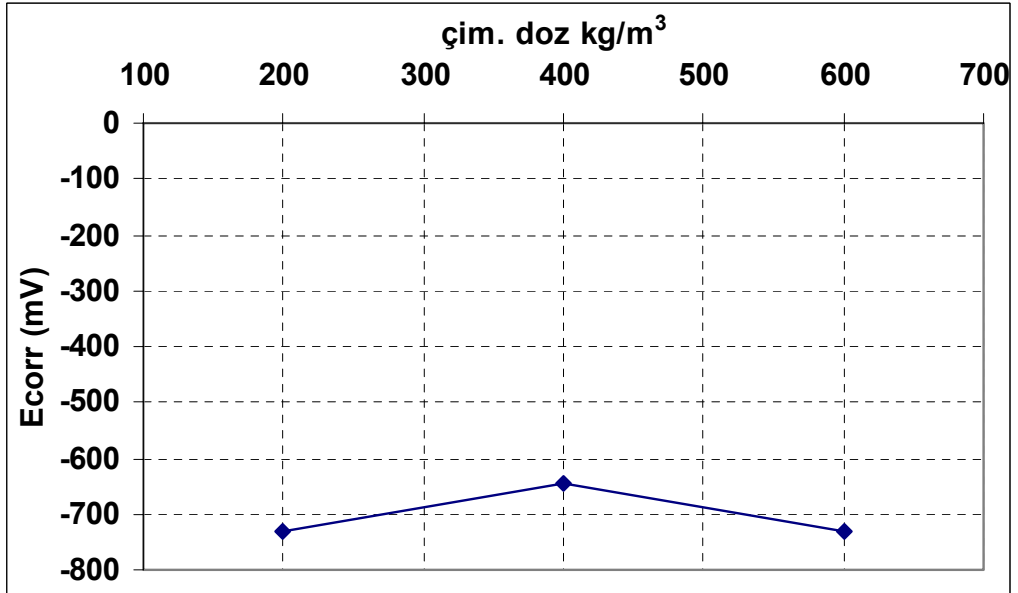
7.3 Çimento Dozajı Taramasından Elde Edilen Elektrokimyasal Veriler

Değişik dozajlarda çimento kullanılarak hazırlanan betonarme numunelerin %3,5 NaCl çözeltisindeki anodik polarizasyonu sonucunda elde edilen polarizasyon eğrileri Şekil 7.8'de verilmiştir.

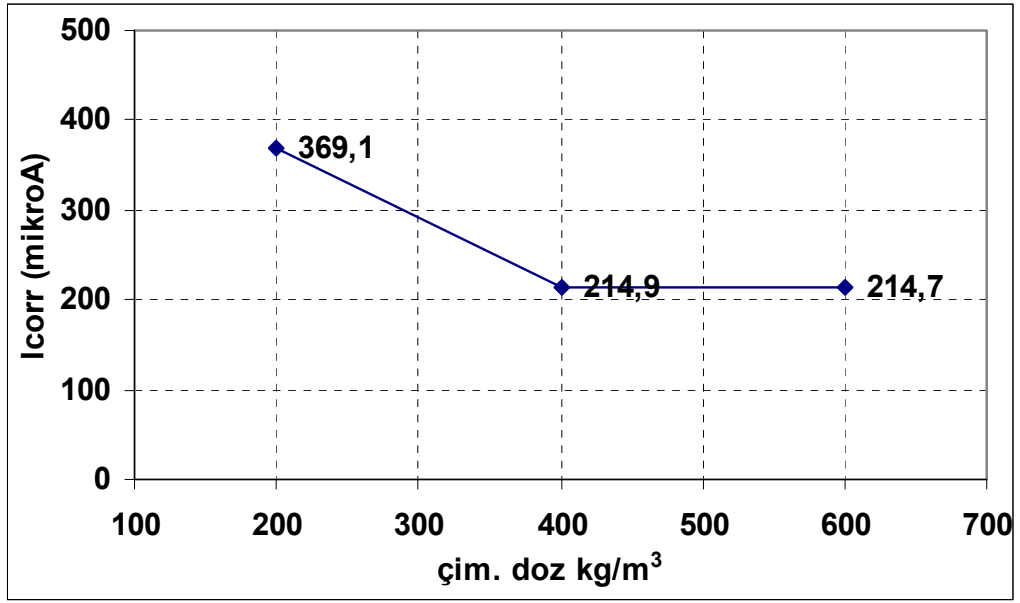


Şekil 7.8 Çimento dozajının incelendiği seride polarizasyon eğrileri.

Polarizasyon eğrilerinde Tafel Analizi ile hesaplanan korozyon potansiyeli değerleri Şekil 7.9'da, korozyon akım yoğunluğu değerleri ise Şekil 7.10'da sunulmaktadır.

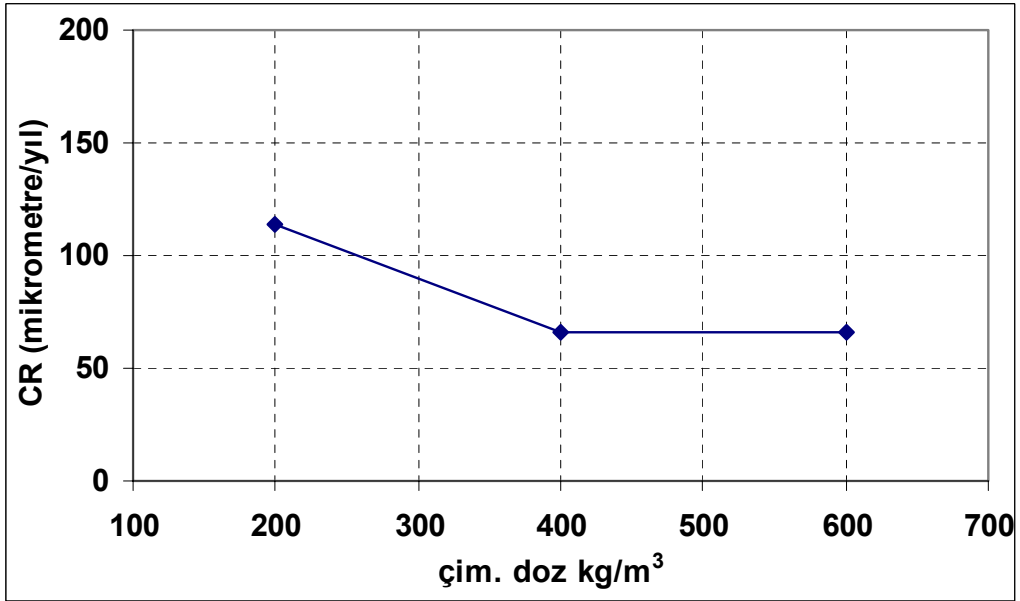


Şekil 7.9 Betonarme numunelerde çimento dozajı ile E_{corr}'nin değişimi.



Şekil 7.10 Betonarme numunelerde çimento dozajı ile I_{corr} 'nin değişimi.

Korozyon akım yoğunluğu değerlerine karşı gelen korozyon hızı değerleri Şekil 7.11'de grafik olarak verilmiştir.



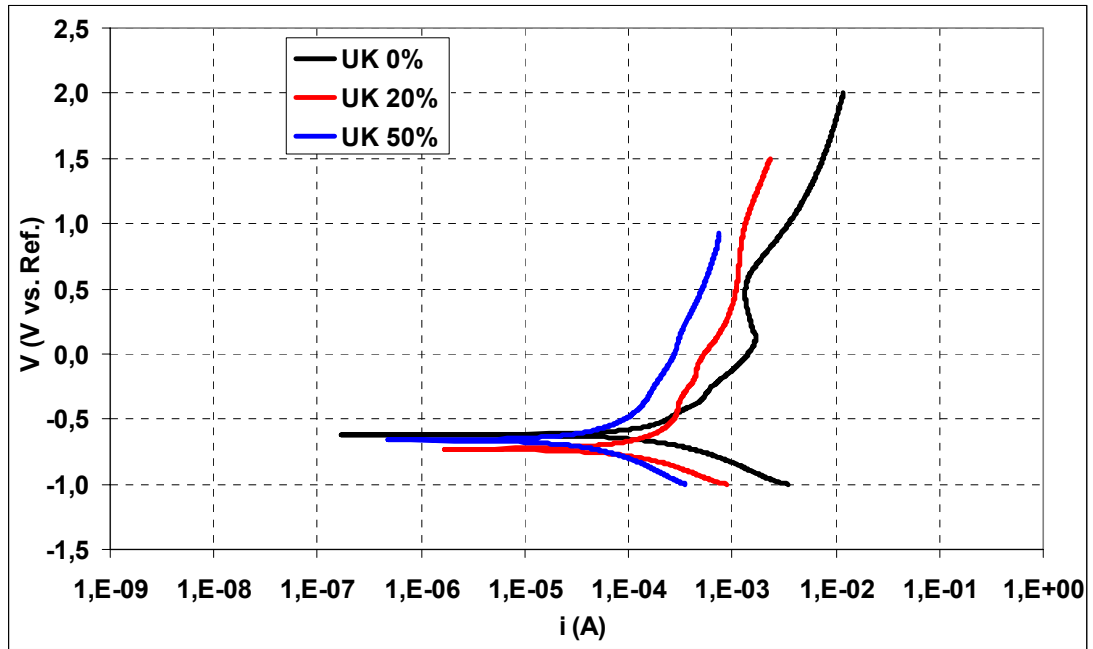
Şekil 7.11 Betonarme numunelerde çimento dozajı ile korozyon hızının değişimi.

200 kg/m³ çimento dozajı ile üretilmiş numunede beklendiği üzere yüksek bir korozyon hızı elde edilmiştir. Bu yüksek korozyon hızının sebebinin düşük

seviyelerde fiziksel ve kimyasal koruma olduğu düşünülmektedir. Yetersiz miktarda bağlayıcı malzeme içeren bu karışım oldukça boşluklu bir yapıya sahiptir (Şekil 6.10). Gömülü donatı tam olarak sarılamadığından beton tarafından korunamamaktadır.

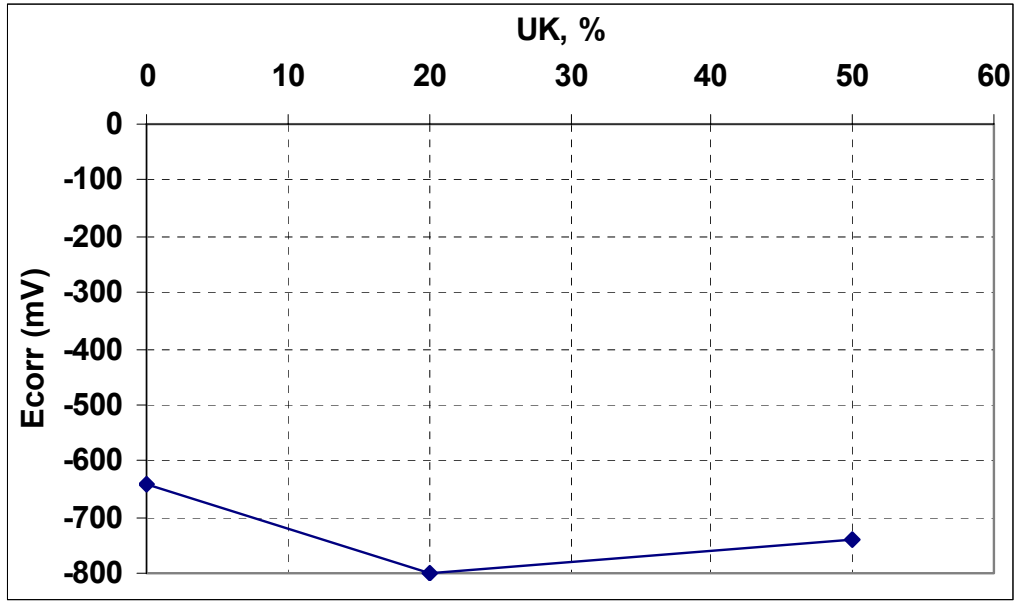
7.4 Uçucu Kül Kullanımından Elde Edilen Elektrokimyasal Veriler

Beton karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak tamamen çimento kullanılan ayrıca çimentonun %20 ve %50'si yerine UK kullanılarak hazırlanan betonarme numunelerin %3,5 NaCl çözeltisindeki polarizasyon eğrileri Şekil 7.12'de gösterilmiştir.

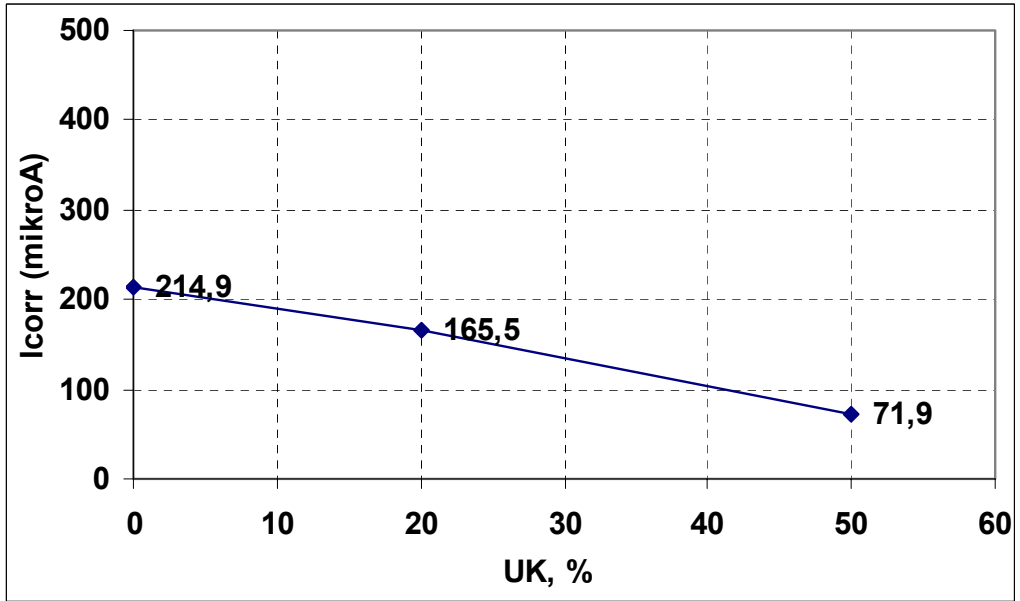


Şekil 7.12 UK kullanımının incelendiği seride polarizasyon eğrileri.

Tafel Analizi ile hesaplanan korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu değerleri sırasıyla Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'te sunulmaktadır.

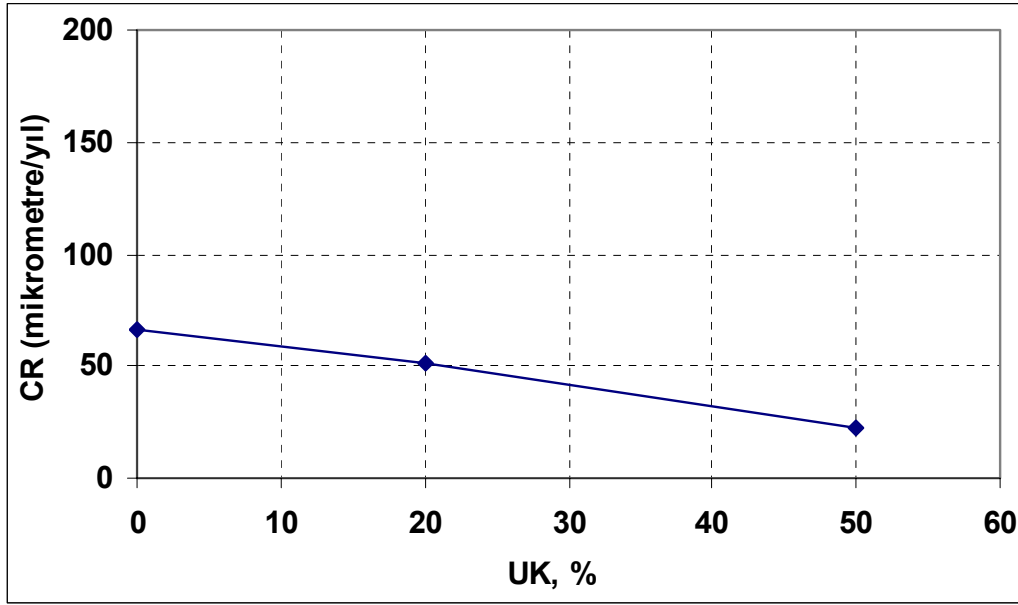


Şekil 7.13 Betonarme numunelerde UK kullanımı ile E_{corr} 'nin değişimi.



Şekil 7.14 Betonarme numunelerde UK kullanımı ile I_{corr} 'nin değişimi.

Korozyon akım yoğunluğu kullanılarak hesaplanan korozyon hızı değerleri Şekil 7.15'de grafik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.15 Betonarme numunelerde UK kullanımı ile korozyon hızının değişimi.

Beton karışımlarında uçucu kül kullanımına bakıldığında, kullanılan uçucu kül miktarı arttıkça korozyon hızlarının azaldığı görülmektedir (Şekil 7.15). Bu noktada etkili mekanizmanın, kullanılan uçucu külün betonun boşluk yapısını geliştirdiği ve betonun elektriksel direncini artırarak donatıdaki korozyon hızını azaltmış olması düşünülmektedir.

7.5 Değerlendirme

İlk aşamadaki deneysel programda, betondaki su/çimento oranının, karışımlarda kullanılan çimento dozajının ve mineral katkı kullanımı açısından uçucu kül miktarının, donatı çeliğinin başlangıç korozyon performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre;

- Düşük su/çimento oranına sahip numunelerde beklenenin aksine daha yüksek korozyon hızının ortaya çıkmasının sebebi olarak, işlenebilirliği çok düşük olan bu karışımlarda yetersiz sıkışma sonucu fiziksel korumanın etkin olmadığı düşünülmektedir. Söz konusu karışımın basınç dayanımı yüksek

olmasına rağmen, donatıdaki korozyon performansı açısından geride kalmıştır. Bu durum paspayı tabakasının kalınlığının yanı sıra kalitesinin diğer bir deyişle geçirimsizliğinin önemini ortaya koymaktadır.

- Zengin çimento içerikli karışımlarda fiziksel ve kimyasal koruma üst seviyededir. Çimento açısından zayıf karışımlarda gömülü donatı tam olarak hamurla sarılamadığından beton tarafından korunamamaktadır.
- Mineral katkı olarak kullanılan uçucu külün puzolanik reaksiyonlar sonucu betonun boşluk yapısını iyileştirdiği, betonun elektriksel direncini artırarak donatıdaki korozyon hızını azalttığı düşünülmektedir.
- Yöntem betonarme elemanlardaki donatıların korozyon gelişiminin ölçümü için uygundur. Yapılan ölçümlerden elde edilen değerler literatürde verilen değerler ile paralellik göstermektedir. Yöntemin betonarme elemanlar için kullanılabilirliği anlaşılmıştır.

BÖLÜM SEKİZ
MİNERAL KATKI, İNHİBİTÖR VE YALITIM UYGULAMALARININ
DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ

İkinci aşamada gerçekleştirilen deneylerden elde edilen bulgular bu bölümde sunulmaktadır. Korozyona karşı normal ve yüksek performanslı beton kompozisyonunda değişik iki mineral katkı kullanımı ile inhibitör ve yalıtım uygulamalarının sonuçları devam eden bölümlerde sunulmuştur.

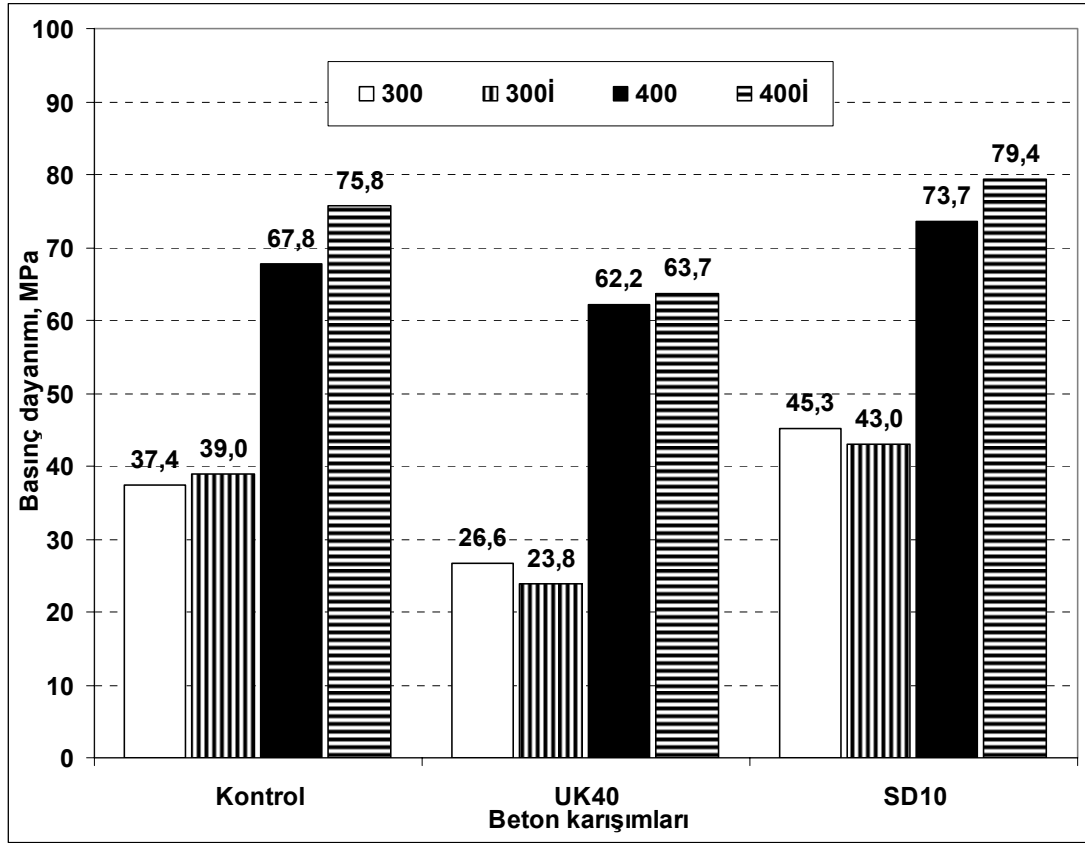
8.1 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Hazırlanan tüm karışımlara ait 28 günlük 10 cm ayrıtlı küplerin basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1 Beton karışımlarının 28 günlük basınç dayanımları

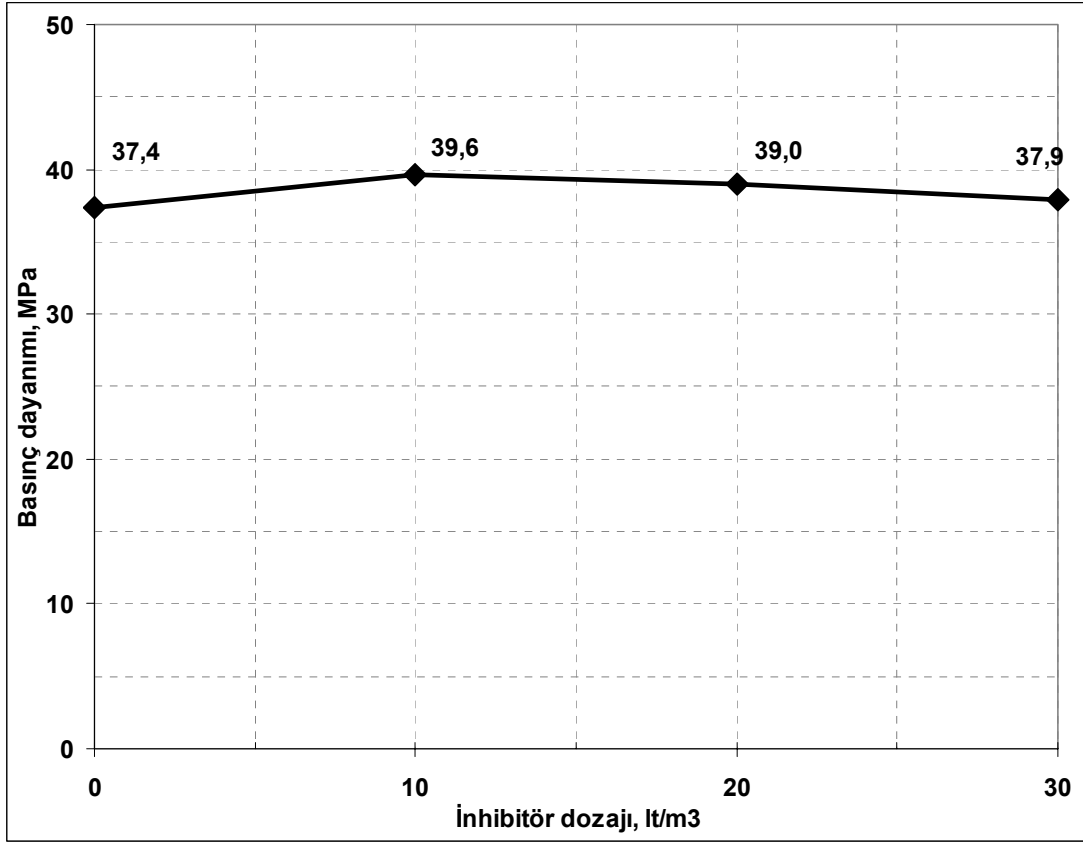
Normal betonlar		Yüksek performanslı betonlar	
Karışım kodu	Basınç dayanımı, MPa	Karışım kodu	Basınç dayanımı, MPa
K/300	37,4	K/400	67,8
UK/300	26,6	UK/400	62,2
SD/300	45,3	SD/400	73,7
K/300/İ20	39,0	K/400/İ20	75,8
UK/300/İ20	23,8	UK/400/İ20	63,7
SD/300/İ20	43,0	SD/400/İ20	79,4
K/300	37,4	-	-
K/300/İ10	39,6	-	-
K/300/İ20	39,0	-	-
K/300/İ30	37,9	-	-

Normal ve yüksek dayanımlı olarak hazırlanan betonların basınç mukavemeti değerleri Şekil 8.1’de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, karışımlarda uçucu kül kullanımı basınç dayanımını bir miktar azaltmıştır. Bu azalmanın uçucu kül kullanım oranının yüksek olması (%40) ve puzolanik reaksiyonların henüz tamamlanmamış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Karışımlarda %10 oranında silis dumanı kullanımının ise beton basınç dayanımlarını arttırdığı gözlenmiştir. Bu artış silis dumanının sağladığı gerek puzolanik reaksiyonlar gerekse boşluk doldurma (filler) etkisi ile erken yüksek mukavemetten kaynaklanmaktadır.



Şekil 8.1 Normal ve yüksek dayanımlı karışımların basınç dayanımı değerleri.

Öte yandan beton karışımlarında sabit olarak 20 lt/m^3 oranında korozyon inhibitörü kullanımı basınç dayanımı değerlerini genellikle çok az arttırmıştır. Korozyon inhibitörü kullanım oranı kontrol betonunun basınç dayanımı ilişkisi Şekil 8.2’de görülmektedir



Şekil 8.2 İnhibitör dozajı ile kontrol betonunun basınç dayanımı ilişkisi.

İnhibitör kullanımı ile mineral katkılı seriler için de genelde basınç dayanımlarının çok az arttığı, bu artışın önemli mertebede olmadığı gözlenmiştir. Kullanılan inhibitörün hızlandırıcı etkisinin bu artışı sağladığı düşünülmektedir.

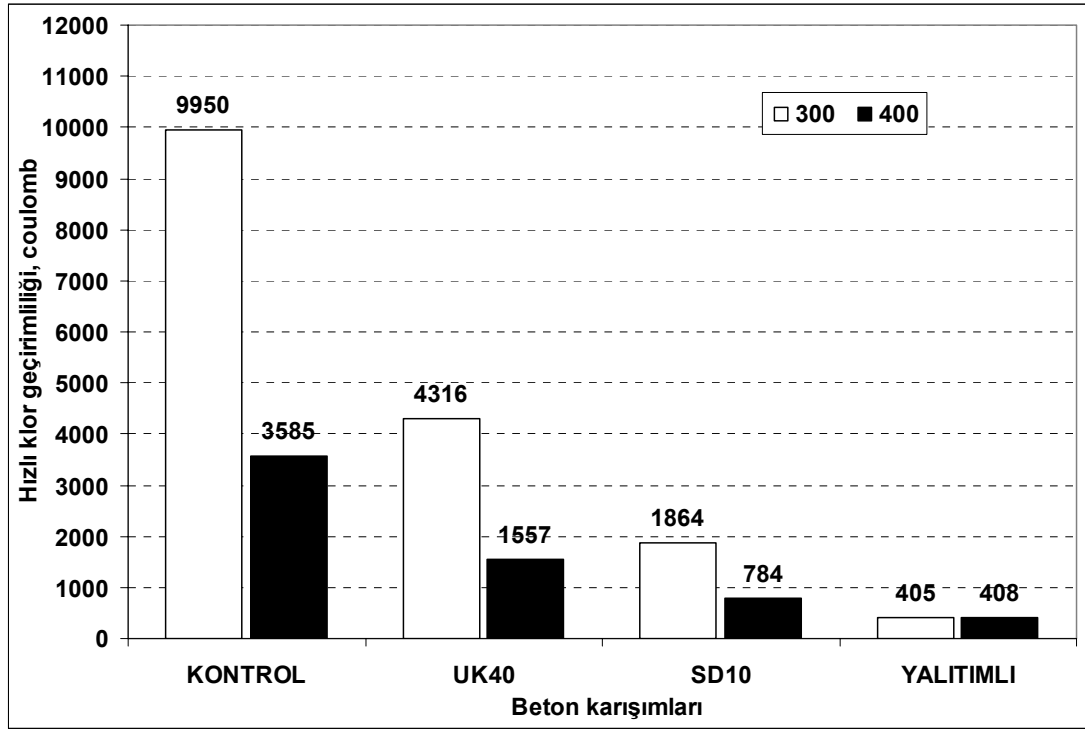
8.2 Hızlı Klor Geçirimsizliği Deneyi Sonuçları

Beton karışımlarında ASTM C 1202'ye göre yapılan 6 saatlik hızlı klor geçirimsizliği deney sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda kontrol, mineral katkılı, inhibitörlü ve yalıtımlı örneklerin test sonuçları Tablo 8.2'de topluca sunulmuştur.

Tablo 8.2 Beton numunelerin hızlı klor geçirimsizliği değerleri

Normal betonlar		Yüksek performanslı betonlar	
Karışım kodu	Hızlı klor geçirimsizliği, coulomb	Karışım kodu	Hızlı klor geçirimsizliği, coulomb
K/300	9950	K/400	3585
UK/300	4316	UK/400	1557
SD/300	1864	SD/400	784
K/300/İ20	8686	K/400/İ20	3339
K/300/Y	405	K/400/Y	408
UK/300/İ20	11514	UK/400/İ20	6368
SD/300/İ20	5020	SD/400/İ20	993
K/300	9950	-	-
K/300/İ10	8672	-	-
K/300/İ20	8686	-	-
K/300/İ30	13697	-	-

İnhibitör kullanılmayan normal ve yüksek dayanımlı karışımların hızlı klor geçirimsizliği deney sonuçları Şekil 8.3'te görülmektedir. Normal dayanımlı betonlarda, kontrol betonlarına göre %40 oranında uçucu kül kullanımı hızlı klor geçirimsizliği değerlerini %57, %10 oranında silis dumanı kullanımı ise hızlı klor geçirimsizliği değerlerini %81 oranında azaltmıştır. Yüksek dayanımlı betonlarda kontrol betonlarına göre, %40 oranında uçucu kül kullanımı hızlı klor geçirimsizliği değerlerini %57, %10 oranında silis dumanı kullanımı ise hızlı klor geçirimsizliği değerlerini %78 oranında azaltmıştır. Epoksi boya ile kaplama yapılmış numunelerde epoksi kaplamanın iyon geçişine (elektriksel yük geçişine) izin vermemesinden dolayı çok düşük hızlı klor geçirimsizliği değerleri elde edilmiştir.



Şekil 8.3 İnhibitör kullanılmayan karışımlarda hızlı klor geçirimsizliği deneyi sonuçları.

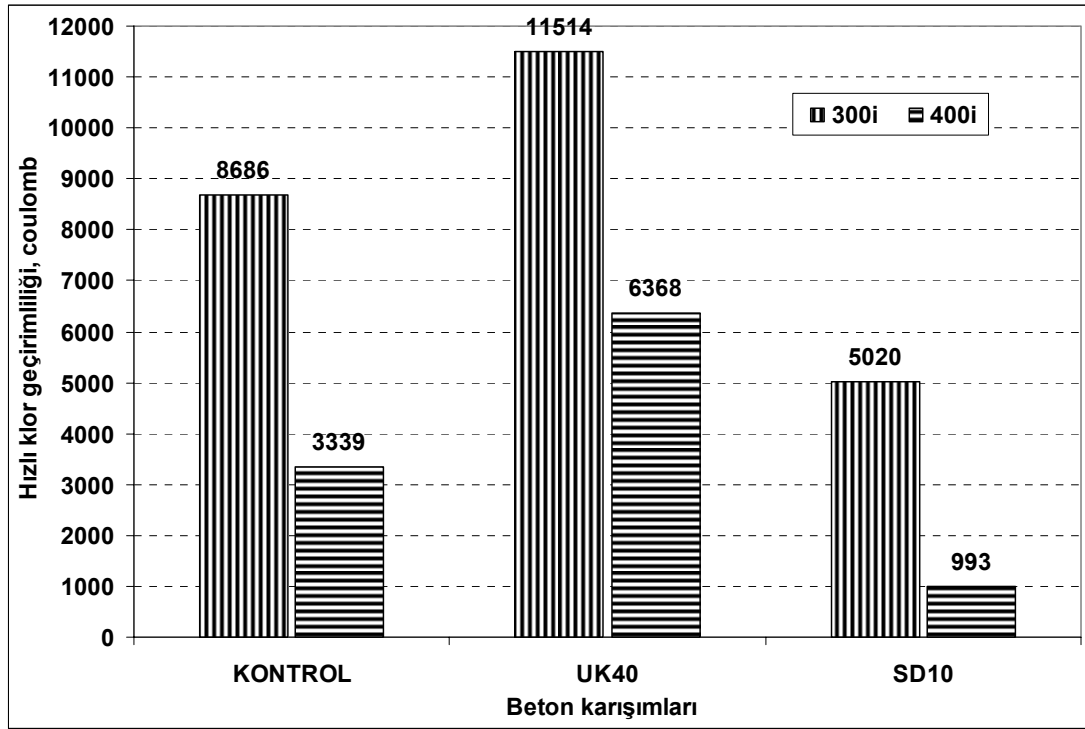
“ASTM C 1202–97 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” standardı sınıflandırmasına göre betonlar Tablo 8.3’de görülen beş geçirimsizlik sınıfına ayrılmıştır.

Tablo 8.3 Hızlı klor geçirimsizliği sınıfları (ASTM C 1202–97)

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

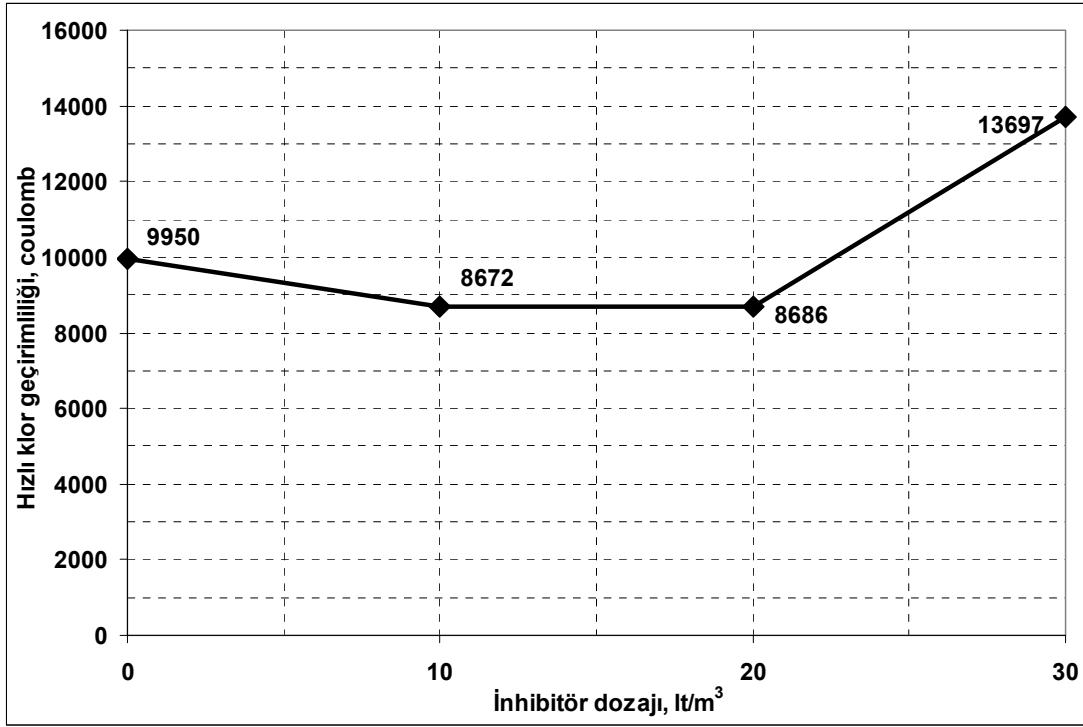
Hem normal dayanımlı betonlarda hem de yüksek dayanımlı betonlarda %40 oranında uçucu kül kullanımı klor geçirimsizliğini bir üst performans sınıfına taşımıştır. Karışımlarda %10 oranında silis dumanı kullanılması ile iki üst sınıfa geçilmiştir. Mineral katkıli betonlarda azalan klor geçirimsizliği,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

Karışımlarında 20 lt/m^3 inhibitör içeren örneklerin hızlı klor geçirimsiliği sonuçları ise Şekil 8.4’de sunulmaktadır. Esasında ASTM C 1202, kalsiyum nitrit esaslı katkı malzemesi kullanılan betonlarda hızlı klor geçirimsiliği deneyini önermemektedir. Bu katkı malzemesinin, hücreden geçen elektriksel yükü arttırması nedeni ile bu durum ortaya konulmuştur. Ancak yine de, karşılaştırma yapabilmek için bu numunelerde de deneyler yapılmıştır. Sonuçlara göre, inhibitör içermeyen karışımlar ile karşılaştırıldığında kontrol betonlarında azalma, mineral katkılı betonlarda ise artış söz konusudur.



Şekil 8.4 Karışımında 20 lt/m^3 inhibitör içeren serilerde hızlı klor geçirimsiliği deneyi sonuçları.

İnhibitör dozajının klor geçirimsiliğine etkisi Şekil 8.5’de görülmektedir. Normal dayanımlı seride farklı oranlarda kullanılmış olan inhibitörün 10 ve 20 lt/m^3 dozajlarında klor geçirimsiliğine bir etkisi olmadığı, sonuçların 9000 coulomb mertebelerinde kaldığı, fakat 30 lt/m^3 kullanım oranının geçirimsiliği önemli oranda artırdığı ve 13700 coulomb mertebesine çıkardığı görülmektedir.



Şekil 8.5 İnhibitör dozajının hızlı klor geçirimsizliğine etkisi.

Üretilen betonların test sonuçlarına göre sınıflandırılması Tablo 8.4’de verilmektedir. Genel olarak normal dayanımlı betonların yüksek geçirgenlik sınıfına dahil olduğu, yüksek dayanımlı betonlarda mineral katkı kullanımı ile geçirgenlik sınıfının azaldığı, inhibitör kullanım oranının geçirgenlik sınıfını değiştirmedığı ve epoksi yalıtım yapılan numunelerin çok düşük sınıfa girdiği söylenebilir.

Tablo 8.4 Karışımların hızlı klor geçirimsizliğine göre sınıflandırılması

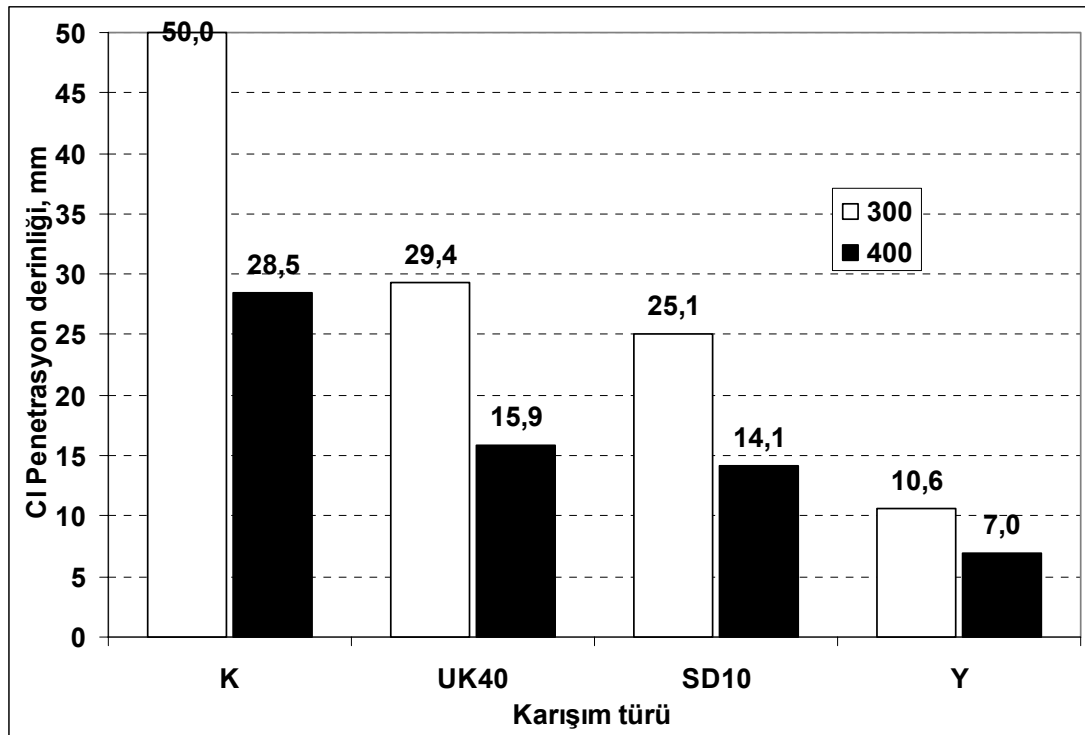
Grup	Karışım Kodu	Beton karışımlarının hızlı klor geçirimsizliği sınıfları				
		İhmal <100 coulomb	Çok düşük 100–1000 coulomb	Düşük 1000– 2000 coulomb	Orta 2000– 4000 coulomb	Yüksek >4000 coulomb
Normal dayanımlı betonlar	K/300					x
	UK/300					x
	SD/300			x		
	K/300/Y		x			
Yüksek dayanımlı betonlar	K/400				x	
	UK/400			x		
	SD/400		x			
	K/400/Y		x			
İnhibitörlü betonlar	K/300/İ20					x
	UK/300/İ20					x
	SD/300/İ20					x
	K/400/İ20				x	
	UK/400/İ20					x
	SD/400/İ20		x			
İnhibitör dozajı	K/300					x
	K/300/İ10					x
	K/300/İ20					x
	K/300/İ30					x

8.3 Klor Penetrasyon Derinliği

Bölüm 6.4'te ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi NaCl çözeltisinde 200 ıslanma kuruma çevriminden sonra 10/10 cm silindir örnekler yarılarak kırık yüzeylere gümüş nitrat çözeltisi püskürtülmüş ve klor işleme derinlikleri tespit edilmiştir.

Normal ve yüksek dayanımlı betonlarda mineral katkı kullanımı ile yalıtım uygulamalarının klor işleme derinliği değerlerine etkisi Şekil 8.6'da görülmektedir.

Mineral katkı içermeyen kontrol betonu (K/300) 200 çevrim sonunda tamamen klor iyonları tarafından kirletilmiştir. Gerek normal betonlarda, gerekse yüksek performanslı betonlarda mineral katkı kullanımı (%40 UK veya %10 SD) ile klor penetrasyon derinliği değerleri büyük oranda azalmıştır. Sözü edilen oranlarda uçucu kül ya da silis dumanı kullanılarak klor işleme derinliği %50'den daha fazla oranlarda azaltılabileceği görülmüştür. Bu etkinin, mineral katkıların betonun boşluklu yapısını azaltması ve uzun dönemde klor iyonlarını tutarak geçişlerine izin vermemesi ile oluştuğu görülmektedir.

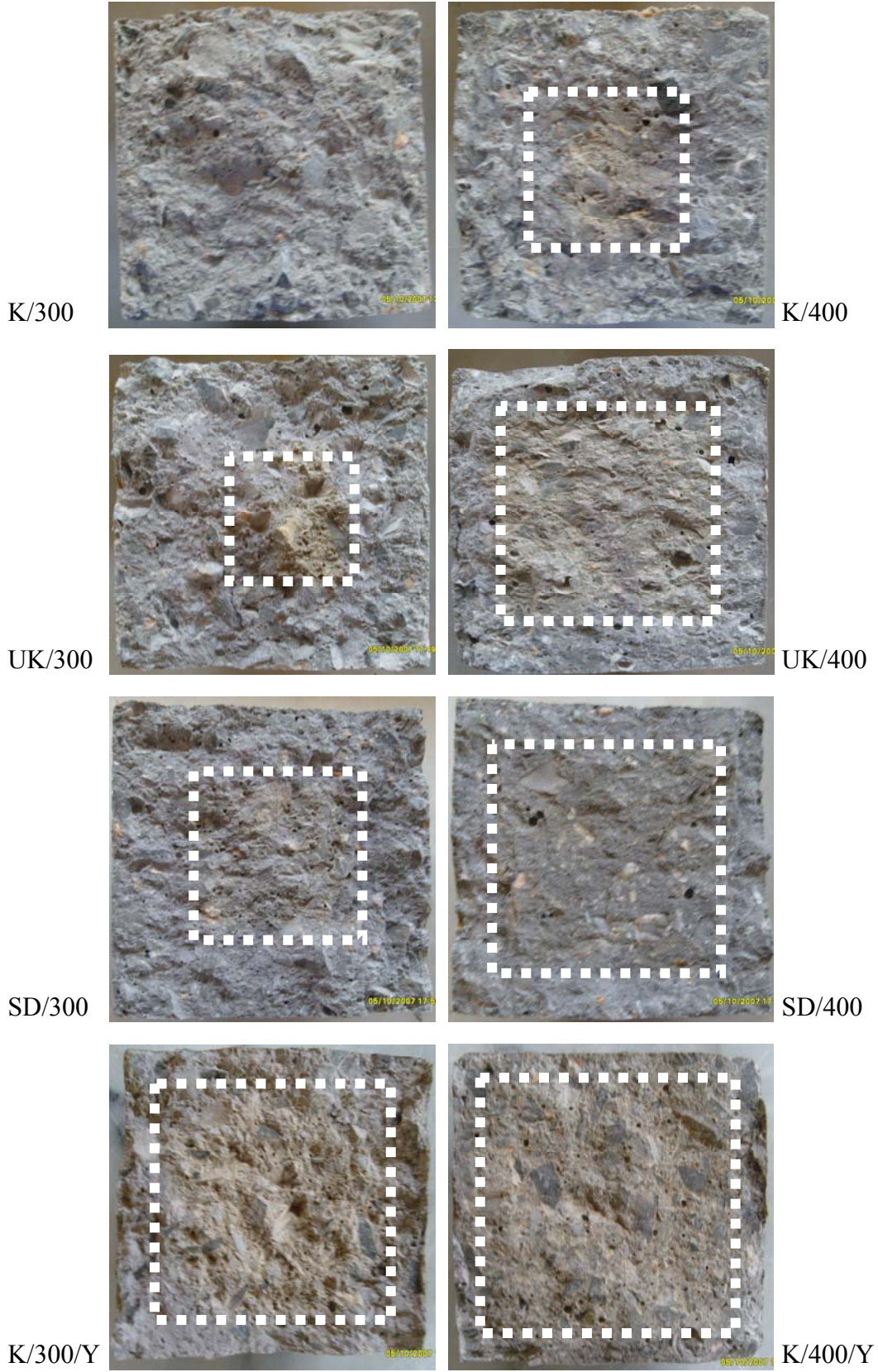


Şekil 8.6 Normal ve yüksek dayanımlı karışımlarda klor işleme derinliği değerleri.

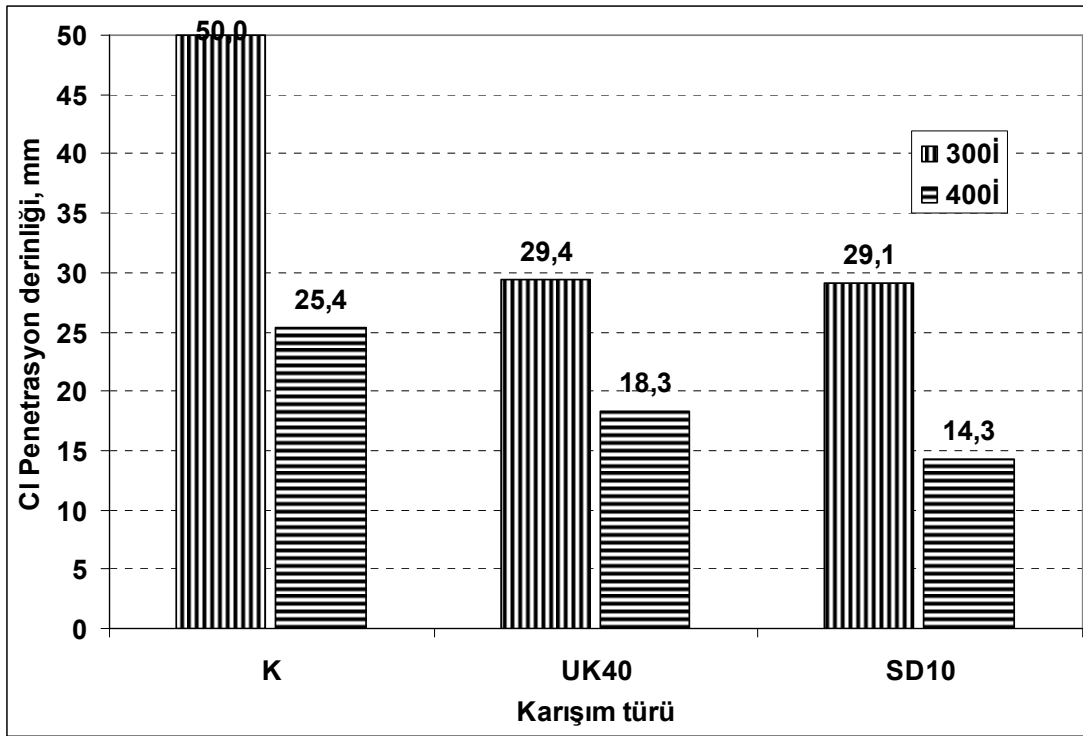
Epoksi malzeme ile yalıtım yapılmış numunelerde çok düşük miktarlarda işleme derinlikleri tespit edilmiştir. Aslında klor iyonlarınca kirletilmiş bölgenin oluşmaması beklenirken büyük ihtimalle yalıtımdaki ince çatlak ve hatalar sebebi ile düşük oranda klor işleme derinliği değerleri ölçülmüştür.

Şekil 8.7’de klor penetrasyon derinliği tespiti yapılmış örneklerin görünüşleri yer almaktadır. Görüldüğü üzere, mineral katkı içermeyen kontrol betonunda renk değişimi yoktur. Bir başka deyişle tüm numune kesiti klor iyonları tarafından kirletilmiştir. Öte yandan, yüksek performanslı betonlarda ve mineral katkılı betonlarda orta bölgelerdeki kahverengimsi bölge klor iyonlarının bulunmadığı temiz bölgeleri temsil etmektedir.

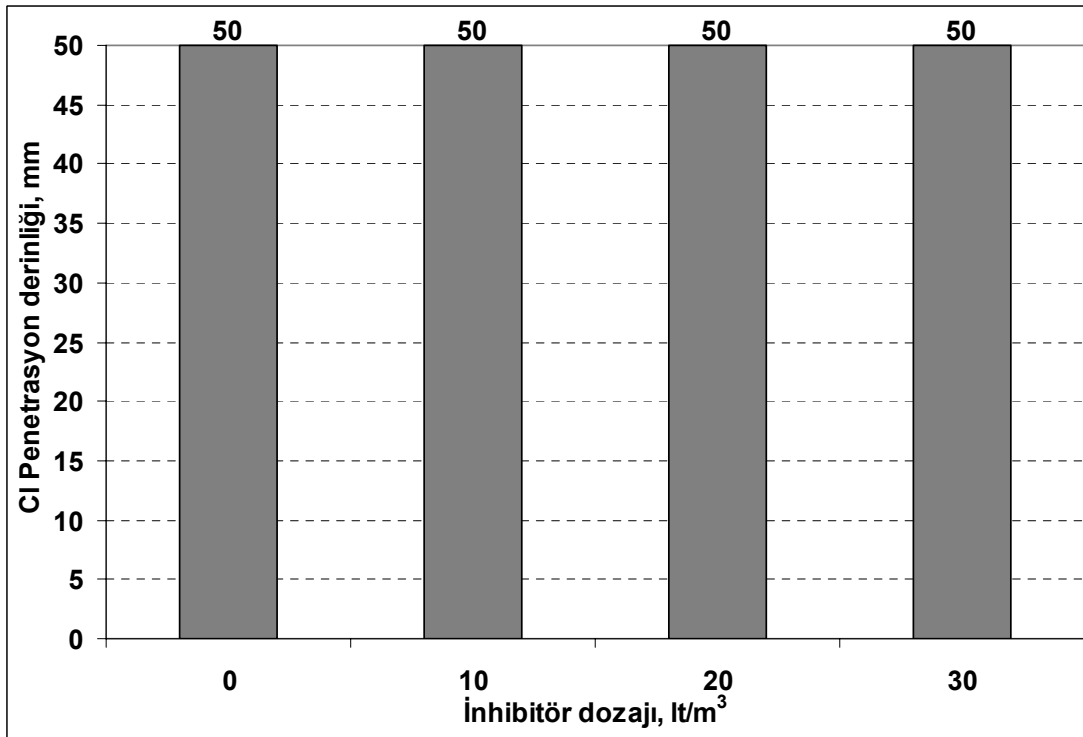
Şekil 8.8’de inhibitör içeren örneklerden ölçülen klor penetrasyon derinliği değerleri görülmektedir. İnhibitör içermeyen betonlar ile karşılaştırıldığında, benzer sonuçların elde edildiği görülebilir. Bu bulgu, kalsiyum nitrit esaslı korozyon inhibitörünün klor işleme derinliğine etkisi olmadığı sonucuna götürmektedir. Benzer sonuç, farklı oranlarda inhibitör kullanılan karışımlardan elde edilmiştir. Değişik oranlarda inhibitör kullanılsa bile, örneklerin tamamının klor iyonları tarafından kirletildiği Şekil 8.9’dan görülebilir.



Şekil 8.7 NaCl çözeltisinde 200 ıslanma-kuruma çevrimi sonrası klor işlemiş bölgelerin görünümü.



Şekil 8.8 İnhibitör kullanılan karışımlarda klor işleme derinliği değerleri.



Şekil 8.9 İnhibitör dozajının normal betonun klor işleme derinliğine etkisi.

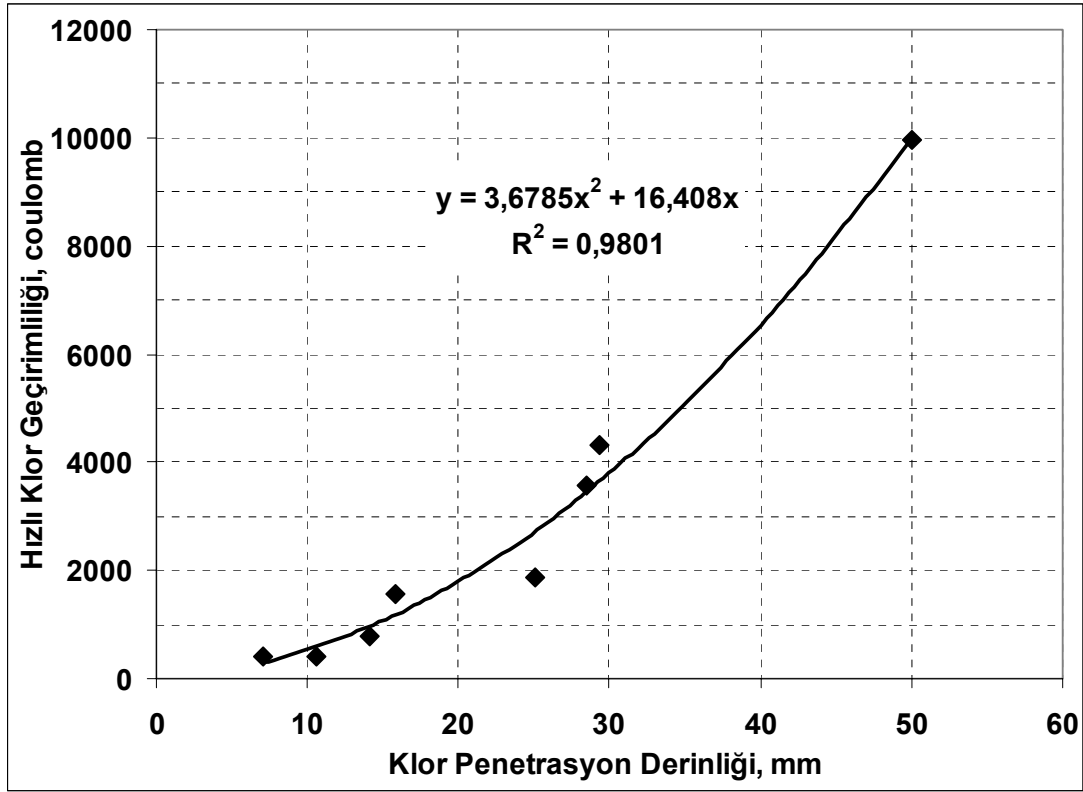
8.4 Hızlı Klor Geçirimsizliği – Klor Penetrasyon Derinliği İlişkisi

Normal ve yüksek performanslı betonlarda mineral katkı içermeyen kontrol karışımları ile UK ve SD içeren karışımlardan elde edilen klor penetrasyon derinliği değerleri ile hızlı klor geçirimsizliği değerleri Şekil 8.10'da grafik olarak sunulmuştur. Grafikte inhibitör içeren karışımlara ve yalıtım uygulanmış örneklerin sonuçlarına yer verilmemiştir. Kalsiyum nitrit esaslı inhibitörlerin hızlı klor geçirimsizliği deneyinde gerçekçi ve uygun sonuçlar vermemesi nedeni ile, ASTM C 1202 tarafından önerilmediği daha önce belirtilmişti. Epoksi yalıtım ise çok farklı bir uygulama olması sebebiyle özellikle ayrı tutulmuştur.

Normal dayanımlı kontrol betonunun tamamı klorür iyonları tarafından kirletilirken, mineral katkılı betonlarda penetrasyon derinliği daha az olmuştur. Özellikle silis dumanı kullanımı ile penetrasyon derinliği kontrol betonuna göre yarıya düşmektedir. Yüksek performanslı betonlarda ise, düşük geçirimsizlik nedeni ile daha düşük değerler elde edilmiştir. Chalee vd. (2007) değişik su/çimento oranlarına ve çeşitli uçucu kül oranlarına sahip betonlarda yaptıkları 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.

Aynı örneklere ait klor penetrasyon derinliği değerleri ile hızlı klor geçirimsizliği değerlerinin bir koordinat sisteminde işlenmesi sonucu Şekil 8.10'daki grafik elde edilmiştir.

Bu iki olgu arasında iyi bir ilişki bulunduğu Şekil 8.10'dan görülmektedir. Betonun klorür geçirimsizliği yüksek ise iyonlar daha kolay nüfuz edecektir. Tersine durumda, iyon penetrasyonu kolay olan bir betonda daha yüksek iyon geçirimsizliği görülecektir. Hızlı klor iyon geçirimsizliği değerleri ile klor penetrasyon derinliği değerleri arasındaki ikinci dereceden ilişki grafikten görülebilir.



Şekil 8.10 Hızlı klor geçirirliği – klor penetrasyon derinliği ilişkisi.

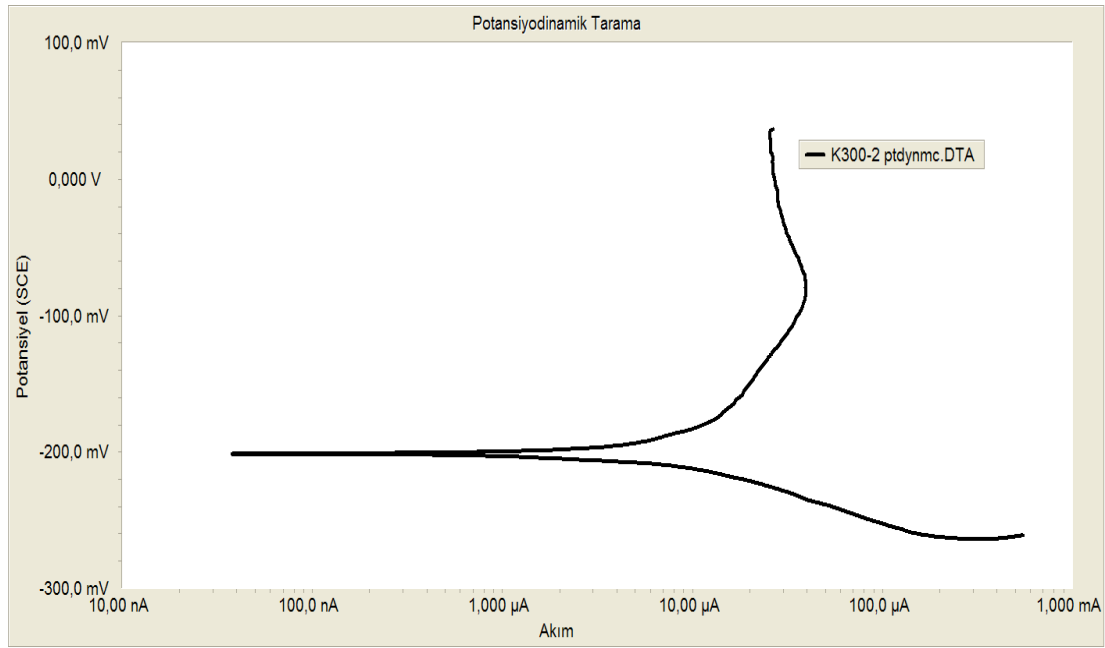
8.5 Korozyon Ölçümleri

Bu bölümde iki bekleme koşulunda saklanan betonarme örneklerin korozyon deneyi sonuçlarına yer verilmiştir. Korozif olmayan ortam olan kirece doymun suda bekleme ve %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisindeki örneklerde değişik zamanlarda elektrot potansiyeli okumaları ve polarizasyon çalışmaları yapılmıştır.

Numuneler üzerinde yapılan korozyon deneylerinde, numunelerin korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerleri, korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri ve korozyon hızı (CR) değerleri tespit edilmiştir.

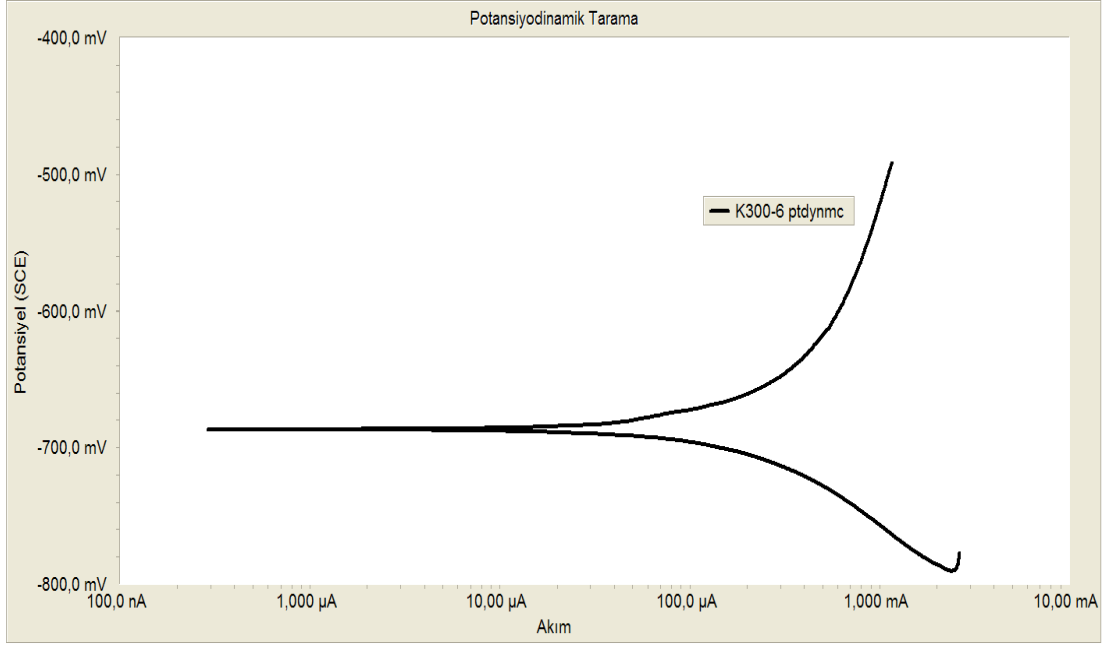
Doymun $Ca(OH)_2$ çözeltisinde saklanan numunelerin üç elektrotlu sistem ile çizilen tipik polarizasyon eğrisi Şekil 8.11'de sunulmaktadır. Korozif olmayan ortamda bekletilen numunelerin grafiğine bakıldığında, korozyon potansiyeli değerinin genellikle -270mV'dan daha pozitif yönde olduğu görülmektedir. Bu

durum potansiyel ölçümlerine göre aktif korozyon gelişiminin olmadığını göstermektedir. Korozyona uğrayabilecek numune yüzey alanı da dikkate alındığında korozyon akım yoğunluğu değerlerinin çok düşük ($<0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ – ihmal edilebilir) mertebede olduğu görülmektedir. Deneysel veriler 8.5.1 bölümünde detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 8.11 Kireçli suda bekleyen numunelerin tipik polarizasyon eğrisi.

Korozyon deneyi numunelerinin diğer bölümü ise, hızlandırılmış korozyon kabiniinde %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Kontrol numuneleri (korozyon olmayan ortamda bekleyen) ile aynı yaşta bu numunelerden de ölçüm alınmıştır. Ölçümler ıslanma-kuruma çevrimlerinde numuneler doymun durumda iken yapılmıştır. Potansiyel değerlerine karşı gelen akım yoğunluğu değerlerini gösteren tipik polarizasyon eğrisi Şekil 8.12’de görülmektedir.



Şekil 8.12 Tuzlu suda ıslanma-kuruma etkisine maruz numunelerin tipik polarizasyon eğrisi.

Korozif ortamda bekleyen numunelerin analizine bakıldığında genel olarak tüm numunelerin, korozyon potansiyeli değerlerinin -270mV değerinden çok daha negatif olduğu tespit edilmiştir. Bu durum örneklerde aktif korozyon gelişiminin bir göstergesidir. Öte yandan sayısal olarak bakıldığında korozyon hızı değerlerinin başlangıçta düşük, ıslanma kuruma çevrim sayısı arttıkça korozyon hızlarının da arttığı görülmüştür. Bu bulgu, iki aşamalı korozyon gelişim modeli ile uyumludur. Başlangıçtaki düşük korozyon akım yoğunluğu değerleri başlangıç dönemini (klor iyonlarının beton bünyesine nüfuz etmesi, karbonatlaşma olayı vb.), ileri dönemdeki artan korozyon akım yoğunluğu değerleri de yayınma dönemini (korozyonun hız kazanması) göstermektedir. Deney bulguları 8.5.2 bölümünde detaylı olarak sunulmuştur.

8.5.1 Korozif Olmayan Ortamdaki Ölçümler

Herhangi bir zararlı kimyasal etkiye maruz kalmayan betonda, boşluk suyunda çözülen kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 ayrıca CaO ve diğer alkali oksitler sebebiyle yüksek pH oluşur ve bu şekilde donatı korunur. Bu bekleme koşulunda herhangi bir

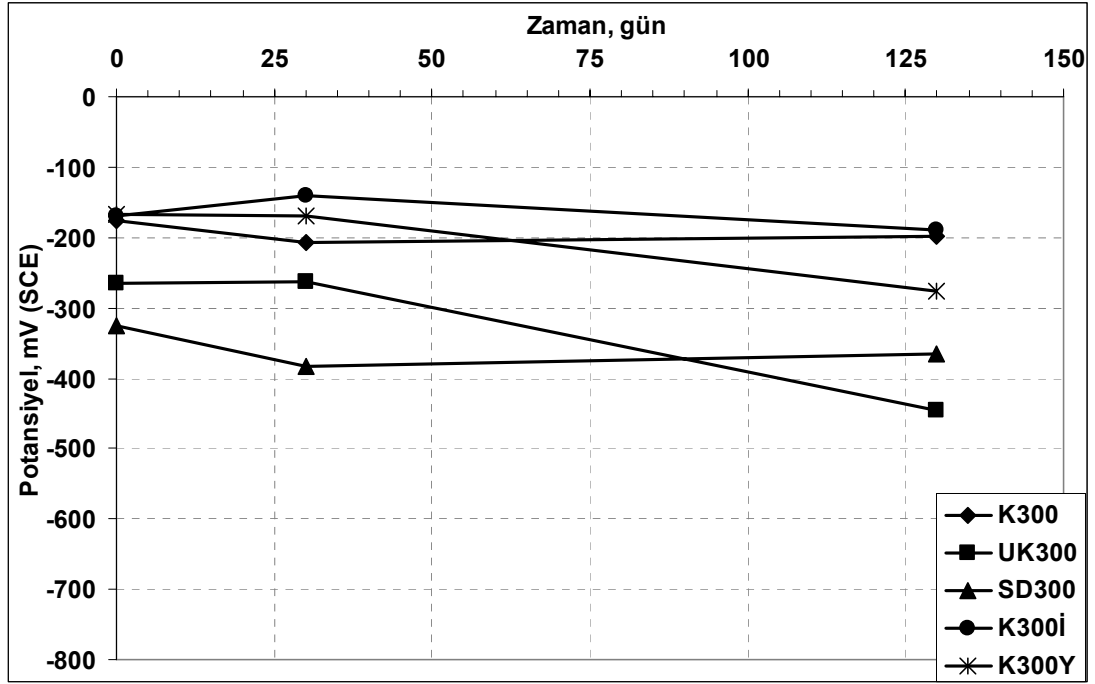
karbonatlaşma veya klorür etkisi olmayan tamamen korunumlu bir ortam yaratılmıştır.

Kireçli suda bekleyen normal dayanımlı betonların ölçüm sonuçları Tablo 8.5’de, verilmiştir. Korozyon potansiyeli değerlerinin zamanla değişimi Şekil 8.13’de, korozyon akım yoğunluğu değerlerinin zamanla değişimi Şekil 8.14’de sunulmuştur.

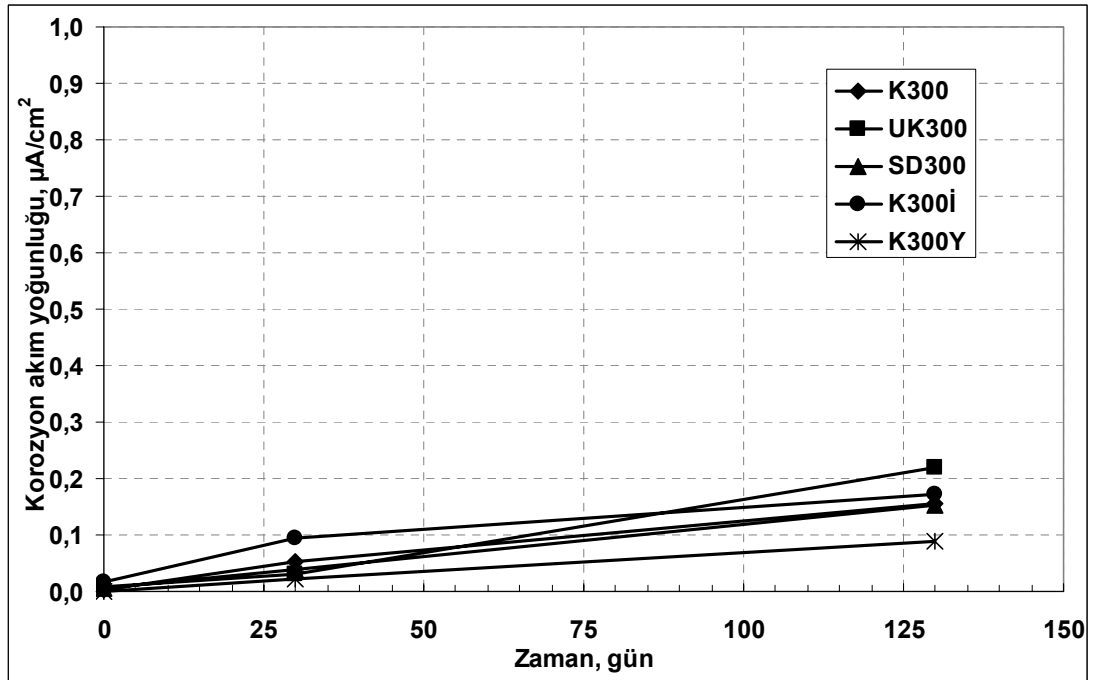
Tablo 8.5 Kireçli suda bekleyen normal betonlarda korozyon ölçüm sonuçları

Kod	Zaman (gün)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	CR (mm/yıl)
K300	0	-176	0,003433	0,000040
	30	-207	0,053625	0,000623
	130	-199	0,154500	0,001797
UK300	0	-265	0,007904	0,000092
	30	-264	0,030388	0,000353
	130	-445	0,220000	0,002546
SD300	0	-325	0,006595	0,000076
	30	-384	0,038500	0,000447
	130	-366	0,152500	0,001770
K300İ	0	-169	0,015429	0,000179
	30	-141	0,094875	0,001100
	130	-190	0,172500	0,001979
K300Y	0	-168	0,000253	0,000003
	30	-169	0,021338	0,000244
	130	-277	0,088125	0,001023

ASTM C876’ya göre -270mV potansiyel değeri aktif korozyon gelişimi açısından kalitatif bir sınır olarak kabul edilmektedir. Kirece doygun suda bekleyen örneklerde potansiyel değerlerine bakıldığında genel olarak bu limitin üstünde kaldığı söylenebilir. UK ve SD içeren karışımlar bu sınırı geçmiştir. Ancak korozyon hızı değerlerinin düşük olduğu korozyon akım yoğunluğu değerlerinden anlaşılabilir.



Şekil 8.13 Kirece doygun suda bekleyen normal dayanımlı numunelerde elektrot potansiyeli değerlerinin zamanla değişimi.



Şekil 8.14 Kirece doygun suda bekleyen normal dayanımlı numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin zamanla değişimi.

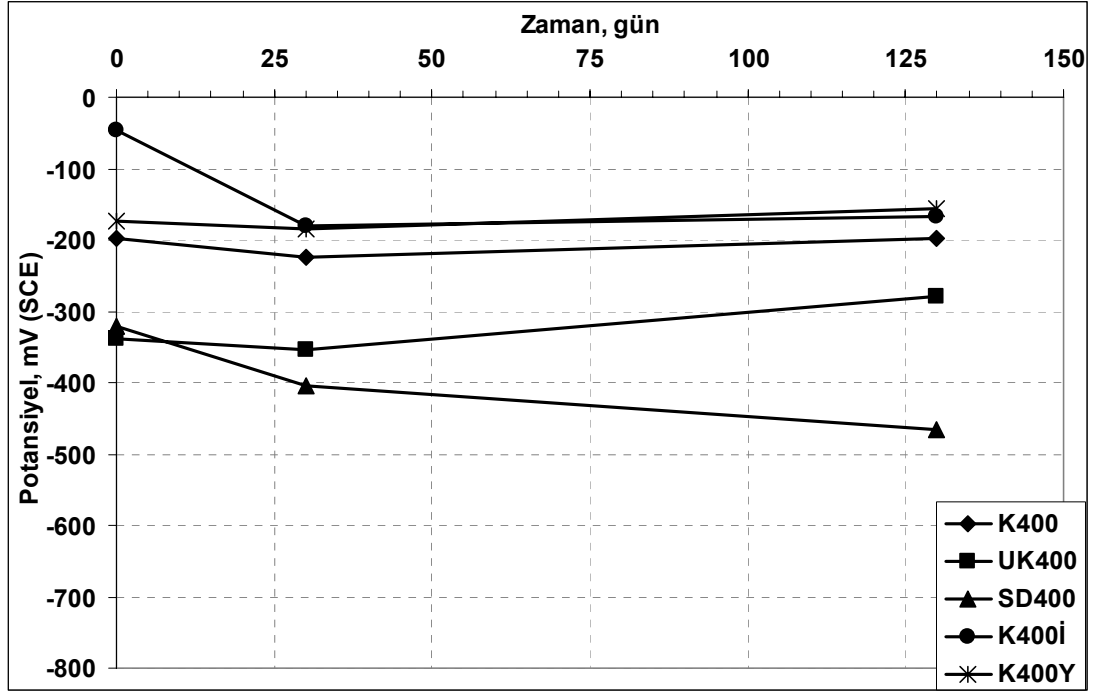
Şekil 8.14'deki korozyon akım yoğunluğu değerlerine bakıldığında, 130 gün sonra bile değerlerin $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden düşük olduğu görülmektedir. Akım yoğunluğu açısından ise $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden düşük ölçümler ihmal edilebilir düzeyde korozyon gelişimini belirtmektedir. Bu değer $0,1 - 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında kalması düşük korozyon hızının göstergesidir. Bu kriterlere göre değerlendirildiğinde, 130 gün sonunda epoksi yalıtım yapılmış örneklerde ihmal edilebilir düzeyde, diğerlerinde ise düşük düzeyde korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir.

Yüksek dayanımlı betonların ölçüm sonuçları Tablo 8.6'da verilmiştir. Bu değerler normal dayanımlı örneklerde elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

Tablo 8.6 Kireçli suda bekleyen yüksek dayanımlı betonlarda korozyon ölçüm sonuçları

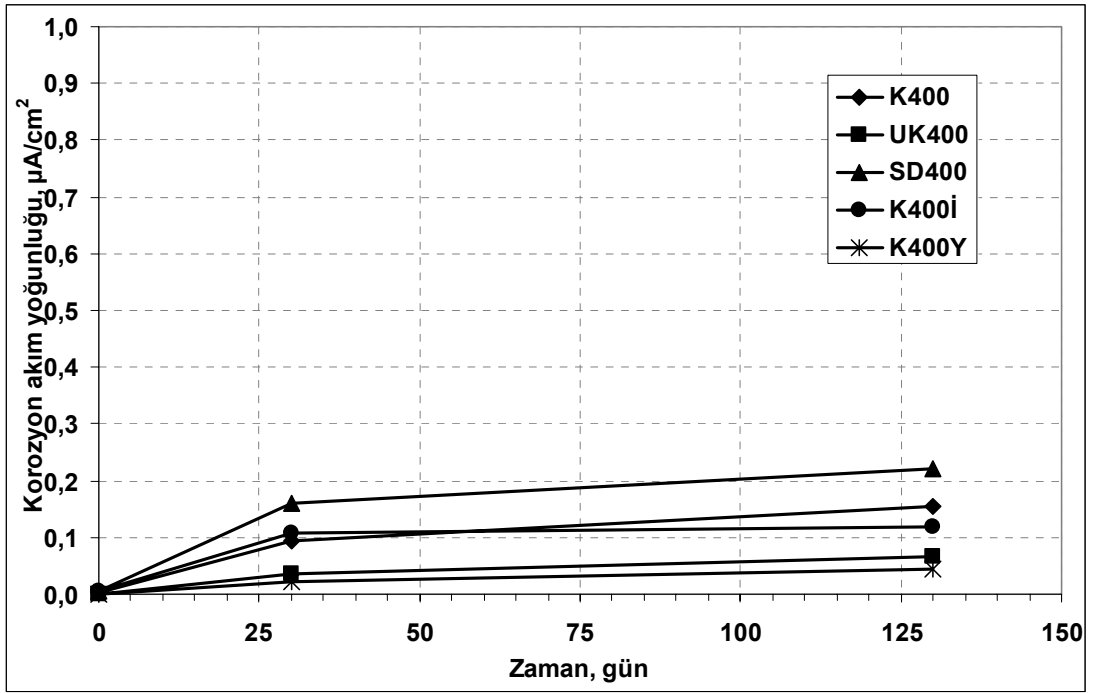
Kod	Zaman (gün)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	CR (mm/yıl)
K400	0	-198	0,002738	0,000032
	30	-224	0,094250	0,001094
	130	-198	0,153750	0,001790
UK400	0	-338	0,000324	0,000004
	30	-353	0,034875	0,000404
	130	-279	0,066750	0,000775
SD400	0	-321	0,006847	0,000079
	30	-405	0,161250	0,001876
	130	-465	0,220000	0,002548
K400İ	0	-47	0,004915	0,000057
	30	-180	0,106500	0,001236
	130	-168	0,120125	0,001395
K400Y	0	-174	0,000055	0,000001
	30	-184	0,023250	0,000269
	130	-156	0,043625	0,000506

Yüksek dayanımlı örneklerin zamana göre korozyon potansiyeli değerlerinin değişimi Şekil 8.15’de sunulmuştur. UK ve SD içeren karışımlar nispeten daha negatif değerler alırken diğer değerler, aktif korozyon gelişimini işaret etmemektedir.



Şekil 8.15 Kirece doymun suda bekleyen yüksek dayanımlı numunelerde elektrot potansiyeli değerlerinin zamanla değişimi.

Şekil 8.16’ya göre kirece doymun suda bekleyen yüksek dayanımlı numunelerde korozyon akım yoğunluğu ölçütlerine göre ihmal edilebilir ya da düşük korozyon hızları elde edilmiştir.



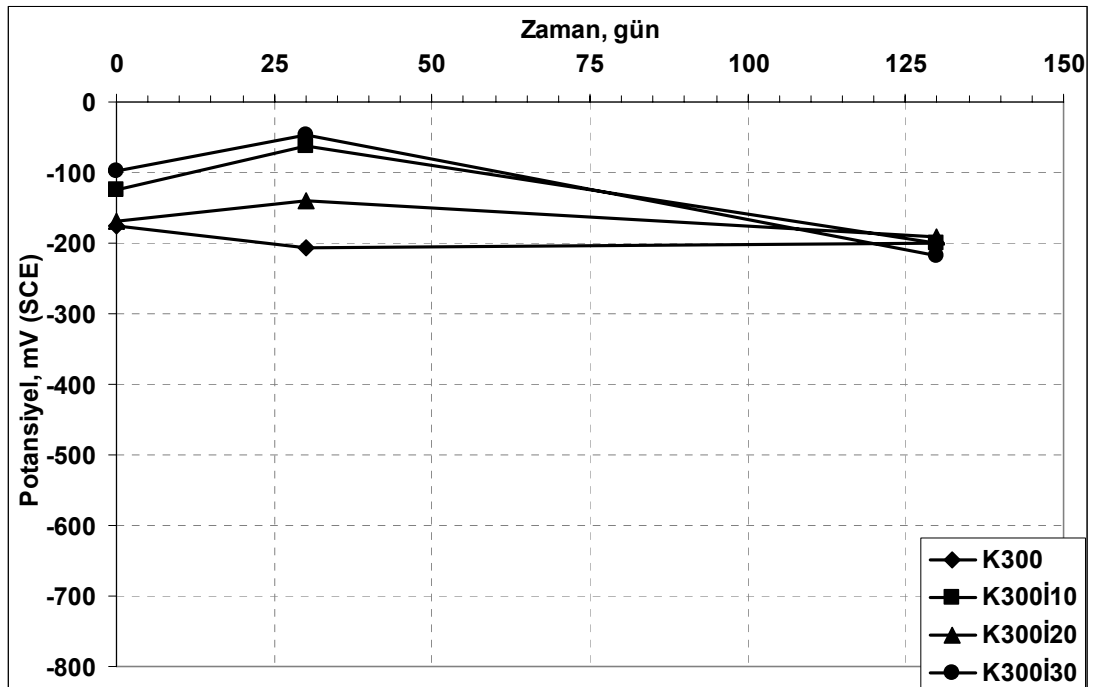
Şekil 8.16 Kirece doymun suda bekleyen yüksek dayanımlı numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin zamanla değişimi.

Değişik oranlarda inhibitör içeren normal dayanımlı örneklerin ölçüm sonuçları Tablo 8.7’de verilmiştir.

Kontrol betonu ve değişik oranlarda kalsiyum nitrit esaslı inhibitör içeren karışımlar ile hazırlanmış örneklerin, kirece doymun sudaki elektrot potansiyeli değerlerine bakıldığında, -200mV ve daha pozitif değerlerin okunduğu görülmektedir (Şekil 8.17). Bu değerler ASTM C876’ya göre %90’dan daha büyük olasılıkla aktif korozyon gelişimi olmadığını veya korozyon gelişiminin belirsiz olduğunu göstermektedir.

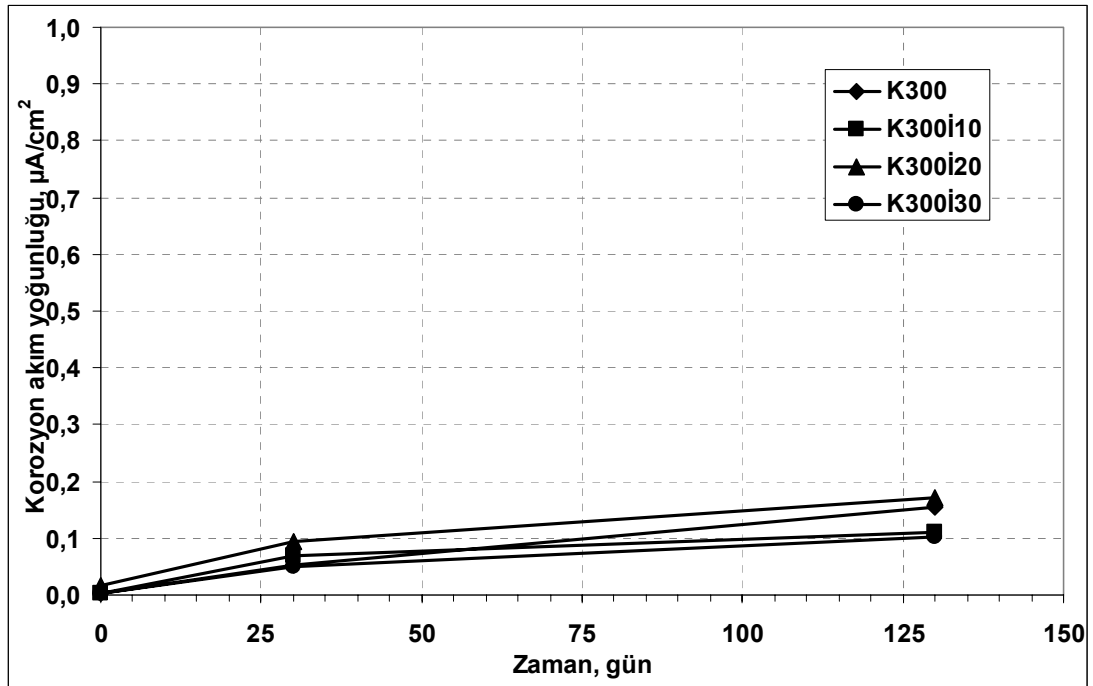
Tablo 8.7 Kireçli suda bekleyen değişik dozajlarda inhibitör içeren betonlarda korozyon ölçüm sonuçları

Kod	Zaman (gün)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	CR (mm/yıl)
K300	0	-176	0,003433	0,000040
	30	-207	0,053625	0,000623
	130	-199	0,154500	0,001797
K300İ10	0	-124	0,002123	0,000025
	30	-63	0,067750	0,000786
	130	-201	0,110500	0,001282
K300İ20	0	-169	0,015429	0,000179
	30	-141	0,094875	0,001100
	130	-190	0,172500	0,001979
K300İ30	0	-97	0,001786	0,000021
	30	-46	0,049875	0,000579
	130	-218	0,103125	0,001198



Şekil 8.17 Kirece doymuş suda bekleyen değişik oranlarda inhibitör içeren normal dayanımlı numunelerde elektrot potansiyeli değerlerinin zamanla değişimi.

Kirece doymun suda bekletilen değişik oranlarda inhibitör içeren normal dayanımlı betonlar ile hazırlanmış örneklerdeki, donatıların korozyon akım yoğunluğu değerlerinin zamanla değişimi Şekil 8.18’de sunulmuştur. İnhibitör kullanılmamış K300 karışımının 130 günde ki korozyon akım yoğunluğu 0,150 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ mertebesindedir. İnhibitörlü karışımlar ise bu değere yakın veya daha düşük değerler göstermiştir. Ancak korozyon gelişim seviyesi açısından bakıldığında, değerlerin düşük veya ihmal edilebilir limitte olduğu görülmektedir.



Şekil 8.18 Kirece doymun suda bekleyen değişik oranlarda inhibitör içeren normal dayanımlı numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin zamanla değişimi.

Genel olarak bakıldığında, doymun kireç çözeltilisinde bekleyen numunelerin korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı değerlerinin ihmal edilebilir mertebede olduğu, beklendiği gibi donatı korozyonunun gelişmediği görülmüştür.

Örnek olarak Tablo 8.5, 8.6 ve 8.7’deki en yüksek korozyon akım yoğunluğu 0,22 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değeri ve bu karşı gelen korozyon hızına bakıldığında yılda 2,5 μm değeri görülebilir. Servis ömrü olarak 50 yıl seçilen bir betonarme yapıda bu süre zarfında donatıdaki kayıp 0,125 μm değerine ulaşılır ki bu değer oldukça düşük olmaktadır.

8.5.2 NaCl Etkisinde Korozyon

Bu bölümde %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisindeki betonarme örneklerin korozyon gelişimlerine yer verilmiştir. Korozyon ölçümleri başlangıçta 5. çevrimde olmak üzere ilerleyen zamanlarda 100. ve 200. çevrimlerde gerçekleştirilmiştir.

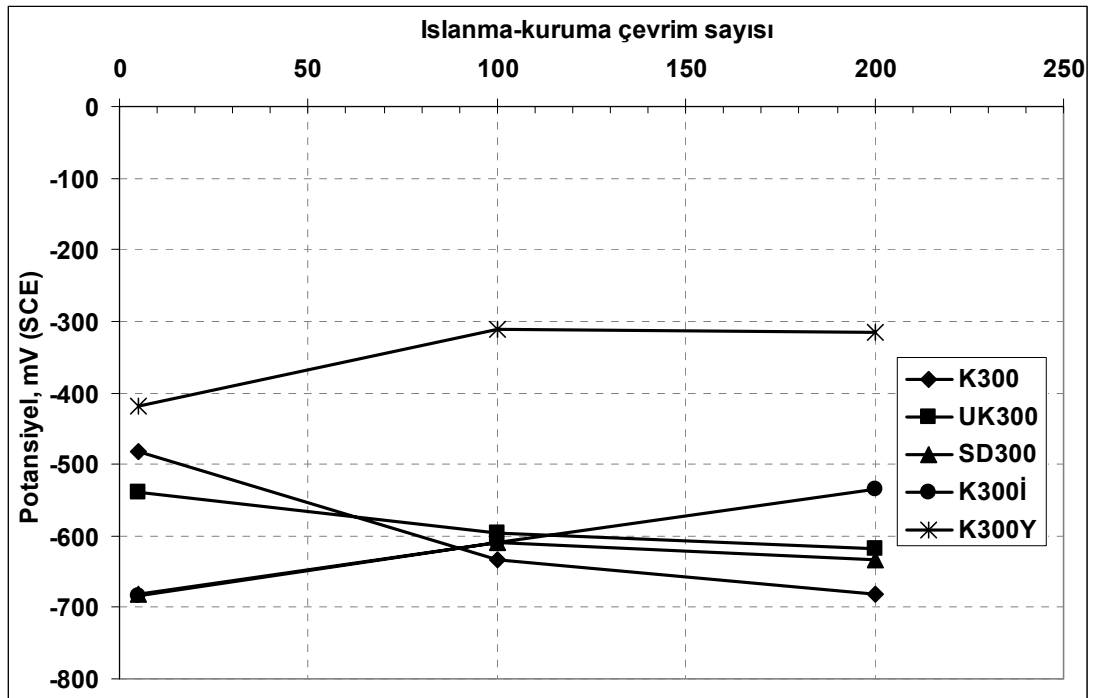
Islanma-kuruma etkisine maruz normal dayanım sınıfındaki örneklerin ölçüm sonuçları Tablo 8.8'de sunulmuştur.

Tablo 8.8 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisindeki normal betonlarda korozyon ölçüm sonuçları

Kod	Çevrim sayısı	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	CR (mm/yıl)
K300	5	-482	0,399458	0,004636
	100	-633	0,560000	0,006499
	200	-683	4,095833	0,047540
UK300	5	-538	0,261250	0,003029
	100	-596	0,376667	0,004373
	200	-618	1,917917	0,022269
SD300	5	-681	0,035075	0,000407
	100	-610	0,534375	0,006198
	200	-634	2,737500	0,031796
K300İ	5	-683	0,005971	0,000069
	100	-609	0,754375	0,008755
	200	-534	2,887500	0,033465
K300Y	5	-418	0,007189	0,000084
	100	-312	0,087000	0,001011
	200	-315	0,326813	0,003783

Normal dayanımlı betonlar ile hazırlanmış örneklerin %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisindeki potansiyel değerlerinin çevrim sayısına göre değişimleri

Şekil 8.19’da verilmiştir. Tüm örnekler korozyon potansiyeli değerleri açısından değerlendirildiğinde, aktif korozyon gelişimini gösteren -270 mV değerinden çok daha negatif değerler aldığı görülmektedir. Genellikle örneklerin elektrot potansiyeli değerleri -500 ile -700 mV değerleri arasındadır. Bu eğilime uymayan tek seri yalıtımlı örnekler olmaktadır. Bu örnekler uzun dönemde -300 mV civarında potansiyel değerleri göstermektedir. Bu bulgu yalıtım uygulamasının etkinliği konusunda olumlu bir davranışı yansıtmaktadır.

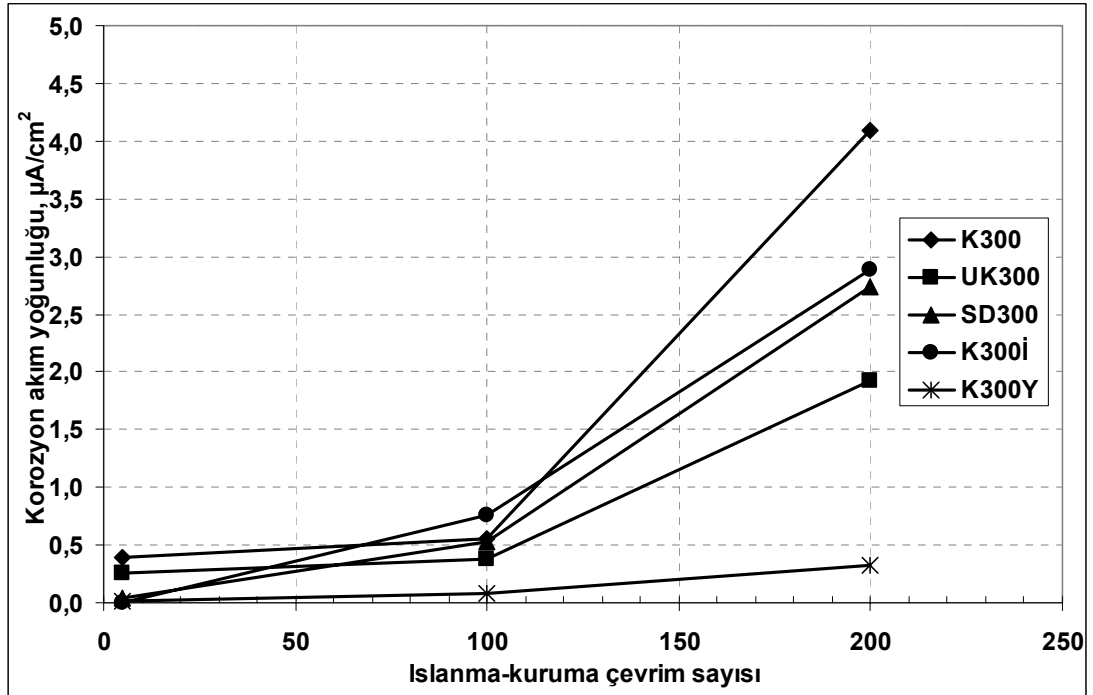


Şekil 8.19 NaCl ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz normal dayanımlı numunelerde elektrot potansiyeli değerlerinin değişimi.

Normal betonlardaki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre değişimi Şekil 8.20’de sunulmuştur. Tüm betonlardaki donatıların zamanla korozyon akım yoğunluğu değerlerinin arttığı görülmektedir. Öte yandan korozyon gelişimi değerlendirildiğinde, başlangıçta akım yoğunluğu değerlerinin oldukça düşük, ileri dönemlerde yüksek hız kazandığı görülmüştür. Bu durum, betonarme elemanlarda başlangıç ve yayınma olarak iki aşamada modellenen korozyon gelişimine uyum göstermektedir.

Korozif ortamda etkinin başlangıç aşamalarında ihmal edilebilir ve düşük korozyon akım yoğunluğu değerleri, ilerleyen zamanda 100. çevrimde ise düşük ve orta korozyon akım yoğunluğu değerleri ölçülmüştür. Bu zamana kadar olan süreç başlangıç aşaması olarak nitelenebilir. Bu süreçte, klor iyonlarının beton bünyesine girerek donatıya ulaşmaları gerçekleşmiştir. Klor iyonlarının korozyon mekanizmasındaki etkisi Bölüm 3'te detaylı olarak açıklanmıştır. Süreç sonunda pasifliğini kaybeden çelikte aktif korozyon başlamaktadır. Yayınma periyodunda bir diğer deyişle, 200. çevrimde, epoksi kaplama yapılmış örnekler haricindeki numunelerde yüksek korozyon hızı değerleri ölçülmüştür.

Korozyon akım yoğunluğu değerlerinin $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den büyük değerler alması yüksek korozyon hızlarını ifade ettiğine göre, epoksi yalıtım yapılmış örnekler haricinde tüm betonlardaki donatıların yüksek hızda korozyona uğradığı görülmektedir.



Şekil 8.20 NaCl ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz normal dayanımlı numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin değişimi.

Karışımlar kıyaslandığında ise, hiçbir önlem alınmadan kontrol karışımı ile üretilmiş örneklerde (K300) uzun dönemde en yüksek korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Bu durumda korozyon akım yoğunluğu değerleri, 200 çevrim sonunda $4,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine ulaşmıştır. Karışımında %40 oranında uçucu kül kullanılan örneklerde ise, akım yoğunluğu değeri 200 çevrimde ancak $1,92 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerini almıştır. Bu durumda kül kullanımı ile korozyon akım yoğunluğu, bir diğer deyişle korozyon hızı yarı yarıya azaltılabilmektedir. Uçucu kül kullanımının betonun boşluk sistemini değiştirerek olumlu yönde geliştirdiği, öte yandan da klor iyonlarını tutarak donatı derinliğinde daha az klor birikimi sağladığı bilinmektedir. Bu olumlu etkiler, donatıdaki korozyon hızını yavaşlatarak korozyondan korunmada önemli bir fayda sağlamaktadır.

Karışımlarda silis dumanı kullanımı ise, yine olumlu bir etki yaparak korozyon akım yoğunluğu değerlerini azaltmaktadır. Ancak, silis dumanı kullanımı uçucu kül kullanımı kadar etkin değildir. Silis dumanının puzolanik olarak çok daha etkin bir malzeme olması ve boşluk doldurma etkisi ile çok daha geçirimsiz bir yapı elde edilmesi, korozyon açısından önemli faydalar olarak karşımıza çıkmaktadır. Yüzer (1998) çalışmasında, silis dumanının betonun elektriksel direncini arttırdığını, korozyon akım yoğunluğunu azaltarak donatı korozyonunu geciktirdiğini belirtmektedir. Öte yandan, puzolanik reaksiyonlarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ daha çabuk tüketilmekte ve yüksek alkali ortamın sağladığı kimyasal koruma zayıflamaktadır. Silis dumanı kullanılan karışımlarda uçucu küle göre nispeten daha yüksek korozyon akım yoğunluğu değerlerinin elde edilmesinin bu mekanizma ile oluştuğu düşünülmektedir.

Epoksi yalıtım yapılan numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerleri ihmal edilecek düzeydedir.

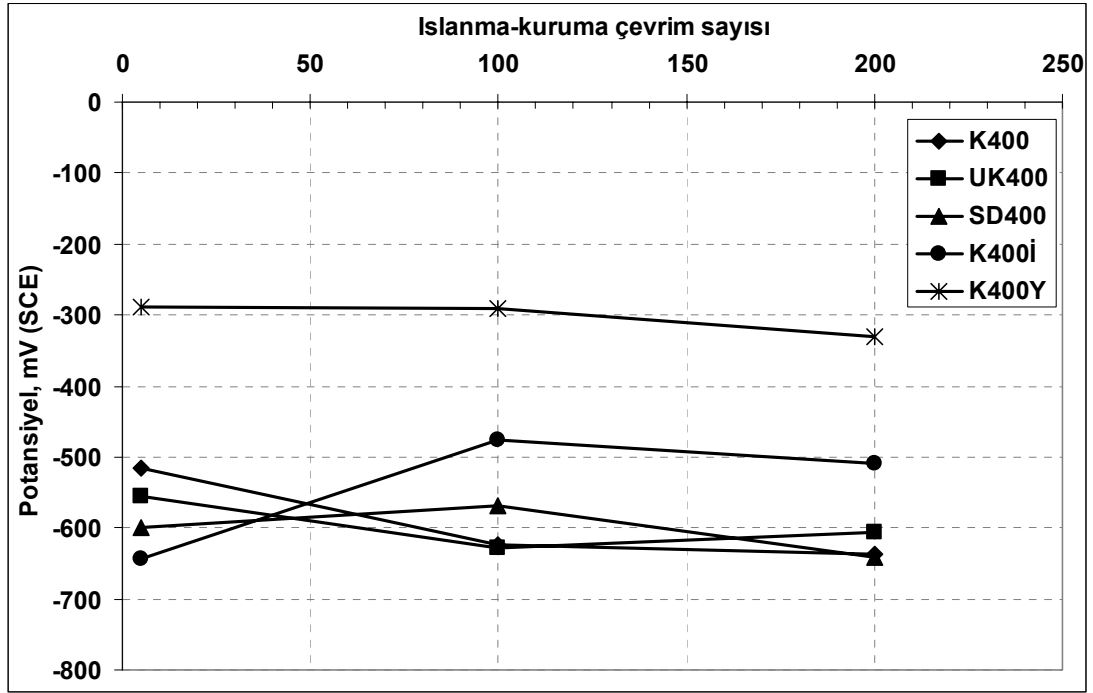
Yüksek dayanımlı örneklerin ölçüm sonuçları ise Tablo 8.9'da verilmiştir.

Tablo 8.9 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisindeki yüksek dayanımlı betonlarda korozyon ölçüm sonuçları

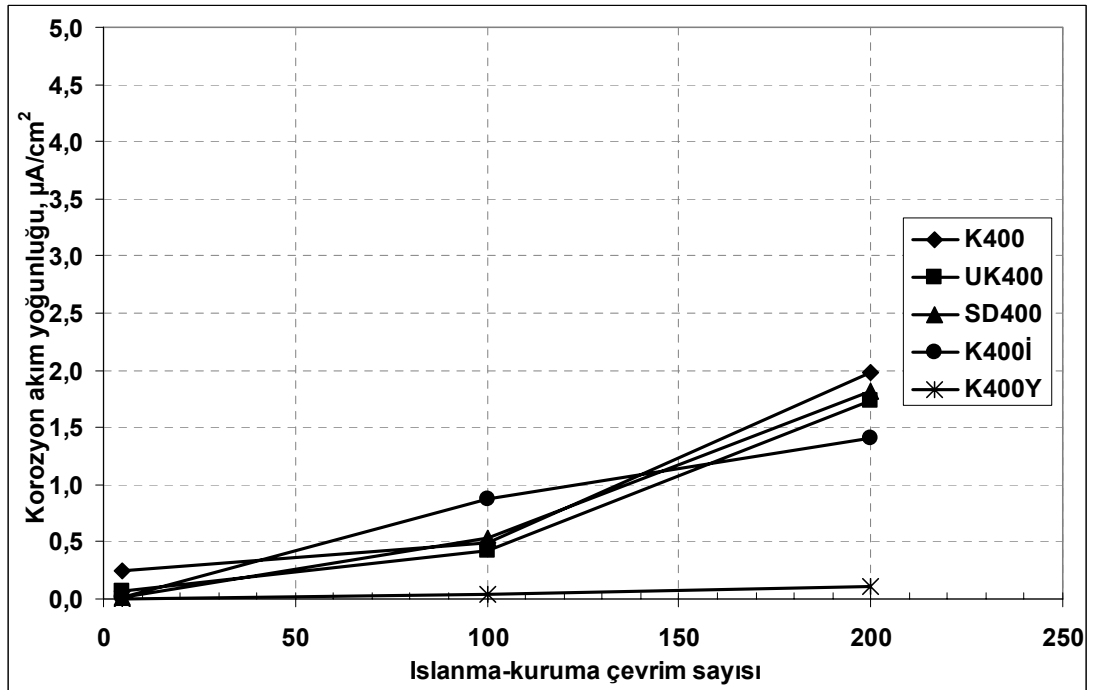
Kod	Çevrim sayısı	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	CR (mm/yıl)
K400	5	-517	0,239500	0,002777
	100	-624	0,486875	0,005650
	200	-637	1,983333	0,023003
UK400	5	-556	0,066313	0,000769
	100	-628	0,424167	0,004920
	200	-607	1,729167	0,020014
SD400	5	-600	0,013181	0,000153
	100	-569	0,528333	0,006131
	200	-642	1,820833	0,021135
K400İ	5	-643	0,018933	0,000220
	100	-475	0,876250	0,010170
	200	-508	1,412500	0,016421
K400Y	5	-288	0,000763	0,000009
	100	-291	0,037563	0,000435
	200	-330	0,111063	0,001288

Yüksek dayanımlı betonlardaki donatıların elektrot potansiyeli değerlerinin ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre değişimi Şekil 8.21’de sunulmuştur. Yüksek dayanımlı kontrol betonu ile uçucu kül, silis dumanı ve inhibitör katkılı betonlar ile hazırlanmış örneklerde, korozyon potansiyeli değerlerinin NaCl çözeltisinde ıslanma kuruma çevrimlerinde -500 ile -650 mV arasında değerler aldığı görülmektedir. Bir diğer deyiş ile aktif korozyon gelişimi %90’dan daha büyük olasılık taşımaktadır. Epoksi yalıtım yapılmış örneklerin potansiyel değerleri ise -300 mV civarındadır.

Yüksek dayanımlı betonlar ile hazırlanmış numunelerden elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre değişimi Şekil 8.22’de sunulmuştur.



Şekil 8.21 NaCl ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz yüksek dayanımlı numunelerde elektrot potansiyeli değerlerinin değişimi.



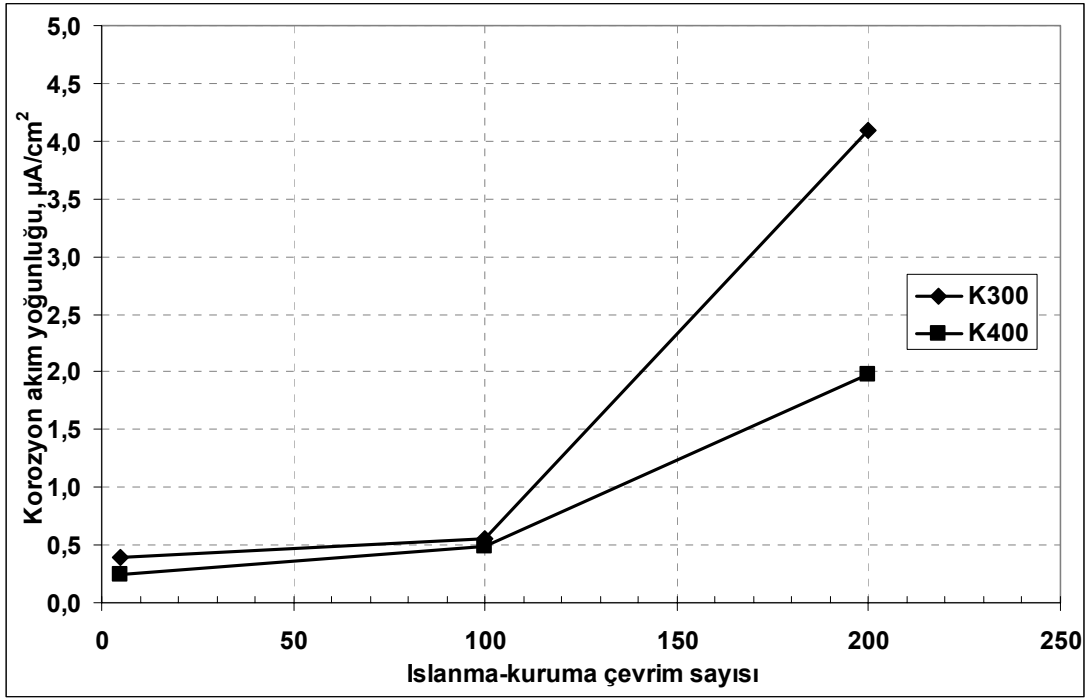
Şekil 8.22 NaCl ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz yüksek dayanımlı numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin değişimi.

Normal dayanımlı betonlar ile benzer şekilde yüksek dayanımlı betonlarda da korozyon hızı, başlangıç aşamasında oldukça düşük, ilerleyen yayınma periyodunda yüksek sınıfta değerler almaktadır. Klorür iyonlarının donatıya ulaşmalarının ardından korozyon hızı kazanmıştır.

Ancak yüksek dayanımlı beton kullanımında, 200 çevrim sonunda elde edilen değerler daha düşüktür. Bu durum yüksek performanslı betonların daha az boşluk içermesi ve daha yüksek geçirimsizliğe sahip olması sebebi ile gerçekleşmiştir.

Herhangi bir katkı içermeyen yüksek dayanımlı kontrol karışımı (K400) ıslanma-kurumada, 200 çevrim sonunda $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu değerine ulaşmıştır. Uçucu kül katkılı (UK400) ve silis dumanı katkılı (SD400) betonlar ise $1,7-1,8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ civarında korozyon akım yoğunluğu değerleri vermiştir. İnhibitörlü (K400İ) örneklerde ise 100 çevrimde kontrol betonuna göre nispeten yüksek değer elde edilmesine rağmen, uzun dönemde $1,4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değeri ile kontrole göre daha düşük korozyon akım yoğunluğu ölçülmüştür. Yalıtımlı örneklerde (K400Y) ise ihmal edilebilir düzeyde korozyon gelişimi söz konusudur.

Normal dayanım sınıfındaki (C30 mertebesinde) betonlar ile karşılaştırıldığında yüksek dayanımlı betonlar (C60 mertebesinde) ile üretilmiş elemanlarda donatı korozyon hızları daha düşük düzeyde kalmıştır (Şekil 8.23). Yüksek dayanımlı beton kullanılması halinde, ilerleyen aşamalarda korozyon hızı normal betona göre yaklaşık olarak yarıya düşmektedir. Bu durum TS-EN 206-1'de belirtilen klorür kaynaklı korozyon durumunda beton sınıfı, en büyük su/çimento oranı ve en küçük çimento dozajı gibi değişkenlerin önemini ortaya koymaktadır. Yüksek performanslı beton kullanımı ile geçirimsizlik azalmakta, böylece fiziksel ve kimyasal koruma artmaktadır.



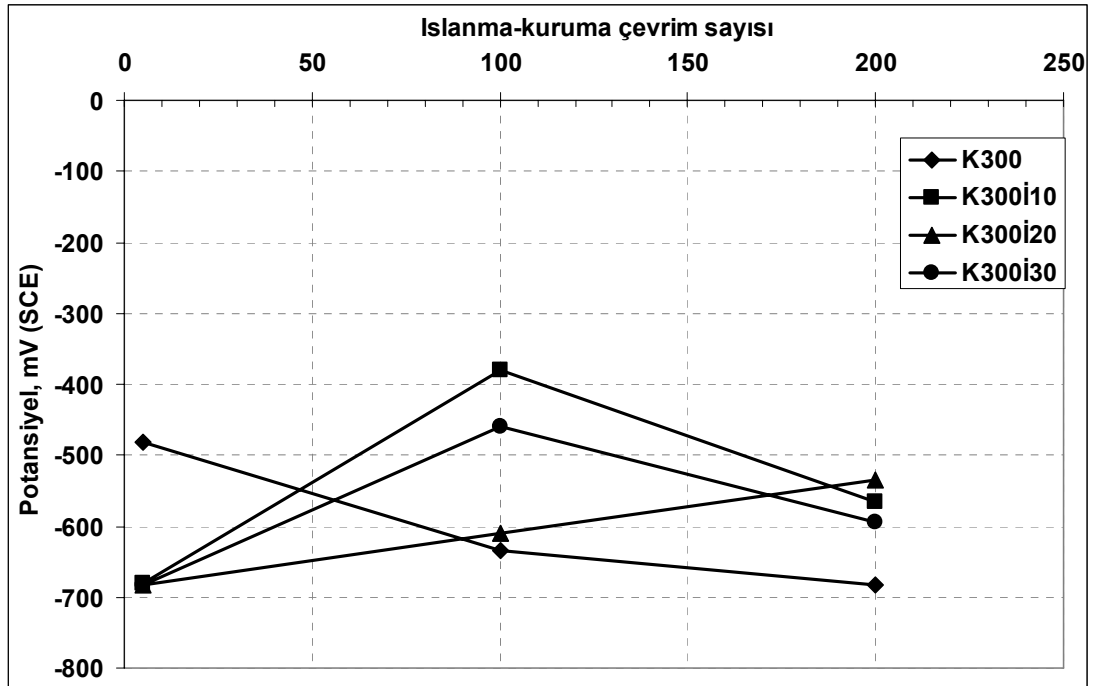
Şekil 8.23 NaCl ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz normal ve yüksek dayanımlı örneklerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin karşılaştırılması.

NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisinde tutulmuş olan değişik oranlarda inhibitör içeren normal dayanımlı örneklerin ölçüm sonuçları Tablo 8.10'da gösterilmiştir.

Düşük ve yüksek oranlarda kullanılsa dahi, karışımlardaki donatıların elektrot potansiyeli değerlerinin -400 ile -700 mV arasında olduğu görülmektedir (Şekil 8.24). Bu durum inhibitör içeren ve içermeyen betonlardaki donatılarda aktif korozyon gelişiminin bir göstergesidir.

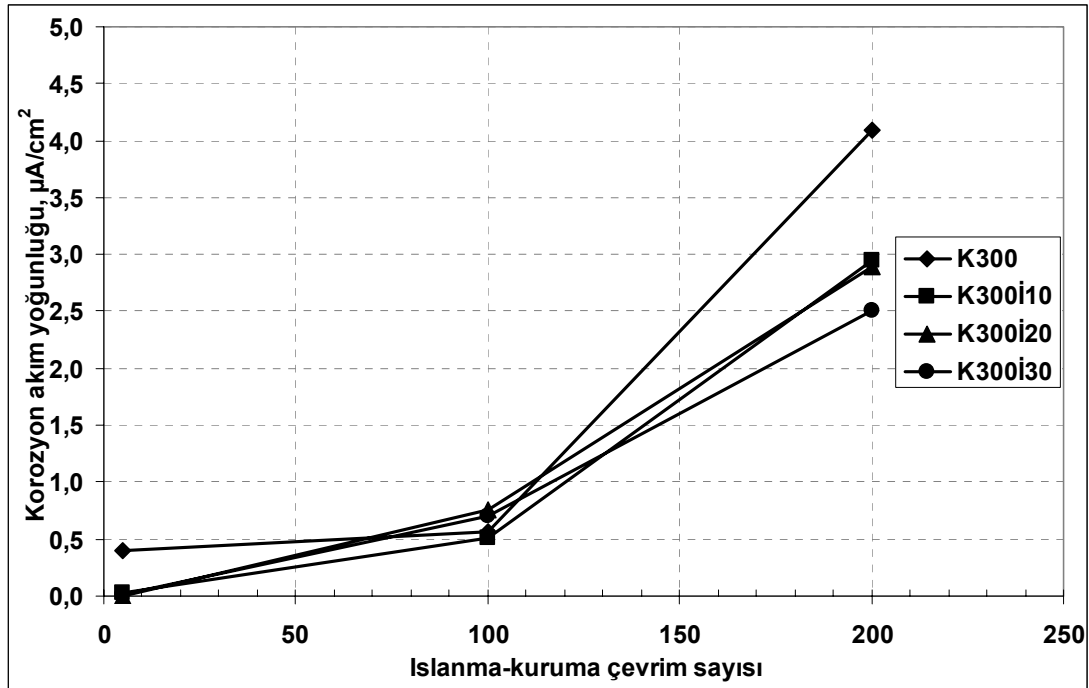
Tablo 8.10 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisindeki değişik dozajlarda inhibitör içeren betonlarda korozyon ölçüm sonuçları

Kod	Çevrim sayısı	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	CR (mm/yıl)
K300	5	-482	0,399458	0,004636
	100	-633	0,560000	0,006499
	200	-683	4,095833	0,047540
K300İ10	5	-681	0,023538	0,000273
	100	-381	0,507917	0,005894
	200	-565	2,950000	0,034188
K300İ20	5	-683	0,005971	0,000069
	100	-609	0,754375	0,008755
	200	-534	2,887500	0,033465
K300İ30	5	-682	0,009844	0,000114
	100	-460	0,705000	0,008182
	200	-594	2,512500	0,029170



Şekil 8.24 NaCl ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz değişik oranlarda inhibitör içeren numunelerde elektrot potansiyeli değerlerinin değişimi.

İnhibitör oranının incelendiği serilerde, ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre korozyon akım yoğunluğu değerlerini Şekil 8.25'ten izlemek mümkündür.



Şekil 8.25 NaCl ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz değişik oranlarda inhibitör içeren numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin değişimi.

Başlangıç aşamasında düşük hızlarda seyreden korozyon 200 çevrimde kontrol karışımında $4,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu değerine ulaşmıştır. Islanma-kuruma etkisinin 100. çevriminde kontrol karışımı ile benzer değerler göstermesine rağmen, ileri dönemde inhibitörlü karışımlarda daha düşük korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Karışımında $10 \text{ lt}/\text{m}^3$ inhibitör içeren numunelerde korozyon akım yoğunluğu, yaklaşık %28 bir azalma ile $2,95 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine düşmüştür. Daha yüksek inhibitör dozajları korozyon akım yoğunluğu değerlerini bir miktar daha düşürmüştür. Ancak azalma yüksek oranda değildir. En yüksek dozaj olarak $30 \text{ lt}/\text{m}^3$ değerinde inhibitör kullanılan örneklerde kontrol karışımına oranla %40 bir azalma sağlanmıştır.

Genel olarak bakıldığında inhibitör içeren ve içermeyen örneklerde korozyon gelişim hızı uzun dönemde “yüksek” sınıflandırmasına girmektedir. İnhibitör kullanımı korozyon akım yoğunluğu değerlerini azaltsa da bir düşük sınıf olan “orta” seviyede korozyon gelişimine indirmeyi başaramamıştır.

İnhibitör kullanım dozajı 10 lt/m³ ile 30 lt/m³ arasında uzun dönemde korozyon akım yoğunluğu değerlerinde azalma olsa da ciddi farklılıklar görülmemiştir. Bu nedenle karışımlarda 10 lt/m³'ten daha fazla inhibitör kullanımı pratik yönden etkin değildir.

Donatı korozyonuna karşı birer önlem olarak, beton karışımlarında mineral katkı ve inhibitörün birlikte kullanılmasına yönelik olarak hazırlanan örneklerden ilginç ve çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Normal ve yüksek performanslı betonlarda kalsiyum nitrit esaslı inhibitör ile uçucu kül veya silis dumanının birlikte kullanılması durumunda Tablo 8.11'deki değerler ölçülmüştür.

Tablo 8.11 İnhibitör ve mineral katkının birlikte kullanıldığı betonlarda NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisindeki korozyon ölçüm sonuçları

Kod	Çevrim sayısı	E _{corr} (mV)	I _{corr} (µA/cm ²)	CR (mm/yıl)
UK300İ	5	-664	0,103750	0,001205
	100	-592	1,054167	0,012241
	200	-583	6,591667	0,076496
SD300İ	5	-656	0,006813	0,000079
	100	-586	0,567083	0,006582
	200	-554	3,516667	0,040757
UK400İ	5	-659	0,020833	0,000242
	100	-515	1,498750	0,017385
	200	-593	4,666667	0,054163
SD400İ	5	-659	0,017973	0,000209
	100	-536	0,670000	0,007775
	200	-602	3,054167	0,035447

Mineral katkıların ve inhibitörün birlikte kullanıldığı örneklerde önceliklere göre daha yüksek korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Oysa tek başlarına kullanıldıklarında mineral katkıları da, inhibitör de korozyon akım yoğunluğu

değerlerini azaltmıştır. Birlikte kullanılmaları durumunda daha iyi performans elde edileceği beklenmekte idi. Örneğin UK300İ kodlu örneklerde 200 çevrim sonunda korozyon akım yoğunluğu $6,59 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür. Bu değer hiçbir önlem alınmamış (K300), karışımda uçucu kül kullanılmış (UK300) ve karışımda inhibitör kullanılmış (K300İ), numunelerde ölçülen değerlerden daha yüksek olarak ölçülmüştür. Benzer sonuç silis dumanı içeren karışımlar ve yüksek dayanımlı beton karışımları için de geçerlidir.

Karşılaşılan bu sonuç, beton karışımlarında mineral katkıları ile inhibitör malzemelerin bir arada kullanımının donatıdaki korozyon davranışı açısından bir uyumsuzluk teşkil ettiğini göstermektedir. Bu konu ayrı bir çalışma kapsamında detaylı olarak araştırılmalıdır.

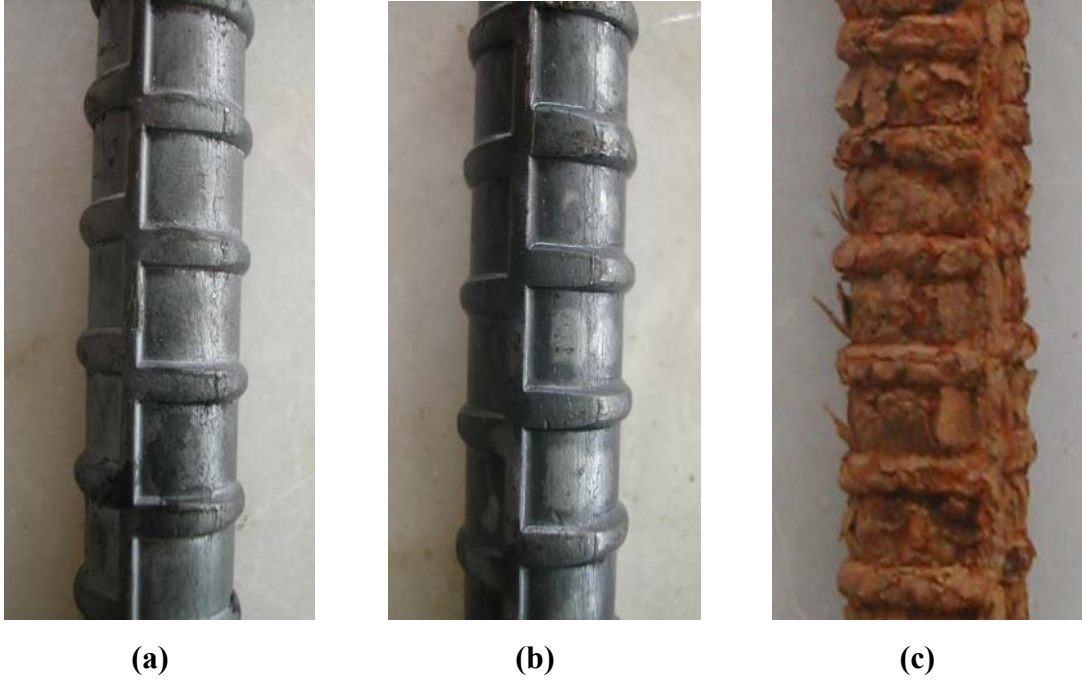
Islanma-kuruma çevrimleri sonrasında kontrol ve mineral katkılı betonlara gömülü donatılar beton içerisinden çıkarılmıştır. Şekil 8.26'da normal dayanımlı betonlar içerisinde çıkarılmış donatılar görülmektedir.



Şekil 8.26 NaCl çözeltisinde 200 ıslanma-kuruma çevriminden sonra beton içerisinden çıkarılan donatılar.

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

Şekil 8.27’de farklı ortamlarda saklanmış yalın donatılar görünmektedir. Şekilde a'daki donatı atmosfere kapalı ve kuru yerde muhafaza edilmiş ve çevresel etkilerden korunmuştur. Şekil 8.27-b'deki donatı standart kür havuzunda saklanmıştır. Şekil 8.27-c'deki donatı ise hızlandırılmış korozyon kabininde 200 ıslanma-kuruma çevrimi geçirmiştir. Islanma-kuruma etkisine maruz kalmış donatıda yüksek hızda korozyon geliştiği görülmektedir.



Şekil 8.27 Farklı çevresel koşullarda saklanan donatılar.

Islanma-kuruma etkisine maruz kalmış donatıda 66 çevrim sonunda %0,79, 200 çevrim sonunda % 6,4 kütle kaybı ölçülmüştür. Üniform korozyon gelişimi kabulü ile bu kayba karşı gelen çap azalması ise sırasıyla yaklaşık olarak 0,0600 mm ve 0,5205 mm olarak hesaplanmıştır.

8.6 Değerlendirmeler

Gerekçeleri önceki bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanan ikinci aşama deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Hızlı klor geçirimsizliği değerleri açısından bakıldığında çimento yerine %40 oranında uçucu kül kullanımı geçirimsizlik değerlerini %57 oranında %10 oranında silis dumanı kullanımı hızlı klor geçirimsizliği değerlerini yaklaşık %81 mertebesinde azalmıştır. Yüksek performanslı beton kullanımı durumunda klor geçirimsizlik değerleri % 62–63 oranında daha azdır.

Mineral katkı içermeyen kontrol betonu, NaCl çözeltisinde 200 ıslanma-kuruma çevrimi sonunda tamamen klor iyonları tarafından kirletilmiştir. Sözü edilen oranlarda uçucu kül (%40) ya da silis dumanı (%10) kullanılarak, klor işleme derinliğinin %50'den daha fazla oranlarda azaltılabileceği görülmüştür.

Hızlı klor geçirimsizliği deneyi verileri ile klor penetrasyon derinliği deney verileri arasında iyi bir ilişki tespit edilmiştir. Elde edilen grafiğe göre hızlı klor iyon geçirimsizliği değerleri klor penetrasyon derinliği değerlerinin karesi ile orantılıdır.

Hızlandırılmış korozyon etkisinde başlangıç aşamalarında korozyon akım yoğunluğu değerleri çok düşük iken çevrim sayısı artıkça korozyon gelişimi de hızlanmıştır. Numunelere klor iyonu penetrasyonu arttıkça korozyon hızı değerleri de artış göstermiştir. Bu durum iki aşamalı korozyon modeli ile iyi bir uyum göstermektedir.

Mineral katkı kullanımı korozif ortamda (NaCl ıslanma-kuruma) başlangıçta ve uzun dönemde korozyon akım yoğunluğu değerlerini azaltmıştır. Yüksek performanslı betonlarda daha düşük korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Bir diğer deyişle korozyon gelişimi daha yavaştır. İnhibitör kullanımı açısından bakıldığında normal ve yüksek performanslı betonlarda inhibitör kullanımının korozyona olumlu etki yaptığı, kullanım dozajı açısından

incelendiğinde ise, 10 lt/m³ kullanımının nispeten etkili olduğu, fazlasının pratik bir fayda sağlamadığı görülmüştür. Epoksi malzeme ile yalıtım yapılan numunelerde korozyon gelişiminin çok düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir (korozyon ihmal edilebilir düzeydedir). Korozyondan korunmak için en etkili yöntemin yalıtım olduğu bir kere daha vurgulanmıştır.

BÖLÜM DOKUZ
UÇUCU KÜL VEYA YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KULLANIM ORANI İLE
KÜR YÖNTEMİNİN DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ

Üçüncü aşamadaki deneysel çalışmalarda, beton karışımlarında mineral katkı olarak uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanım dozajı kapsamlı olarak incelenmiştir. Ayrıca, betona uygulanan kür yönteminin donatı korozyonuna etkisi bu aşamada ele alınmıştır. Elde edilen deneysel bulgular bu bölümde sunulmuştur.

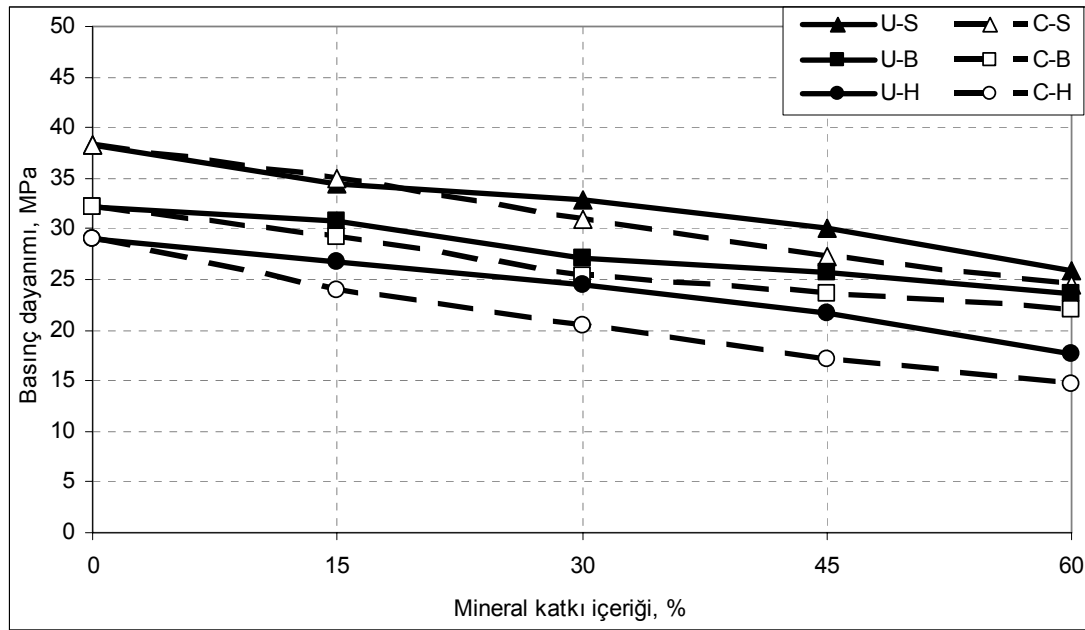
Tablo ve grafiklerde verilen deneysel bulguların daha kolay takip edilebilmesi için, kullanılan karışım kodları Tablo 9.1’de özetlenmiştir. Kodlamalarda “U” uçucu külü, “C” yüksek fırın cürufunu, “S” standart kürü, “B” buhar kürünü, “H” kür işlemi yapılmadan havada bekletilen örnek serilerini simgelemektedir.

Tablo 9.1 Beton karışımlarına ait kodlamalar

Mineral katkı	Kullanım oranı	Kür yöntemi		
		Standart kür	Buhar kürü	Kürsüz
-	-	CTRL-S	CTRL-B	CTRL-H
Uçucu kül	%15	U15-S	U15-B	U15-H
	%30	U30-S	U30-B	U30-H
	%45	U45-S	U45-B	U45-H
	%60	U60-S	U60-B	U60-H
Yüksek fırın cürufu	%15	C15-S	C15-B	C15-H
	%30	C30-S	C30-B	C30-H
	%45	C45-S	C45-B	C45-H
	%60	C60-S	C60-B	C60-H

9.1 Basınç Dayanımı Sonuçları

Değişik oranlarda uçucu kül (U) veya yüksek fırın cürufu (C) içeren karışımlara ait 28 günlük 10 cm ayrıtlı küp örneklerden elde edilen basınç dayanımı değerleri Şekil 9.1'de verilmiştir. Her değer, üç örnekten elde edilen sonuçların ortalaması olarak sunulmuştur.



Şekil 9.1 Değişik kür yöntemleri uygulanmış farklı oranlarda mineral katkı içeren betonların 28 günlük basınç dayanımı değerleri.

Bir hafta süresince standart kür uygulanmış kontrol betonunun 28 günlük basınç dayanımı 38,2 MPa değerindedir. Kullanılan uçucu kül oranı arttıkça bu değer aşamalı olarak azalmıştır. Uzun dönemli olarak ıslak kür edilmiş, optimum miktarda uçucu kül içeren betonların uzun dönemli dayanımlarının uçucu kül içermeyen kontrol betonuna göre daha yüksek olması beklenir. Bu durum puzolanik reaksiyonların bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak yukarıdaki grafik, kısa bir dönem ıslak kür edilmiş betonlara aittir. Ayrıca 28 gün, puzolanik reaksiyonlar için nispeten kısa bir süredir. Dolayısıyla, uçucu kül oranı artışı ile basınç dayanımı değerlerinin doğrudan azalması, belirli bir optimum dozajda daha

yüksek basınç dayanımı elde edilememesinin sebebi, puzolanik reaksiyonların gelişmemiş olması veya yetersiz oranda gelişmesidir.

Bu durum buhar kürü uygulaması yapılmış ve herhangi bir kür görmemiş numuneler için de geçerlidir.

Dört saat 65 °C'lik buhar kürü geçirmiş numunelerin basınç dayanımları, yedi gün standart kür görmüş numunelerin basınç dayanımı değerlerinin altında kalmıştır. Uygulanan buhar kürünün kısa süreli ve yumuşak bir çevrim olması nedeni ile basınç dayanımlarının daha düşük kaldığı görülmektedir. Ayrıca, buhar kürü geçirmiş numunelerin erken yaşlardaki hızlı reaksiyonları sebebiyle daha boşluklu bir matris oluşturdukları bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla 28 gün gibi daha uzun bir zamanda basınç dayanımı değerleri standart kürlü betonlara göre daha düşük kalmaktadır.

Herhangi bir kür işlemi yapılmadan havada bekletilmiş beton numunelerin basınç dayanımı değerleri en düşük seviyede kalmıştır. Yetersiz miktarda gelişen hidrasyon reaksiyonları sonucu beklenen bir durumdur. Burada asıl yapılmak istenen, şantiyede kür işlemi yapılmamış veya yeterince önem verilmemiş betonlara gömülü donatılarda korozyon gelişiminin incelenmesidir.

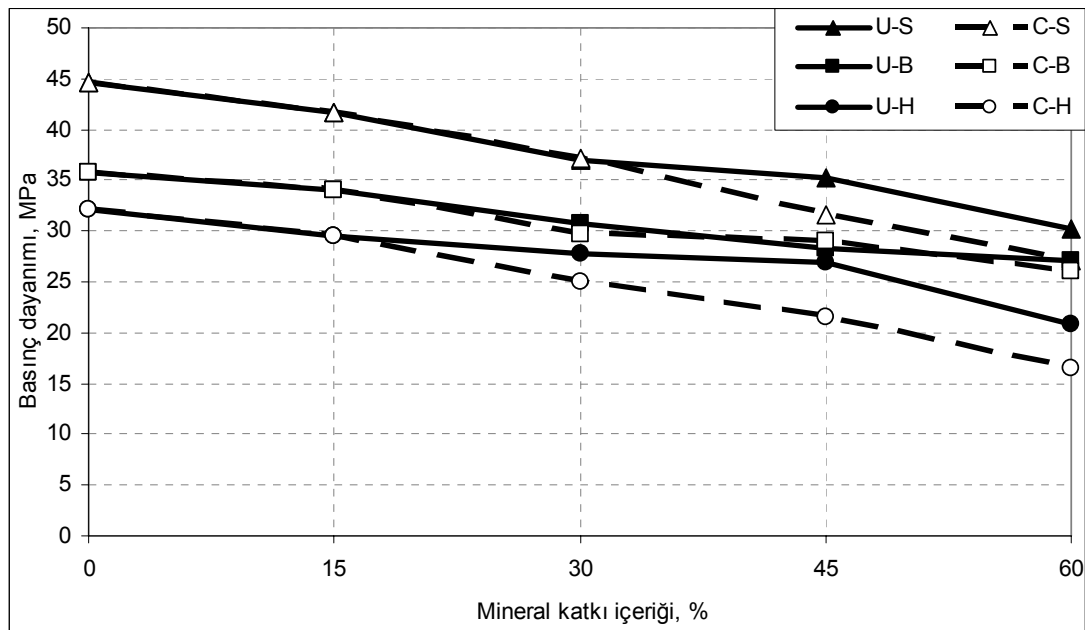
Deney verilerine göre, standart kürlü betonlar en yüksek dayanım değerlerini, kürsüz betonlar en düşük dayanım değerlerini vermiştir. Buhar kürü geçirmiş numuneler ise arada değerler almıştır.

Uçucu kül içeren karışımlara benzer şekilde yüksek fırın cürufu katkılı betonlar da mineral katkı oranı arttıkça aşamalı olarak daha düşük dayanım değerleri almıştır. Burada da sebep puzolanik reaksiyonların iyi bir şekilde gelişmemesidir. Tüm kür yöntemlerinde kendini gösteren bu durum havada kür durumunda daha belirgindir.

Grafiğe göre her kür koşulunda da aynı dozajlardaki uçucu küllü karışımlar, yüksek fırın cürufu içeren karışımlara göre bir miktar daha yüksek basınç dayanımı değerleri vermiştir.

Yüksek mineral katkı dozajlarında kürsüz numunelerin basınç mukavemetleri ile buhar kürü ya da standart kür gören örneklerin basınç mukavemetleri arasındaki fark artmaktadır. Bu durum yüksek ikame oranlarında kür hassasiyetinin artması ile açıklanmaktadır.

Aynı karışım ve kür yöntemlerine ait örneklerin 150 günlük basınç dayanımı değerleri ise Şekil 9.2’de verilmiştir.



Şekil 9.2 Değişik kür yöntemleri uygulanmış farklı oranlarda mineral katkı içeren betonların 150 günlük basınç dayanımı değerleri.

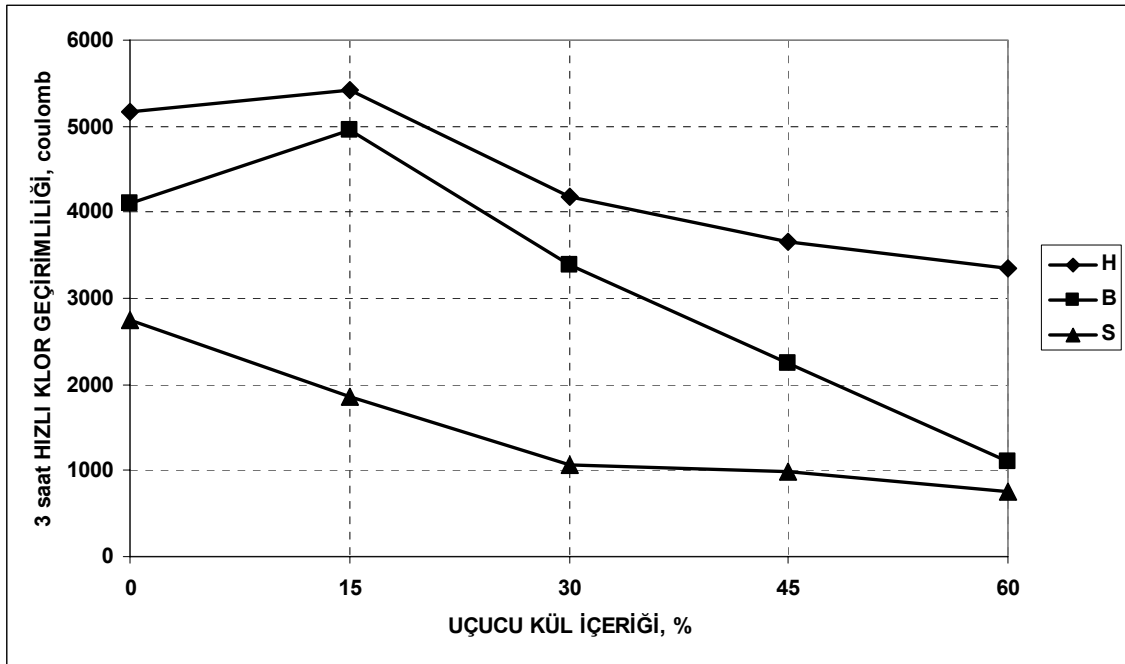
Basınç dayanımı açısından 28 günlük değerler ile karşılaştırıldığında 150 günlük basınç dayanımı değerlerinin bir miktar daha arttığı, ancak katkı içeriği ile eğilimin değişmediği görülmektedir. %15 ve %30 oranlarında yüksek fırın cürufu kullanılan karışımların, uçucu küllü betonların basınç dayanımı değerlerini yakaladığı görülmektedir. Değerler topluca Tablo 9.2’de gösterilmiştir.

Tablo 9.2 Beton karışımlarının basınç dayanımı değerleri

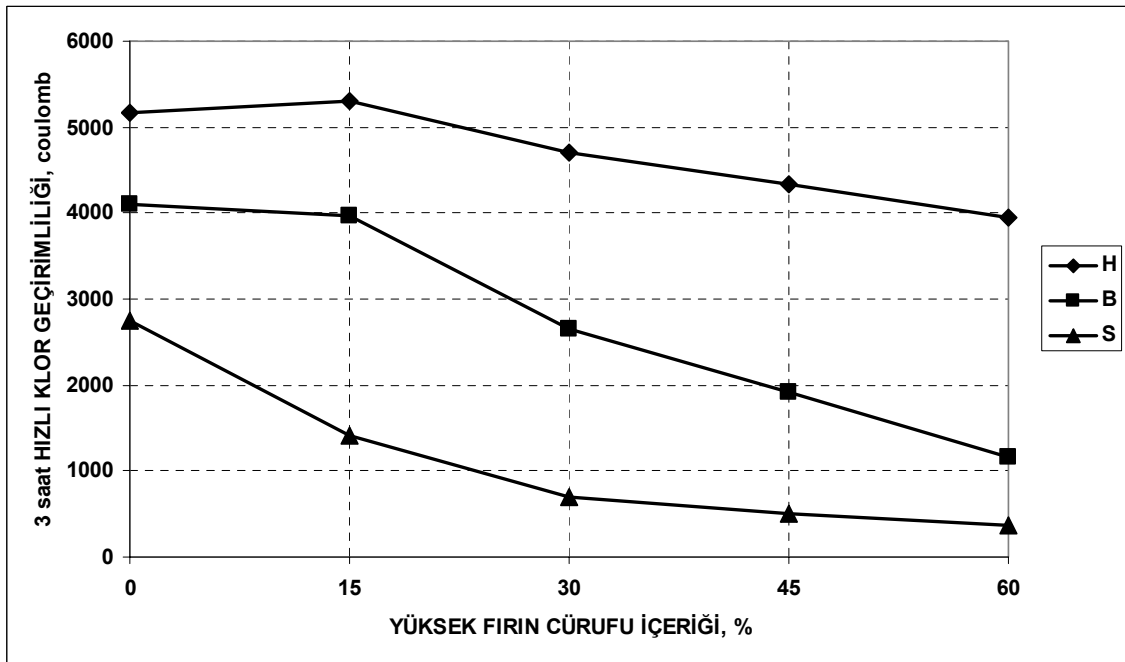
Karışım kodu	28 günlük basınç dayanımı, MPa			150 günlük basınç dayanımı, MPa		
	S	B	H	S	B	H
CTRL	38,2	32,2	29,0	44,6	35,7	32,2
U15	34,5	30,7	26,8	41,7	34,0	29,5
U30	32,9	27,1	24,4	37,0	30,7	27,8
U45	30,1	25,8	21,7	35,3	28,2	26,9
U60	25,9	23,6	17,7	30,2	27,0	20,9
CTRL	38,2	32,2	29,0	44,6	35,7	32,2
C15	35,0	29,2	24,0	41,8	34,0	29,5
C30	31,0	25,4	20,5	37,2	29,6	24,9
C45	27,3	23,7	17,2	31,6	29,0	21,6
C60	24,5	22,1	14,6	27,1	26,1	16,5

9.2 Hızlı Klor Geçirirliği Test Sonuçları

Detayları Bölüm 6.4.4’de verilen ASTM C1202 standardına göre hızlı klor geçirirliği deneyi altı saat sürmektedir. Ancak, deney kararlı hale geldikten sonra hücreden geçen elektriksel yük miktarı zamanla doğrusal olarak değiştiğinden ve uzun bekleme sürelerinde hücrede ısınma problemleri doğduğundan deneyler 3 saatte bitirilmiştir. Şekil 9.3’te uçucu kül içeren betonların, Şekil 9.4’de ise yüksek fırın cürufu içeren betonların, kür yöntemlerine ve mineral katkı oranlarına göre hızlı klor geçirirliği değerleri sunulmaktadır.



Şekil 9.3 Uçucu kül içeren karışımların hızlı klor geçirimliliği değerleri.



Şekil 9.4 Yüksek fırın cürufu içeren karışımların hızlı klor geçirimliliği değerleri.

Grafiklere göre her iki mineral katkı tipi için benzer eğilimler söz konusudur. Klor geçirimliliği betonun boşluk yapısı ve elektriksel direnci ile doğrudan ilişkilidir. Kür görmemiş ya da yetersiz kür uygulaması yapılmış örnekler daha fazla boşluk

içermesi nedeni ile yüksek geçirimsilik değerleri vermektedir. Standart kür yapılmış numunelerde en düşük değerler elde edilmiştir. Bölüm 8'deki bulgularda sözü edildiği gibi, uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun betonun elektriksel direncini arttırmaktadır. Mineral katkıların tek oranda kullanılması durumunda çıkan sonuçlar, bu bölümde de yüksek kullanım oranlarında daha belirgin hale gelmiştir. Benzer bir mekanizma ile katkı kullanım oranı arttıkça klor geçirimsiliği değerleri önemli oranda azalmaktadır. Bu durum standart kürlü örneklerde daha çarpıcıdır.

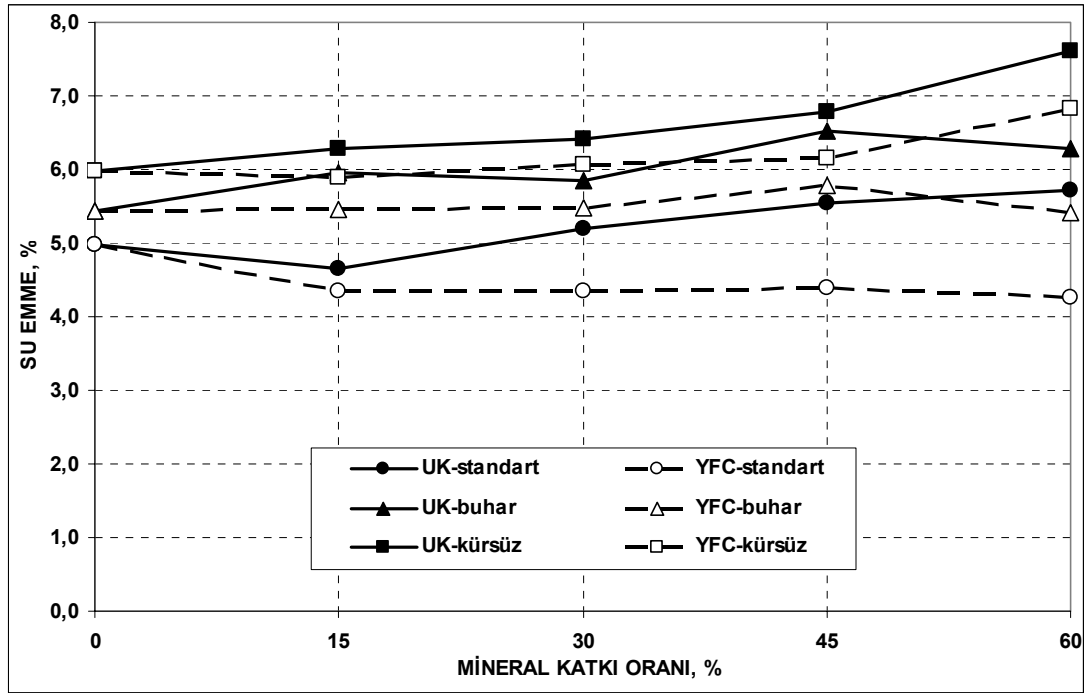
9.3 Su Emme Deneyleri

Sertleşmiş betonlarda 28. günde yapılan, detayları 6.5.4 bölümünde verilen su emme deney sonuçları Tablo 9.3'te ve grafiksel olarak eğilimler Şekil 9.5'de sunulmaktadır.

Tablo 9.3 Beton Karışımlarının su emme değerleri

Karışımlar		Su emme (%)		
		S	B	H
UK serisi	CTRL	4,99	5,45	5,98
	U15	4,65	5,95	6,29
	U30	5,19	5,84	6,42
	U45	5,55	6,52	6,78
	U60	5,72	6,28	7,60
YFC serisi	CTRL	4,99	5,45	5,98
	C15	4,35	5,45	5,89
	C30	4,35	5,47	6,07
	C45	4,39	5,79	6,14
	C60	4,27	5,42	6,82

Kür yöntemi açısından bakıldığında standart kürlü örnekler en düşük su emme oranına sahip iken, herhangi bir kür işlemi yapılmamış örnekler en yüksek su emme oranlarına sahiptir. Bu durum, betonun daha iyi kür edilerek daha boşluksuz bir yapı elde edilmesi ile paralellik göstermektedir.



Şekil 9.5 Mineral katkı tipi, oranı ve kür yöntemine göre betonların su emme değerleri.

Mineral katkı tipi değerlendirildiğinde ise yüksek fırın cürufu içeren karışımların uçucu kül içeren karışımlara göre daha düşük su emme değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Mineral katkı kullanılan betonlarda yeterli kür uygulaması ile belirli bir optimum kullanım oranında betonun boşluk miktarının azaldığı bilinmektedir. Ancak, genel olarak bakıldığında grafikte, artan mineral katkı oranı ile su emme değerlerinin artış eğilimi göze çarpmaktadır. Bu durum, üç kür sürecinin de mineral katkılı seriler için yeterli olmadığı sonucunu göstermektedir.

9.4 pH ölçümleri

Taze ve sertleşmiş betonların pH değerleri Bölüm 6.5.4'de anlatılan yöntemle göre belirlenmiştir. Hazırlanan beton karışımlar üzerinde gerçekleştirilen pH ölçümlerinin sonuçları Tablo 9.4'de verilmektedir. Tabloda ayrıca bağlayıcı madde olarak %100 uçucu kül ve %100 yüksek fırın cürufu içeren karışımların pH değerlerine de yer verilmiştir.

Taze halde tüm çimentolu sistemlerde pH değeri 12,5-12,7 mertebesindedir. Karışımlarda %100 uçucu kül kullanımı pH değerlerini 12,4 mertebesine, %100 yüksek fırın cürufu kullanımı ise 11,2 mertebesine kadar düşürmektedir.

Sertleşmiş durumdaki betonların pH değeri ölçülürken toz numune alınan bölgenin derinliği karbonatlaşma olayı nedeni ile önem arz etmektedir. Aynı karışımlar ile hazırlanmış donatılı beton örnekler göz önünde bulundurularak, pH ölçümü için alınacak toz numune donatı derinliğinden alınmıştır. Bu durumda, örneklerde paspayı tabakası 3 cm olduğuna göre, toz numuneler örnek yüzeyinden itibaren 2-3 cm aralığından alınmış ve pH değerleri belirlenmiştir.

Genel olarak bakıldığında karışımların pH değeri, hazırlandıktan sonra 1 yıl içerisinde kademeli olarak 0,5–0,6 birim azalmıştır. Bu azalmanın havada bekleyen numunelerde gelişen karbonatlaşma olayından kaynaklandığı düşünülmektedir. Karbonatlaşma cephesi donatıya ulaşmamış olsa da yüzeyden itibaren kademeli olarak bir profil gösterdiği Şekil 4.10'dan görülebilir. Bir yıllık atmosfer etkisi sonucunda pH değerleri 12,0 mertebesine inmiştir.

Aynı karışımlardan alınan örneklerin bir diğer bölümü ise, 28 gün sonra %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Etki süresince 200. ve 400. çevrimlerde pH değerleri belirlenmiş ve elde edilen veriler Tablo 9.5'de verilmiştir.

Beton bünyesine nüfuz eden klor iyonlarının betonun pH değerini bir miktar düşürdüğü bilinmektedir. Benzer şekilde, elde edilen deneysel verilere göre tuzlu suda 400 ıslanma-kuruma çevriminin ardından örneklerin pH değerleri 0,5-0,7 düzeyinde azalmıştır. Kürsüz (havada bekletilmiş) numunelerde bu azalma daha belirgindir. Yine yüksek mineral katkı kullanım dozajlarında da pH'ta daha fazla azalma eğilimi görülmektedir.

Tablo 9.4 Hazırlanan karışımların zamana göre pH değerleri

S-Standart kür		Taze hal	Sertleşmiş			
			7. gün	28. gün	150. gün	365. gün
UK	CTRL-S	12,70	12,60	12,40	12,50	12,18
	U15-S	12,60	12,60	12,40	12,50	12,12
	U30-S	12,60	12,60	12,40	12,40	12,07
	U45-S	12,50	12,50	12,40	12,30	12,02
	U60-S	12,50	12,50	12,30	12,20	11,98
	U100-S	12,40	12,00	11,10	-	-
YFC	CTRL-S	12,70	12,60	12,40	12,50	12,18
	C15-S	12,60	12,50	12,40	12,40	12,07
	C30-S	12,60	12,50	12,30	12,30	12,04
	C45-S	12,50	12,40	12,30	12,20	12,00
	C60-S	12,50	12,40	12,20	12,10	11,96
	C100-S	11,20	10,30	10,00	-	-
B-Buhar kürü		Taze hal	Sertleşmiş			
			7. gün	28. gün	150. gün	365. gün
UK	CTRL-B	12,70	12,50	12,70	12,60	12,14
	U15-B	12,60	12,50	12,60	12,50	12,09
	U30-B	12,60	12,40	12,60	12,50	12,05
	U45-B	12,50	12,40	12,50	12,40	12,00
	U60-B	12,50	12,30	12,40	12,20	11,93
	U100-B	12,40	11,40	11,20	-	-
YFC	CTRL-B	12,70	12,50	12,70	12,60	12,14
	C15-B	12,60	12,40	12,60	12,40	12,04
	C30-B	12,60	12,40	12,60	12,30	12,00
	C45-B	12,50	12,30	12,50	12,10	11,97
	C60-B	12,50	12,30	12,30	12,00	11,92
	C100-B	11,20	10,00	9,80	-	-
H-Kürsüz		Taze hal	Sertleşmiş			
			7. gün	28. gün	150. gün	365. gün
UK	CTRL-H	12,70	12,60	12,60	12,60	12,09
	U15-H	12,60	12,60	12,60	12,50	12,03
	U30-H	12,60	12,50	12,50	12,40	12,03
	U45-H	12,50	12,50	12,50	12,20	11,99
	U60-H	12,50	12,50	12,40	12,10	11,90
	U100-H	12,40	11,50	11,20	-	-
YFC	CTRL-H	12,70	12,60	12,60	12,60	12,09
	C15-H	12,60	12,50	12,50	12,40	12,01
	C30-H	12,60	12,50	12,50	12,30	11,98
	C45-H	12,50	12,50	12,50	12,10	11,96
	C60-H	12,50	12,40	12,30	12,00	11,89
	C100-H	11,20	10,10	10,10	-	-

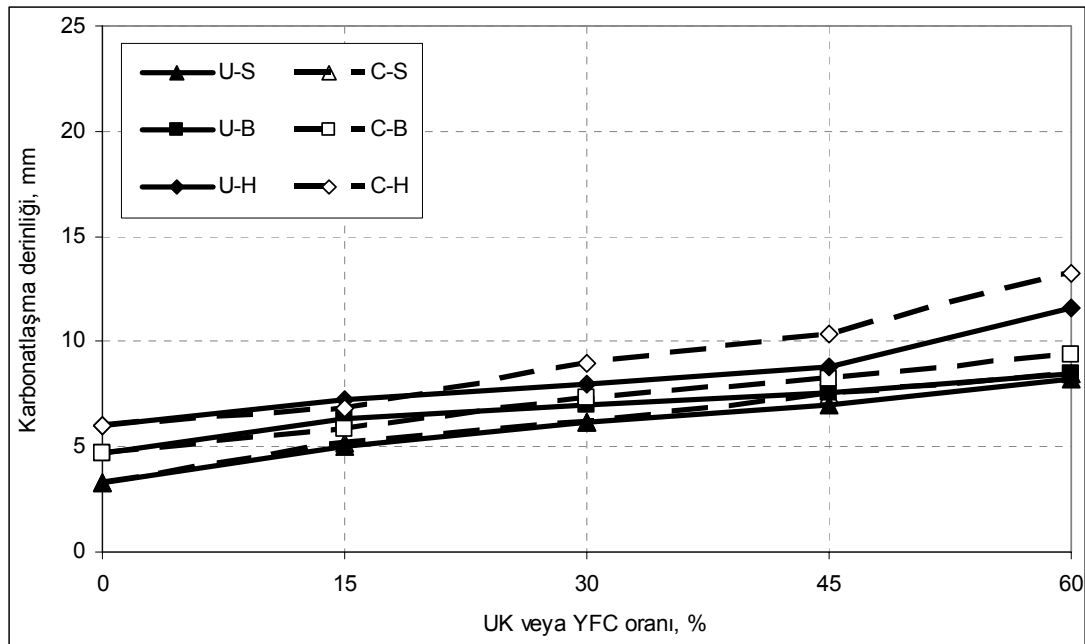
Tablo 9.5 Betonların NaCl çözeltisinde ıslanma kuruma çevrimlerindeki pH değerleri

S-Standart kür		Islanma-kuruma sonrası		
		0 çevrim	200 çevrim	400 çevrim
UK	CTRL-S	12,40	12,40	12,11
	U15-S	12,40	12,40	12,09
	U30-S	12,40	12,30	12,07
	U45-S	12,40	12,20	11,93
	U60-S	12,30	12,00	11,75
YFC	CTRL-S	12,40	12,40	12,11
	C15-S	12,40	12,40	12,11
	C30-S	12,30	12,30	12,10
	C45-S	12,30	12,20	12,03
	C60-S	12,20	12,10	11,98
B-Buhar kürü		Islanma-kuruma sonrası		
		0 çevrim	200 çevrim	400 çevrim
UK	CTRL-B	12,70	12,20	12,09
	U15-B	12,60	12,10	12,08
	U30-B	12,60	12,00	12,05
	U45-B	12,50	11,90	11,91
	U60-B	12,40	11,80	11,73
YFC	CTRL-B	12,70	12,20	12,09
	C15-B	12,60	12,20	12,09
	C30-B	12,60	12,10	12,04
	C45-B	12,50	12,00	12,00
	C60-B	12,30	11,90	11,91
H-Kürsüz		Islanma-kuruma sonrası		
		0 çevrim	200 çevrim	400 çevrim
UK	CTRL-H	12,60	12,20	12,10
	U15-H	12,60	12,20	12,07
	U30-H	12,50	12,10	12,06
	U45-H	12,50	12,00	11,90
	U60-H	12,40	11,90	11,70
YFC	CTRL-H	12,60	12,20	12,10
	C15-H	12,50	12,10	12,05
	C30-H	12,50	12,00	12,01
	C45-H	12,50	11,90	11,95
	C60-H	12,30	11,80	11,86

9.5 Karbonatlaşma Ölçümü Verileri

Korozyon ölçümleri için alınan betonarme numunelerin yanında aynı zamanda karbonatlaşma derinliğinin tespiti amacıyla 10 cm ayrıtlı küp örnekler de hazırlanmıştır. İlgili kür periyodunun ardından örnekler laboratuvar ortamında havada bekletilmiş ve çeşitli zamanlarda karbonatlaşma derinlikleri tespit edilmiştir. Deney sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

Laboratuvar ortamında 150 gün bekletilmiş numunelerden ölçülen karbonatlaşma derinliği değerleri Şekil 9.6'da, 365 gün sonunda ölçülmüş değerler ise Şekil 9.7'de mineral katkı tipi, kullanım dozajı ve kür yöntemine göre verilmiştir.

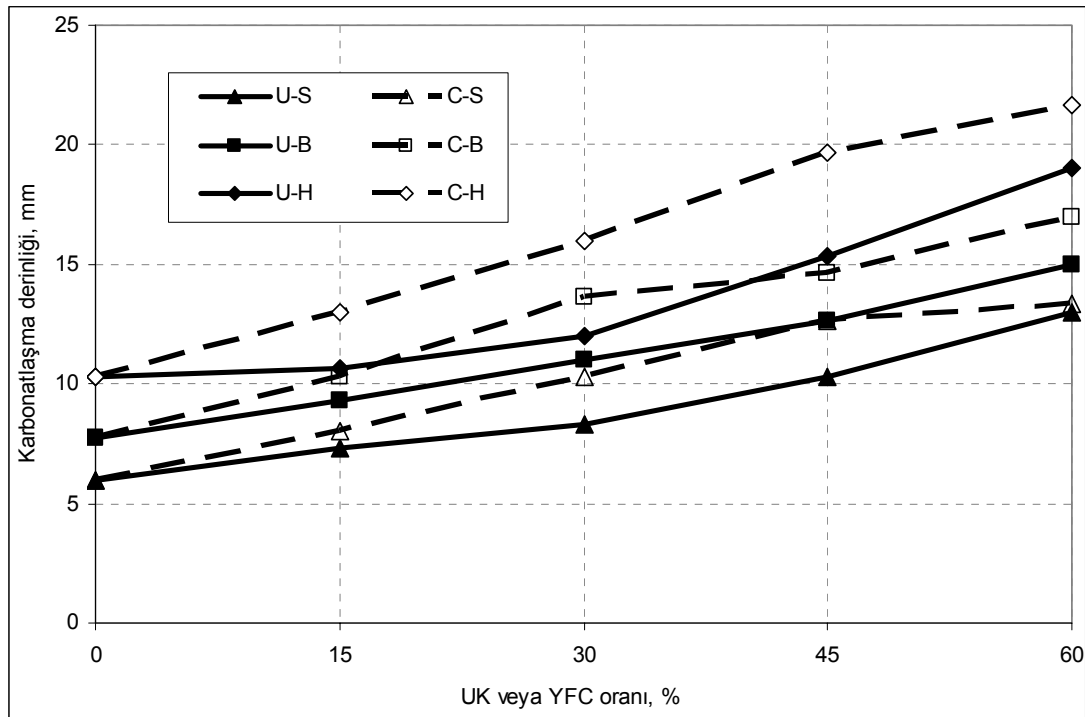


Şekil 9.6 Havada bekletilen örneklerde 150 gün sonra karbonatlaşma derinliği değerleri.

Herhangi bir mineral katkı içermeyen standart kür görmüş kontrol karışımı 150 gün sonunda 3 mm karbonatlaşma gösterirken, buhar kürü uygulanmış örneklerde 5 mm, kür uygulaması yapılmamış numuneler ise 6 mm karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Bu değerler 365 gün için sırasıyla 6, 8 ve 10 mm'dir.

Uçucu kül veya yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıkça karbonatlaşma derinliği değerleri de artış göstermiştir. Yüksek mineral katkılı sistemlerin başlangıç pH değerleri nispeten daha düşük olduğundan düşük pH'lı karbonatlaşma cephesi de daha kolay ilerleyebilmektedir. Diğer yandan, mineral katkı kullanımı ile çimentonun reaksiyon ürünü olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ puzolanik reaksiyonlar ile tüketilmektedir. Sistemde karbonatlaşacak daha az kireç kaldığından, cephe daha çok ilerlemiştir.

Gerek 150 gün gerekse 365 gün sonunda ölçülen değerler mineral katkı tipi açısından değerlendirildiğinde, karışımlarında yüksek fırın cürufu kullanılan betonlar, uçucu küllü betonlara göre daha fazla karbonatlaşma göstermiştir.



Şekil 9.7 Havada bekletilen örneklerde 365 gün sonra karbonatlaşma derinliği değerleri.

Kısa dönem ile kıyaslandığında uzun dönemde kür yöntemleri arasındaki farkların açıldığı görülmektedir. Bu farklar özellikle yüksek mineral katkı kullanım dozajlarında daha da belirgin olmaktadır.

Örneğin, karışımında çimento yerine %45 oranında yüksek fırın cürufu kullanılarak buhar kürü uygulanmış bir betonda 1 yıllık etki sonucunda karbonatlaşma cephesi 1,5 cm ilerleyebilmektedir. Eğer paspayı tabakası kalınlığı da 1,5 cm seçilerek yapı inşa edilmiş ise 1 yıl sonra karbonatlaşmadan kaynaklı korozyon riski başlamış demektir. Bu nedenle, beton karışımlarının ve paspayı tabakasının dikkatli seçilmesi büyük önem arz etmektedir.

Şekil 9.8’de bir yıl sonra karbonatlaşma derinliği tespit edilmiş kontrol betonu ve uçucu kül içeren betonlar görülmektedir. Şekilde aynı zamanda betona uygulanan kür yönteminin karbonatlaşma derinliğine etkisi de net bir biçimde görülmektedir.



Şekil 9.8 Kontrol betonu ve uçucu küllü betonlarda 1 yıl sonunda karbonatlaşma görünümleri.

Kontrol betonu ve yüksek fırın cürufu içeren betonlarda tespit edilmiş karbonatlaşma derinliği görünümleri Şekil 9.9'da verilmektedir. Kür uygulaması

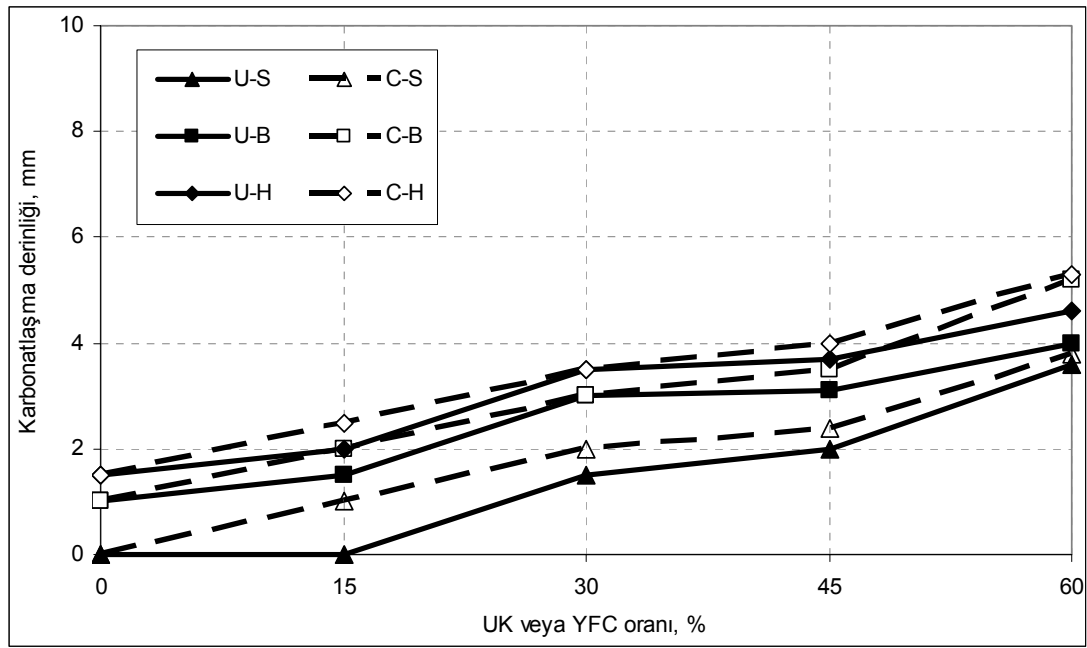
yapılmamış örneklerde karbonatlaşma cephesinin daha derinlere ilerlediği görülmektedir.



Şekil 9.9 Kontrol betonu ve cüruflu betonlarda 1 yıl sonunda karbonatlaşma görünümleri.

Bu değerler, herhangi bir zararlı çevresel ortam olmayan laboratuvar atmosferinde ölçülmüştür. Karbonatlaşma mertebesinin betondaki geçirgenlik, bağıl nem ve ortamdaki CO₂ konsantrasyonu ile ilişkili olması düşünöldüğünde, özellikle endüstriyel bölgelerde karbonatlaşma olayının çok daha hızlı ilerleyebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Islanma-kuruma sırasında gerçekleşecek karbonatlaşma olayını temsil edebilmek amacıyla, benzer şekilde hazırlanmış küp örnekler, %3,5 NaCl çözeltisine yerleştirilmiş ve kabinde 200 ıslanma-kuruma çevrimi gerçekleştirilmiştir. Çevrimler sonunda küp örnekler yarılarak karbonatlaşma derinlikleri tespit edilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 9.10'da sunulmuştur.

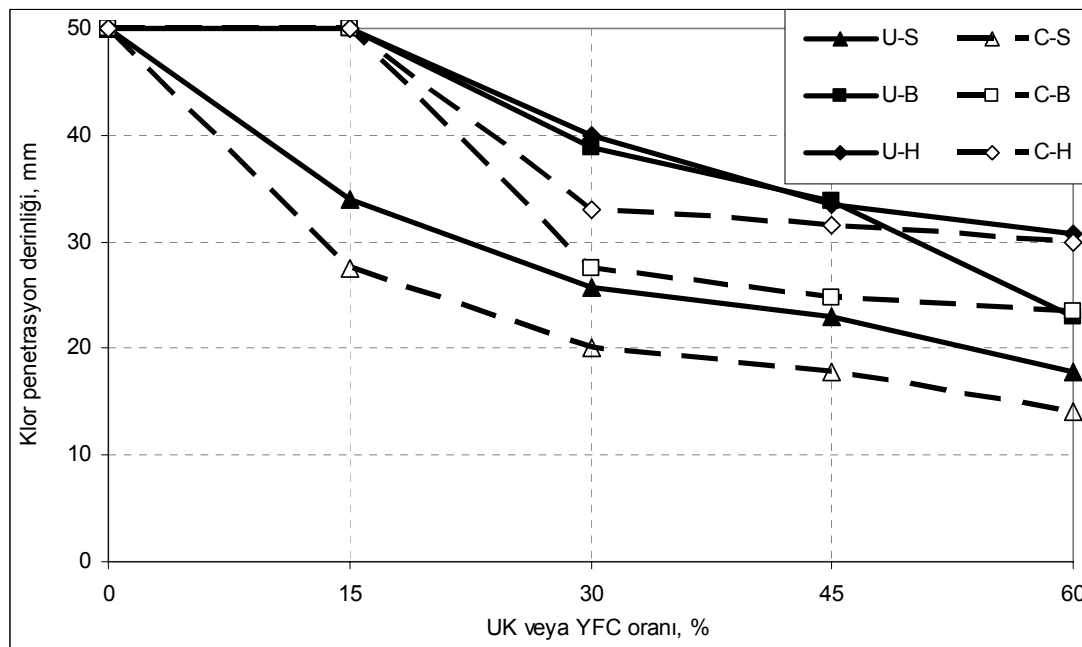


Şekil 9.10 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisinde bekletilen örneklerde 200 çevrim sonra karbonatlaşma derinliği değerleri.

Havada bekleme durumu kadar etkili olmasa da, ıslanma-kuruma etkisinde de karbonatlaşmanın gerçekleşebileceği Şekil 9.10'dan görölmektedir. Benzer eğilimler bu bekleme koşulları için de geçerlidir. Bu koşullarda, karbonatlaşmada etkili dönem kurutma aşaması olup, kurutma sırasındaki sıcak hava uygulamasının reaksiyonları bir miktar arttırabileceği düşünölmektedir.

9.6 Klor Penetrasyon Derinliği Sonuçları

Değişik oranlarda uçucu kül veya yüksek fırın cürufu içeren beton karışımlarından alınan 10 cm ayrıtlı küp numuneler ilgili kür periyodundan sonra detayları Bölüm 6.5.4'te verildiği gibi %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Etki süresince 200. ve 400. çevrimlerde klor penetrasyon derinlikleri tespit edilmiştir. Penetrasyon derinliklerinin tespitinde indikatör sıvı olarak gümüş nitrat (AgNO_3) çözeltisi kullanılmıştır. Değişik mineral katkı tipi, mineral katkı oranı ve kür yöntemlerine göre 200. çevrim sonuçları Şekil 9.11'de, 400. çevrim sonuçları ise Şekil 9.12'de sunulmuştur.



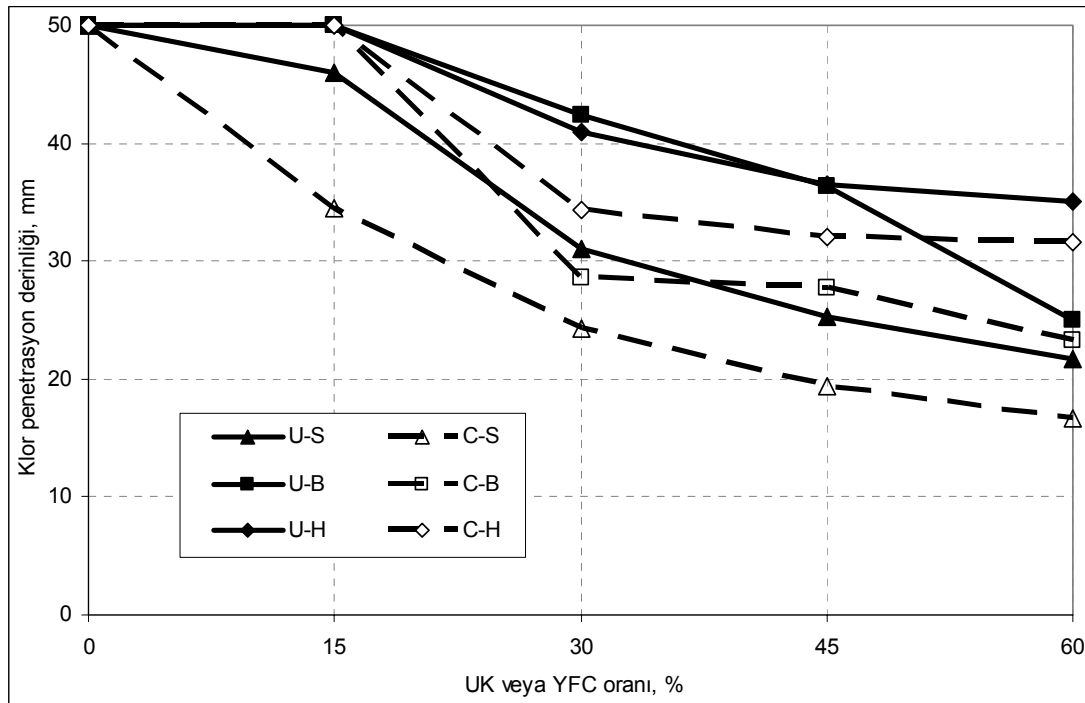
Şekil 9.11 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisinde bekletilen örneklerde 200 çevrim sonra klor penetrasyon derinliği değerleri.

Her üç kür yönteminde de herhangi bir mineral katkı içermeyen kontrol betonunun 200 ıslanma-kuruma çevrimi sonrasında tüm en kesit boyunca klorür iyonlarına maruz kaldığı görülmektedir. Çimento ağırlığınca %15 oranında uçucu kül veya yüksek fırın cürufu ikame edilmiş betonlara kür yapılmadığı ya da buhar kürü yapıldığı takdirde yine tüm kesit klor iyonları tarafından kirletilebilmektedir.

Bu ölçümler için kullanılan örnek boyutları 10 cm olması nedeni ile en fazla 50 mm penetrasyon derinliği ölçülebilmektedir. Gerçekte, sözü edilen karışımlar için klor işleme derinliği değerlerinin büyük ihtimalle daha fazla olması beklenmektedir. Dolayısıyla, uzun dönemli yapılacak ölçümlerde daha büyük boyutlu numuneler kullanılması gereği ortaya çıkmaktadır.

Kullanılan mineral katkı oranı arttıkça klor penetrasyon derinliğinin azaldığı görülmektedir. Cl iyonları beton bünyesine girdikten sonra mineral katkı tancikleri üzerine adsorbe olurlar ve alüminli bileşenler ile reaksiyon yaparak bağlanırlar. Sisteme daha fazla mineral katkı konulması klor iyonu tutma kapasitesini arttırmıştır. Bu bulgu, Polder ve Peelen (2002)'nin deniz ortamındaki mineral katkılı betonlarda daha yüksek klorid penetrasyon direnci elde etmeleri ile uyumludur.

Öte yandan aynı oranda kullanılması durumunda, yüksek fırın cürufu kullanılan karışımlar, uçucu kül kullanılan karışımlara göre daha yüksek klor penetrasyon direnci göstermiştir.



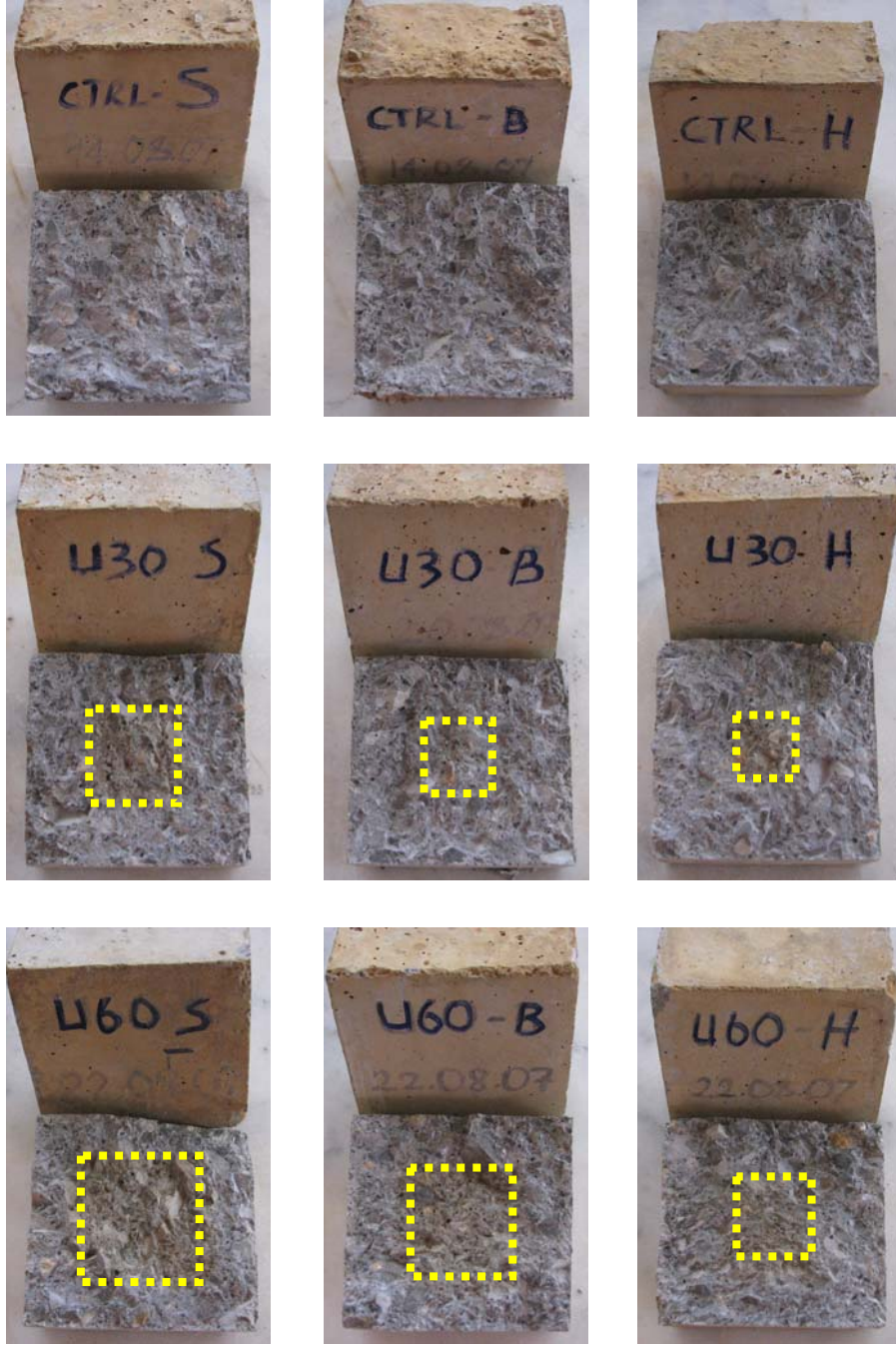
Şekil 9.12 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisinde bekletilen örneklerde 400 çevrim sonra klor penetrasyon derinliği değerleri.

Kısa ve uzun dönemde klor penetrasyon direnci açısından en yüksek performanslı karışım, %60 oranında yüksek fırın cürufu kullanılan ve standart kür uygulanmış örnekler olmaktadır.

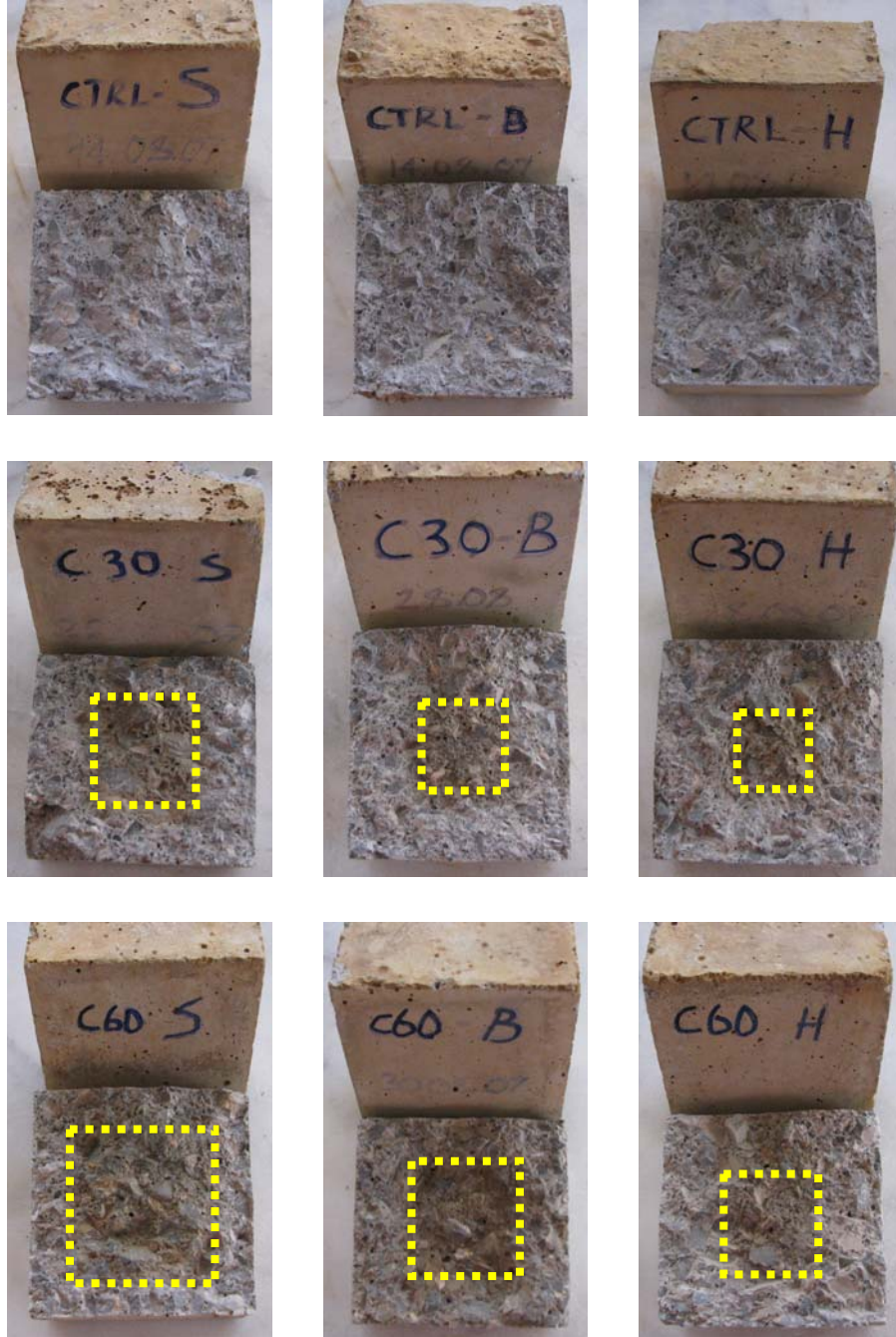
Korozyon ölçümleri için hazırlanmış betonarme örneklerde paspayı tabakası kalınlığı 3 cm'dir. Dolayısıyla gerek 200 gerekse 400 ıslanma-kuruma çevrimi sonrasında birçok karışımında klor iyonları donatıya ulaşabilmiştir. Klor iyonlarının 400 çevrim sonra donatılara ulaşmadığı örnekler, standart ve buhar kürü görmüş %30, 45, 60 oranlarında cüruf içeren karışımlar ile standart kür görmüş %45 ve 60 oranlarında uçucu kül içeren karışımlardan hazırlanmış numunelerdir. Aslında, klor penetrasyonunun bir cephe oluşturmadığı, konsantrasyonda tedrici bir azalma ile betonun çekirdeğine doğru ilerlediği düşünülürse (Şekil 4.11), bu karışımlardaki donatılar da tehdit altındadır.

Aşağıdaki iki şekilde klor iyonlarının penetrasyon derinliğinin tespiti sırasında çekilen fotoğraflara yer verilmiştir. Şekil 9.13'te değişik kür uygulamaları yapılmış kontrol betonları ile uçucu kül içeren betonları bazılarının kesitleri görülmektedir. Şekil 9.14'te ise yüksek fırın cürufu içeren betonların fotoğrafları verilmiştir.

Fotoğraflarda orta bölümdeki kahverengi renk almış (işaretli) bölgeler klor iyonu içermeyen temiz bölgelerdir. Kontrol betonlarında herhangi bir renk değişimi olmadığı, dolayısıyla tüm kesite klor iyonlarının penetre olduğu görülmektedir. Yukarıdaki grafiklerde de sözü edildiği gibi, yüksek mineral katkı oranlarında daha düşük penetrasyon derinlikleri göze çarpmaktadır.



Şekil 9.13 Kontrol betonu ve uçucu küllü betonlarda ıslanma-kuruma etkisinde 400 çevrim sonra klor işleme bölgeleri.



Şekil 9.14 Kontrol betonu ve cüruflu betonlarda ıslanma-kuruma etkisinde 400 çevrim sonra klor işleme bölgeleri.

9.7 Korozyon Ölçümleri

Değişik oranlarda (%0, 15, 30, 45, 60) uçucu kül (U) veya yüksek fırın cürufu (C) içeren betonlar ile hazırlanmış betonarme örneklere standart kür (S) buhar kürü (B) ve havada kür (H) uygulamaları yapılmıştır. Kür dönemlerinin tamamlanmalarının ardından betonarme örnekler üç farklı bekleme koşulunda saklanmıştır. Örneklerin bir bölümü suda saklanmış, bir bölümü havada beklemiş, diğer örnekler ise %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır.

Suda saklanan, havada bekleyen ve ıslanma-kuruma etkisine maruz tüm donatılı örneklerin elektrot potansiyeli değerleri, doygun kalomel elektrot (SCE) ve bir voltmetre kullanılarak çeşitli zamanlarda belirlenmiştir.

Islanma-kuruma etkisine maruz örneklerde ayrıca Gamry marka REF600 model potentiostat kullanılarak çeşitli zamanlarda polarizasyon yöntemi ile korozyon gelişim hızları belirlenmiştir.

9.7.1 Elektrot Potansiyeli Değerleri

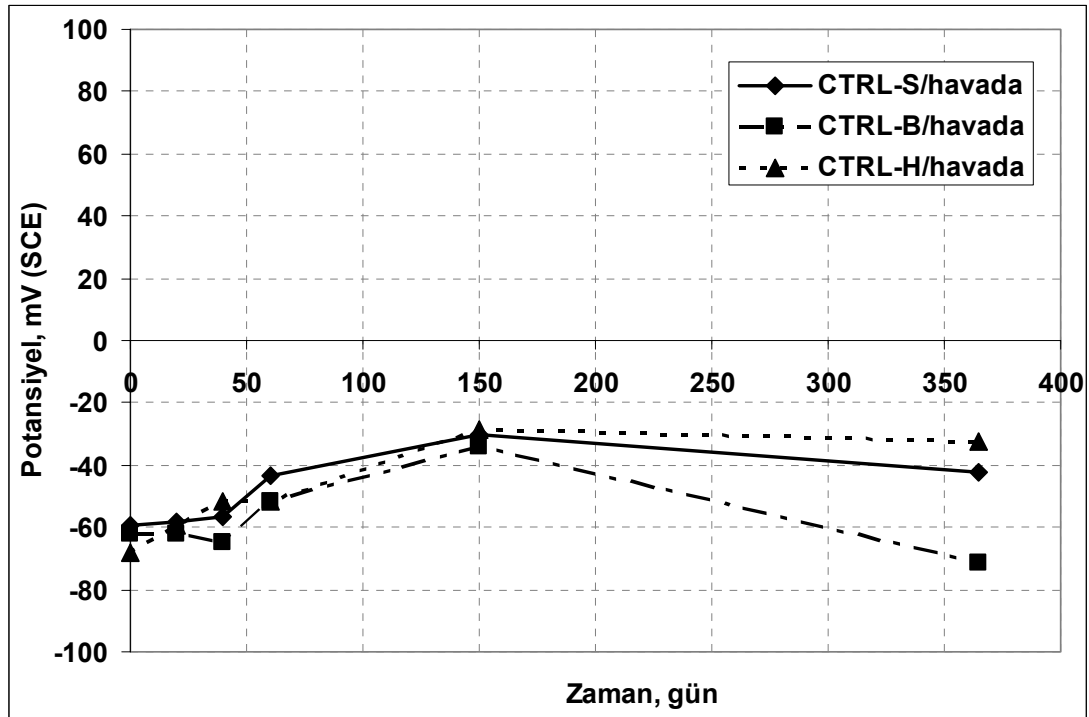
Her üç bekleme koşulundaki tüm örneklerin elektrot potansiyeli değerleri, bir yıl boyunca çeşitli zamanlarda ölçülmüştür.

Hava koşullarında bekletilen betonarme örneklerin elektrot potansiyeli değerleri Tablo 9.6'da verilmiştir. Bu değerler grafiksel olarak seçilen karışımlar (CTRL, U30, U60, C30, C60) için Şekil 9.15-9.19'da verilmiştir.

Tablo 9.6 Havada bekletilen örneklerde elektrot potansiyeli değerleri

Örnek kodu	Elektrot potansiyeli, mV (SCE)					
	0. gün	20. gün	40. gün	60. gün	150. gün	365. gün
CTRL-S	-59,6	-58,0	-56,8	-43,7	-30,0	-42,5
CTRL-B	-62,0	-62,0	-65,0	-51,9	-34,0	-71,5
CTRL-H	-68,0	-59,5	-51,6	-51,6	-28,5	-32,5
U15-S	-60,8	-51,5	-44,0	-42,7	-18,5	-41,0
U15-B	-75,3	-65,5	-57,0	-56,1	-17,5	-60,0
U15-H	-58,1	-58,5	-57,6	-66,0	-35,0	-36,0
U30-S	-58,4	-51,0	-46,8	-37,9	-17,5	-31,0
U30-B	-65,0	-63,0	-60,2	-51,6	-24,5	-52,5
U30-H	-69,9	-67,5	-65,0	-52,0	-25,0	-54,0
U45-S	-69,4	-59,5	-49,0	-36,4	-32,0	-23,0
U45-B	-65,0	-66,0	-66,9	-49,3	-44,5	-46,0
U45-H	-60,6	-61,5	-64,1	-46,9	-36,0	-45,0
U60-S	-73,1	-64,5	-61,1	-48,2	-30,5	-2,5
U60-B	-57,7	-54,5	-53,4	-49,2	-29,0	-27,0
U60-H	-56,8	-60,0	-64,2	-72,6	-50,0	-71,0
C15-S	-71,3	-67,5	-61,2	-46,9	-40,0	-47,0
C15-B	-70,7	-69,0	-67,3	-49,8	-44,0	-55,5
C15-H	-70,5	-71,0	-71,3	-55,4	-35,5	-42,5
C30-S	-66,4	-55,5	-46,6	-39,5	-30,5	-39,0
C30-B	-62,2	-57,5	-52,4	-33,9	-33,0	-54,0
C30-H	-71,7	-69,5	-68,1	-61,3	-47,0	-53,5
C45-S	-70,0	-60,5	-49,6	-29,3	-13,0	-17,5
C45-B	-51,3	-46,5	-40,7	-28,7	-26,0	-35,5
C45-H	-57,4	-57,0	-56,9	-48,9	-38,5	-40,0
C60-S	-73,4	-58,0	-44,6	-23,3	-12,0	-12,5
C60-B	-46,7	-35,5	-28,3	-24,0	-12,9	-23,5
C60-H	-55,8	-54,6	-53,6	-46,5	-42,2	-75,5

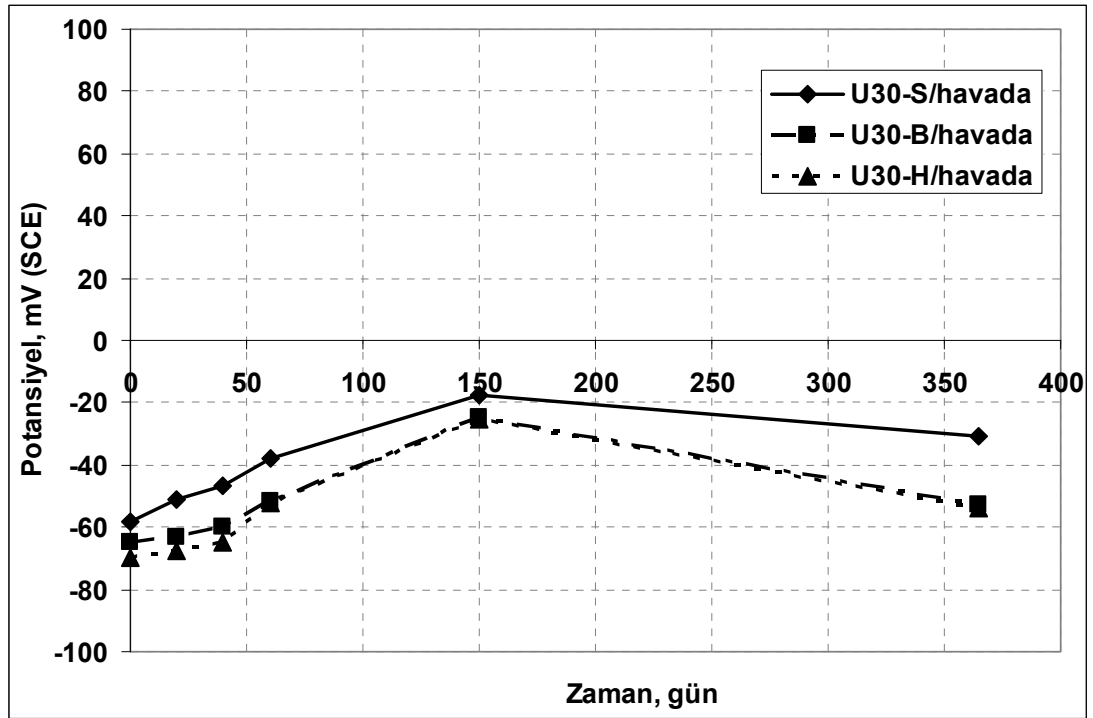
Tablo 9.6'daki değerlere bakıldığında donatıların havada bekleme durumunda elektrot potansiyeli değerlerinin -2,5 ile -75,5 mV arasında değerler aldığı görülmektedir. Bu değerler, ASTM C876'ya göre %90'dan daha büyük olasılıkla korozyon gelişimi olmadığını ifade etmektedir. Zaten havada bekleme koşulunun korozif olmadığı bilindiğinden elde edilen değer aralığı mantıklıdır.



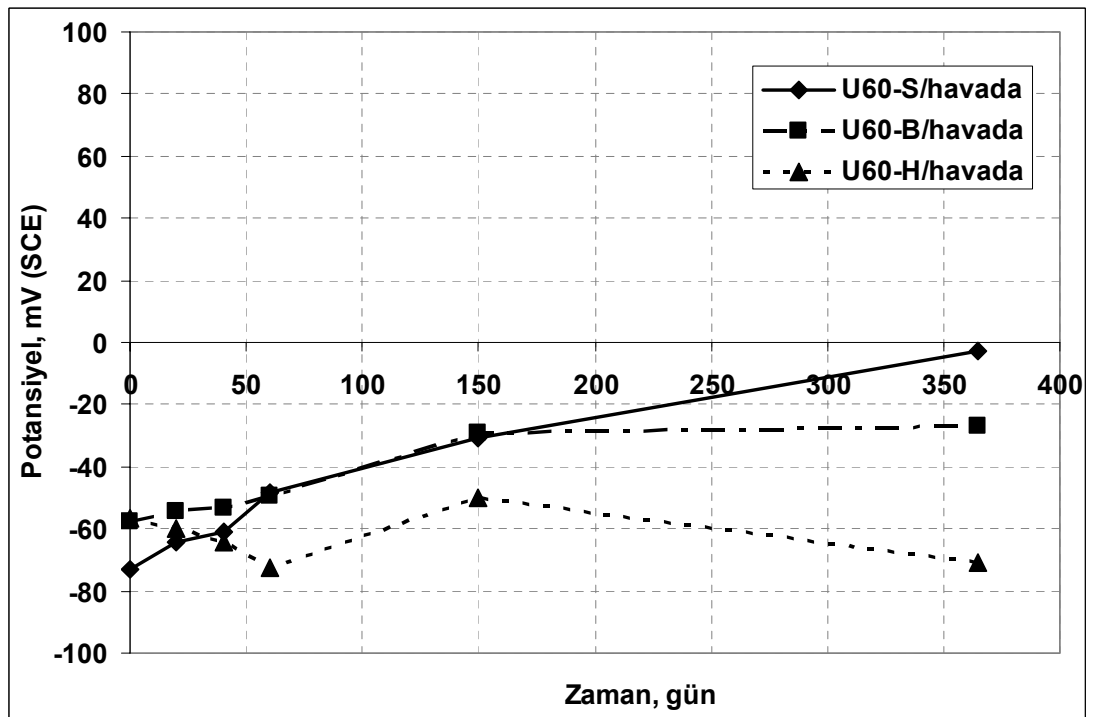
Şekil 9.15 Havada bekletilen kontrol karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.

Öte yandan, havada bekleme koşulunda etkili mekanizma karbonatlaşma olayıdır. Ancak, ölçüm yapılan bir yıl süresince karbonatlaşmanın henüz bir risk oluşturmadığı bu ölçümlerden elde edilen bir sonuçtur.

Elektrot potansiyeli değerlerinin zaman içerisinde gelişimine bakıldığında, belirli negatif değerlerden daha pozitif değerlere doğru bir eğilim göze çarpmaktadır. Bu eğilim donatıların zaman içerisinde pasifleştiğinin ve daha kararlı bir hale geldiğinin bir göstergesidir.

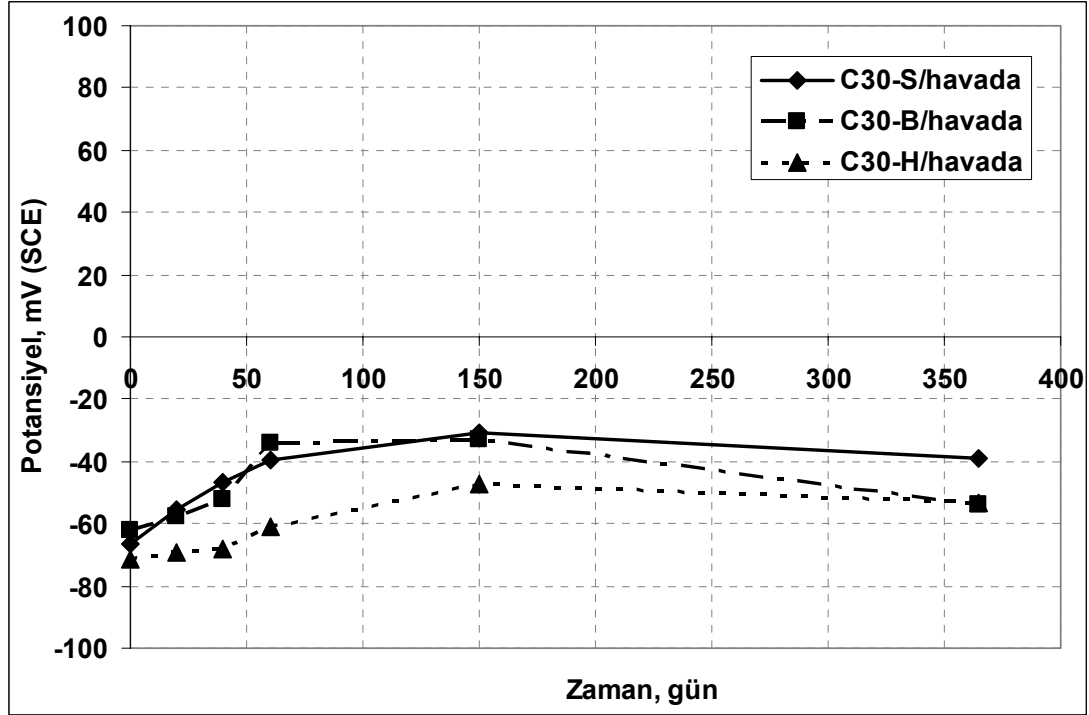


Şekil 9.16 Havada bekletilen U30 karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.



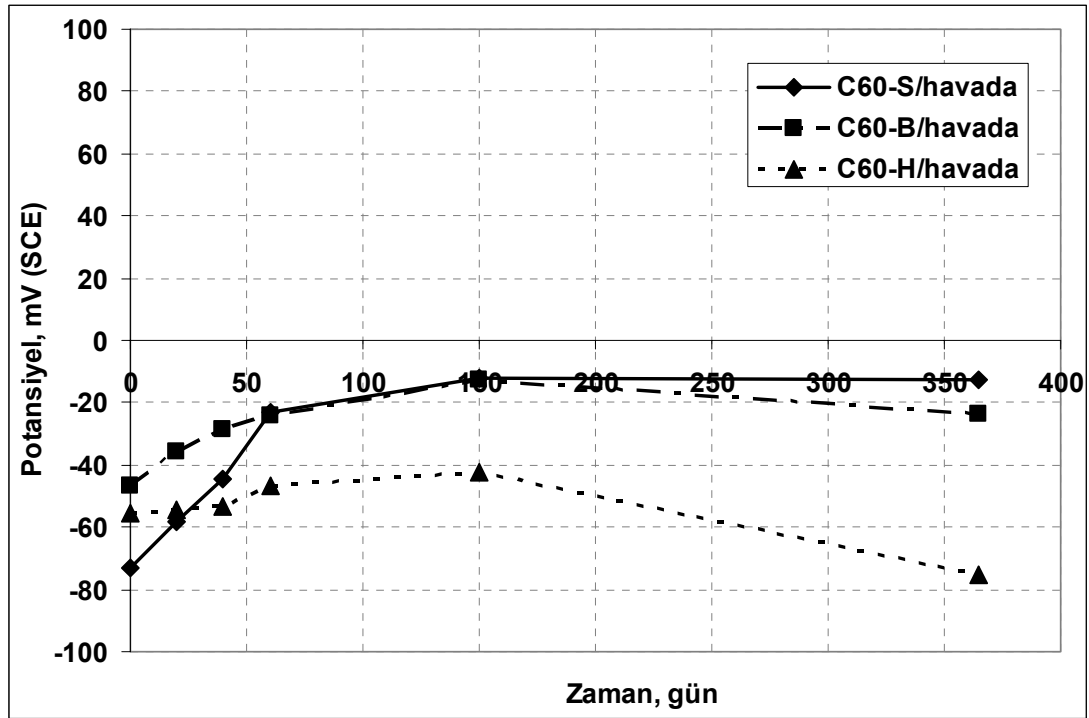
Şekil 9.17 Havada bekletilen U60 karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.

Benzer eğilimler yüksek fırın cürufu içeren karışımlar (Şekil 9.18-9.19) için de geçerlidir. Bu örneklerde de zamanla daha kararlı bir duruma geçiş söz konusudur.



Şekil 9.18 Havada bekletilen C30 karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.

C60-H kodlu örneklerden, bir diğer deyişle, karışımında bağlayıcı madde olarak çimento yerine, ağırlıkça %60 oranında yüksek fırın cürufu ikame edilen ve herhangi bir kür uygulaması yapılmamış örneklerden elde edilen elektrot potansiyeli değerlerinin, belirli bir zamandan sonra negatif yönde bir artış sergilediği Şekil 9.19'dan görülebilir. Bu durum, değerler henüz pasif bölgede olmasına rağmen, bir miktar belirsiz bölgeye doğru eğilim anlamına gelmektedir. Karbonatlaşma ölçümlerinden elde edilen verilere göre, en fazla karbonatlaşma derinliği gösteren örnekler, sözü edilen C60-H kodlu örneklerdir. Benzer davranış yine yüksek karbonatlaşma derinliği gösteren %60 oranında uçucu kül kullanılan havada kür edilmiş örnekler için de geçerlidir. Dolayısıyla, yüksek dereceden karbonatlaşma gösteren bu örneklerin davranışı, elektrot potansiyeli değerlerine de yansımaktadır.



Şekil 9.19 Havada bekletilen C60 karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.

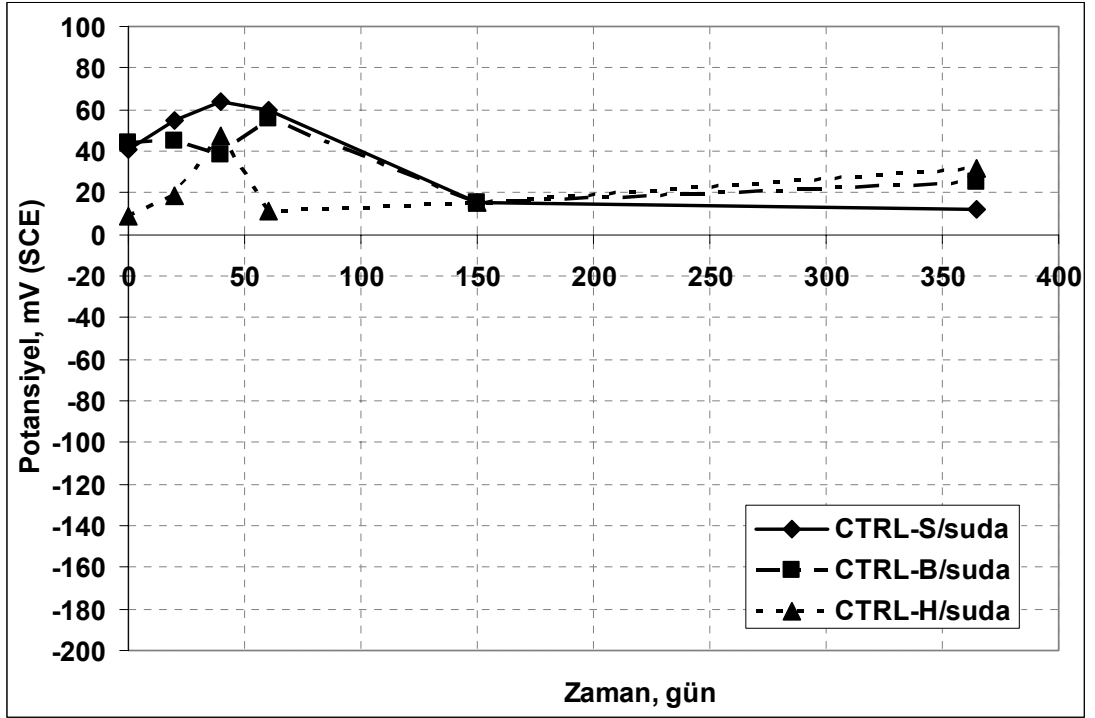
Kür yöntemi açısından kıyaslandığında, herhangi bir kür uygulaması yapılmayan örneklerde daha düşük potansiyel değerleri ölçülmüştür. Özellikle yüksek mineral katkı oranlarına çıkıldığında farklar artmaktadır. Bu bulgu, karbonatlaşma derinliği ölçümleri ile uyumludur. Karbonatlaşma olayının uzun zaman süreçlerinde kürsüz betonarme elemanlarda korozyon riski oluşturacağı göz ardı edilmemelidir.

Kirece doymuş su ortamında saklanan betonarme örneklerin elektrot potansiyeli değerleri Tablo 9.7’de verilmiştir. Seçilen karışımlar (CTRL, U30, U60, C30, C60) için bu değerler grafiksel olarak Şekil 9.20-9.24’de verilmiştir.

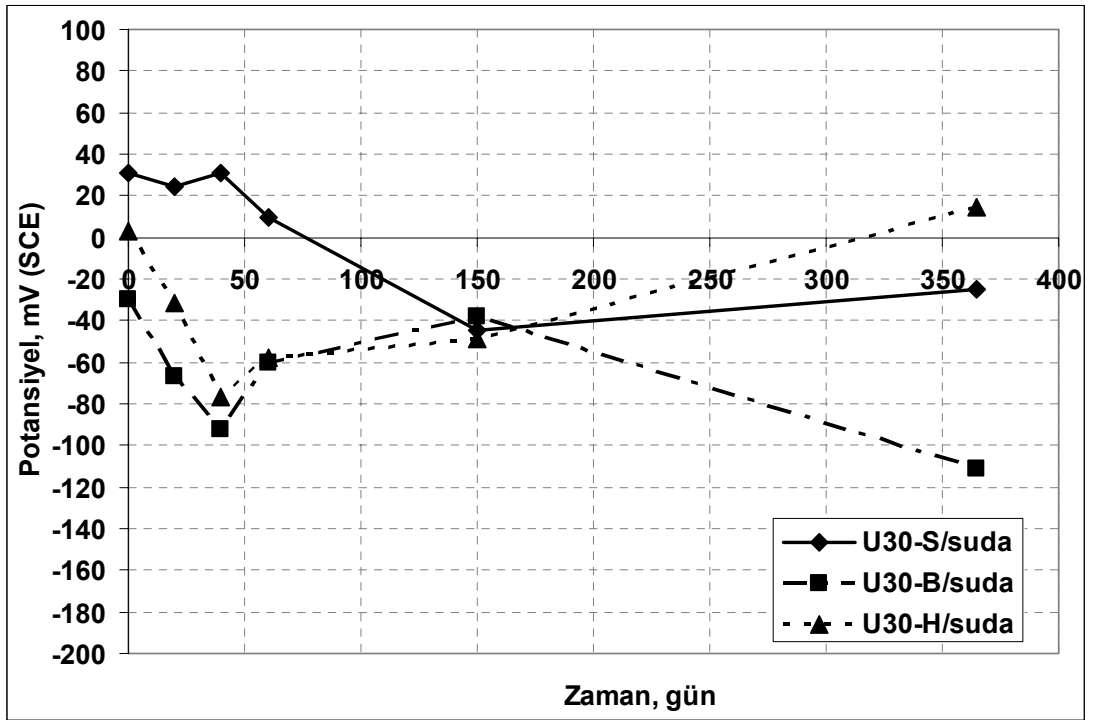
Suda bekletilen örneklerin 70 ile -257 mV arasında elektrot potansiyeli değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Örneklerin büyük bir kısmının -120 mV ve daha pozitif değerler göstererek pasif bölgede kaldığı görülmektedir. Bazı örneklerdeki (U15-B ve C30-B gibi) ise -120 ile -270 mV arasında değerler, ASTM C876’ya göre belirsiz bölge sınıfına düşmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise, suda bekleme koşulundaki örneklerde de aktif korozyon gelişimi söz konusu değildir.

Tablo 9.7 Suda saklanan örneklerde elektrot potansiyeli değerleri

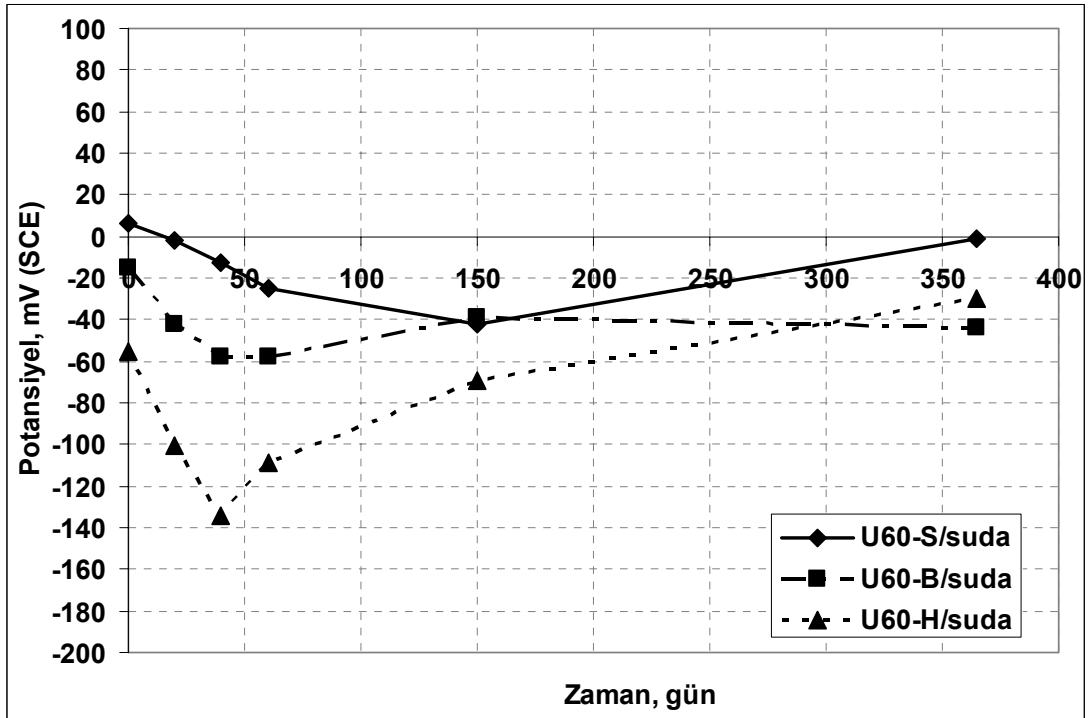
Örnek kodu	Elektrot potansiyeli, mV (SCE)					
	0. gün	20. gün	40. gün	60. gün	150. gün	365. gün
CTRL-S	41,1	54,5	63,6	59,7	15,5	11,7
CTRL-B	44,0	45,0	38,6	55,4	15,0	25,4
CTRL-H	8,6	18,5	47,6	11,2	15,5	31,8
U15-S	56,3	62,5	70,9	52,2	-27,5	-2,1
U15-B	-175,4	-202,5	-243,0	-257,0	-124,5	-57,3
U15-H	-2,6	-41,5	-88,6	-67,0	-72,0	31,3
U30-S	30,7	24,0	30,7	9,4	-45,0	-25,0
U30-B	-29,6	-67,0	-92,5	-60,5	-38,0	-111,4
U30-H	3,4	-31,5	-77,1	-57,5	-48,5	14,8
U45-S	16,5	12,0	10,6	-14,1	-47,0	-107,6
U45-B	-39,2	-47,5	-82,3	-48,9	-36,5	-0,5
U45-H	-12,2	-51,5	-111,6	-73,3	-67,5	4,7
U60-S	6,2	-2,0	-12,6	-25,2	-42,3	-1,1
U60-B	-14,9	-42,0	-57,6	-58,0	-39,0	-43,8
U60-H	-55,1	-100,5	-134,1	-109,0	-69,0	-29,7
C15-S	36,7	-11,5	-49,8	-39,7	-39,3	3,9
C15-B	-14,1	-57,0	-102,8	-73,6	-48,5	-51,0
C15-H	-44,5	-91,0	-129,5	-88,3	-65,5	1,2
C30-S	29,5	-7,5	-50,3	-37,9	-43,6	-61,0
C30-B	-113,4	-115,0	-152,9	-79,4	-40,6	-142,0
C30-H	-45,0	-103,5	-171,5	-124,5	-89,0	5,6
C45-S	3,5	-42,5	-60,2	-47,1	-46,1	-34,0
C45-B	-112,5	-116,5	-168,0	-115,5	-88,0	-19,3
C45-H	-69,1	-83,5	-95,5	-61,6	-75,5	-86,8
C60-S	-47,0	-62,0	-78,8	-61,8	-50,0	-82,8
C60-B	-38,9	-58,5	-81,4	-62,0	-43,5	-1,1
C60-H	-125,2	-125,5	-128,8	-80,2	-83,0	-31,7



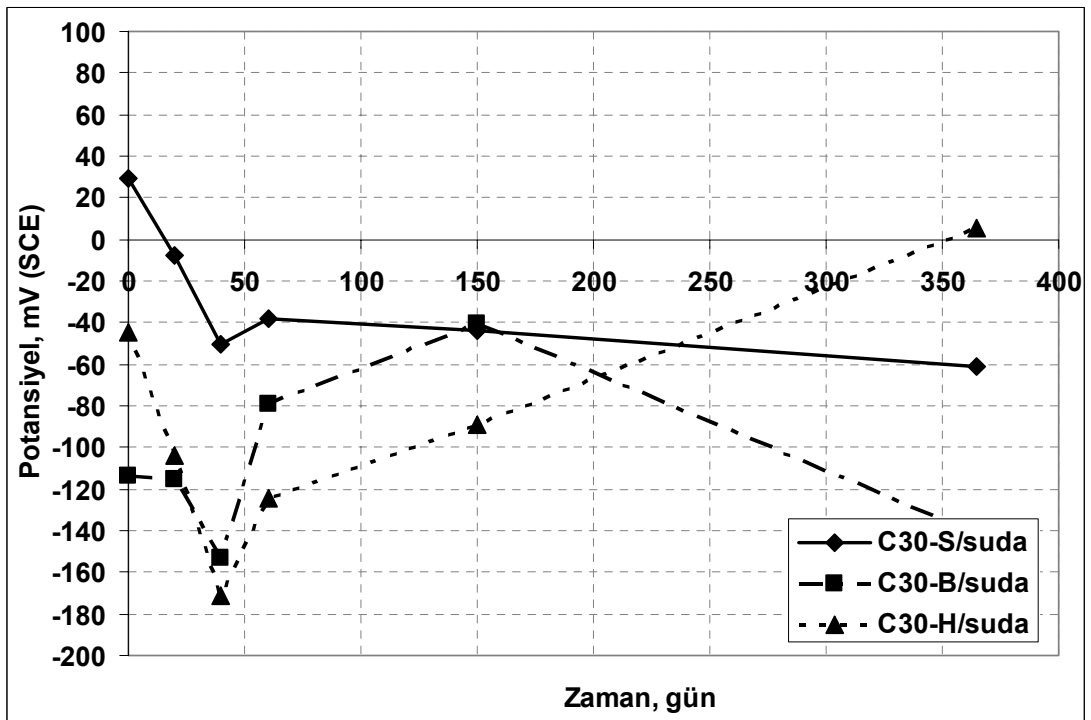
Şekil 9.20 Suda saklanan kontrol karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.



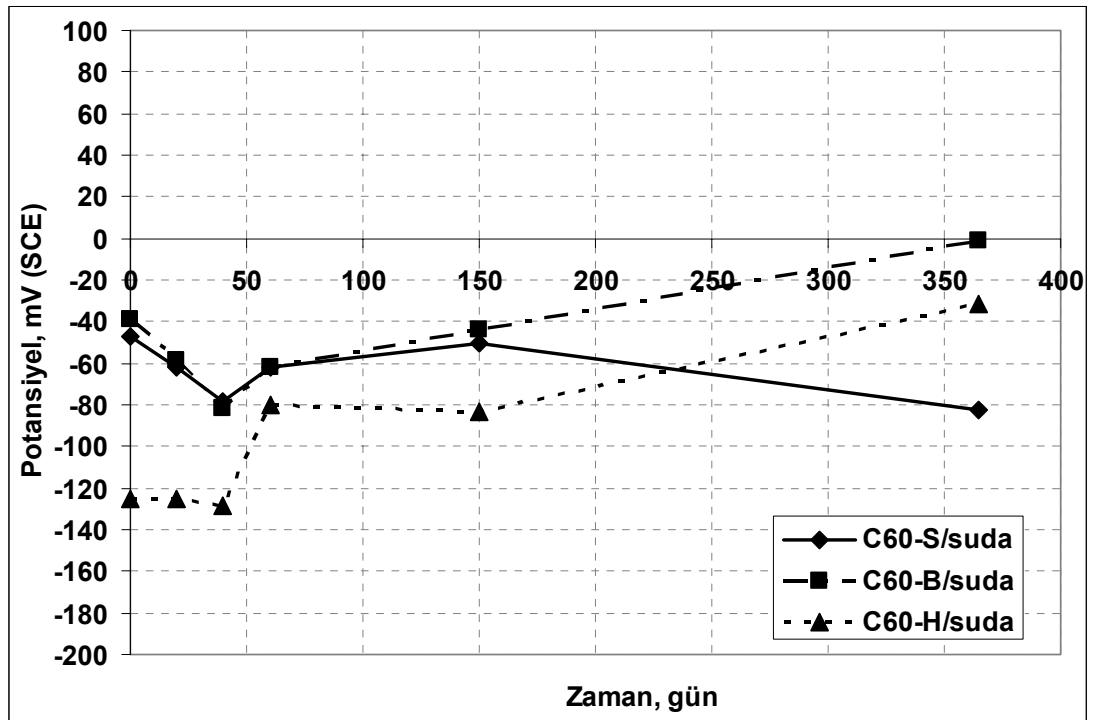
Şekil 9.21 Suda saklanan U30 karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.



Şekil 9.22 Suda saklanan U60 karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.



Şekil 9.23 Suda saklanan C30 karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.



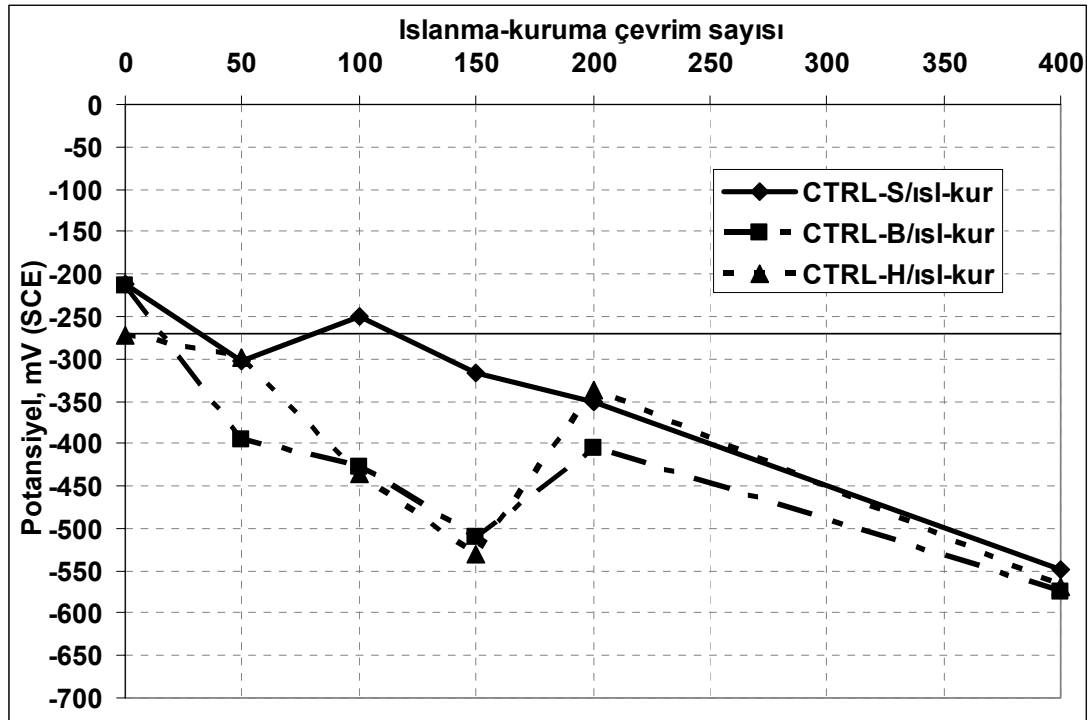
Şekil 9.24 Suda saklanan C60 karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.

NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma ortamında saklanan betonarme örneklerin elektrot potansiyeli değerleri Tablo 9.8’de verilmiştir. Bu örnekler için grafikler, zamana göre değil, ıslanma kuruma sayısı baz alınarak çizilmiştir. Seçilen karışımlar (CTRL, U30, U60, C30, C60) için potansiyel değerlerinin değişimi Şekil 9.25-9.29’da verilmiştir.

Tablo 9.8 incelendiğinde, bu bekleme şartlarında saklanan örneklerin elektrot potansiyellerinin -182 ile -612 mV arasında değerler aldığı görülmektedir. Başlangıçta nispeten daha düşük ölçülen potansiyel değerleri, çevrim sayısı arttıkça, ASTM C876’da verilen aktif korozyon gelişimi sınırı olan -270 mV değerini aşarak negatif yönde artış göstermiştir. Bu artış, ıslanma-kuruma tekrar sayısı arttıkça korozyon aktivitesinin de geliştiğini göstermektedir.

Tablo 9.8 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz örneklerde elektrot potansiyeli değerleri

Örnek kodu	Elektrot potansiyeli, mV (SCE)					
	0. çevrim	50. çevrim	100. çevrim	150. çevrim	200. çevrim	400. çevrim
CTRL-S	-212,6	-302,3	-250,1	-317,5	-351,9	-549,3
CTRL-B	-214,3	-395,3	-427,7	-510,5	-405,4	-574,2
CTRL-H	-271,9	-298,3	-436,4	-530,3	-336,7	-568,1
U15-S	-269,2	-317,0	-520,7	-509,5	-556,1	-573,2
U15-B	-362,2	-471,0	-568,9	-544,8	-570,3	-556,1
U15-H	-368,2	-480,0	-487,7	-444,0	-553,2	-445,8
U30-S	-233,9	-342,8	-340,9	-382,8	-371,4	-419,9
U30-B	-292,2	-278,5	-334,2	-387,0	-520,0	-562,2
U30-H	-581,8	-473,5	-574,0	-485,3	-501,7	-486,7
U45-S	-213,0	-357,3	-409,4	-369,8	-456,6	-421,7
U45-B	-258,3	-246,8	-389,4	-521,5	-498,0	-327,3
U45-H	-400,4	-519,7	-507,8	-518,0	-589,2	-405,3
U60-S	-182,4	-278,3	-520,2	-563,7	-596,2	-504,1
U60-B	-477,7	-470,5	-588,5	-510,3	-555,4	-577,2
U60-H	-562,4	-380,3	-419,5	-401,0	-550,6	-385,8
C15-S	-244,4	-318,3	-347,6	-268,5	-532,0	-513,0
C15-B	-394,1	-387,0	-491,3	-327,0	-554,4	-510,9
C15-H	-342,7	-239,8	-516,5	-366,5	-393,6	-480,4
C30-S	-220,2	-316,8	-512,9	-404,8	-569,6	-414,6
C30-B	-332,5	-551,3	-569,7	-557,8	-600,5	-456,6
C30-H	-254,3	-369,8	-520,5	-455,3	-532,8	-387,9
C45-S	-259,0	-431,3	-503,9	-488,8	-592,4	-379,8
C45-B	-326,1	-517,3	-593,9	-527,3	-594,4	-344,1
C45-H	-382,3	-466,5	-563,2	-512,5	-612,7	-407,7
C60-S	-229,8	-308,5	-523,8	-412,5	-597,8	-513,7
C60-B	-350,8	-343,0	-562,4	-380,0	-585,2	-410,2
C60-H	-583,9	-433,5	-590,9	-463,5	-608,3	-527,1

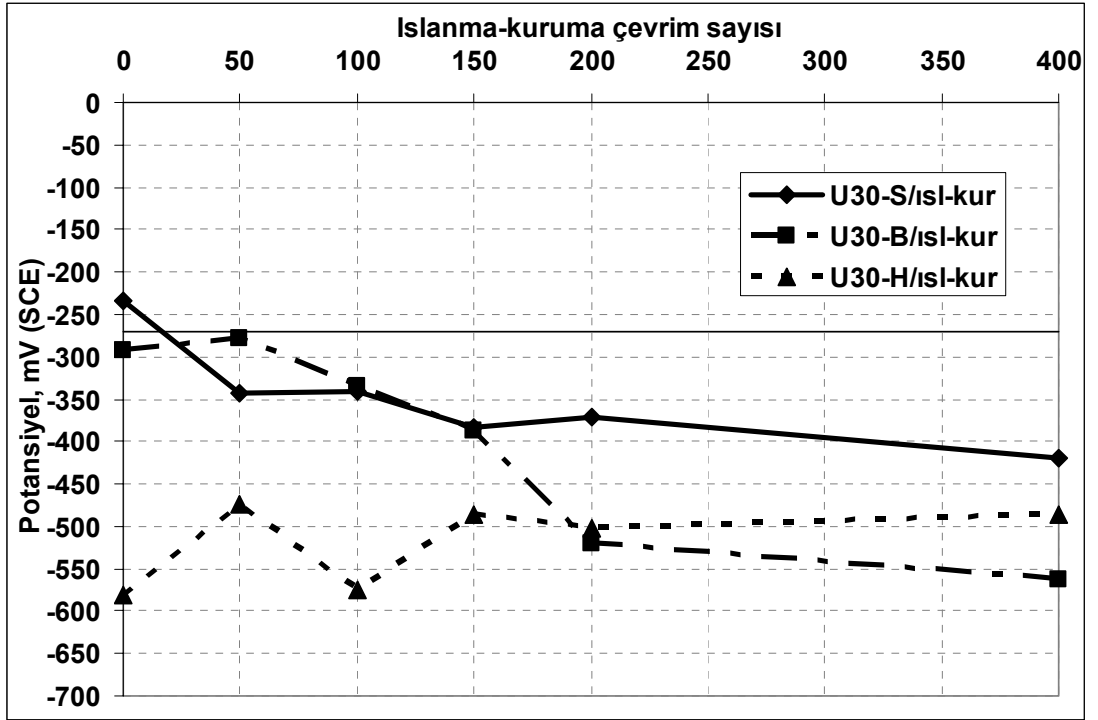


Şekil 9.25 Sodyum klorürde ıslanma-kuruma ortamında saklanan kontrol karışımlarının çevrim sayısına göre elektrot potansiyeli değerleri.

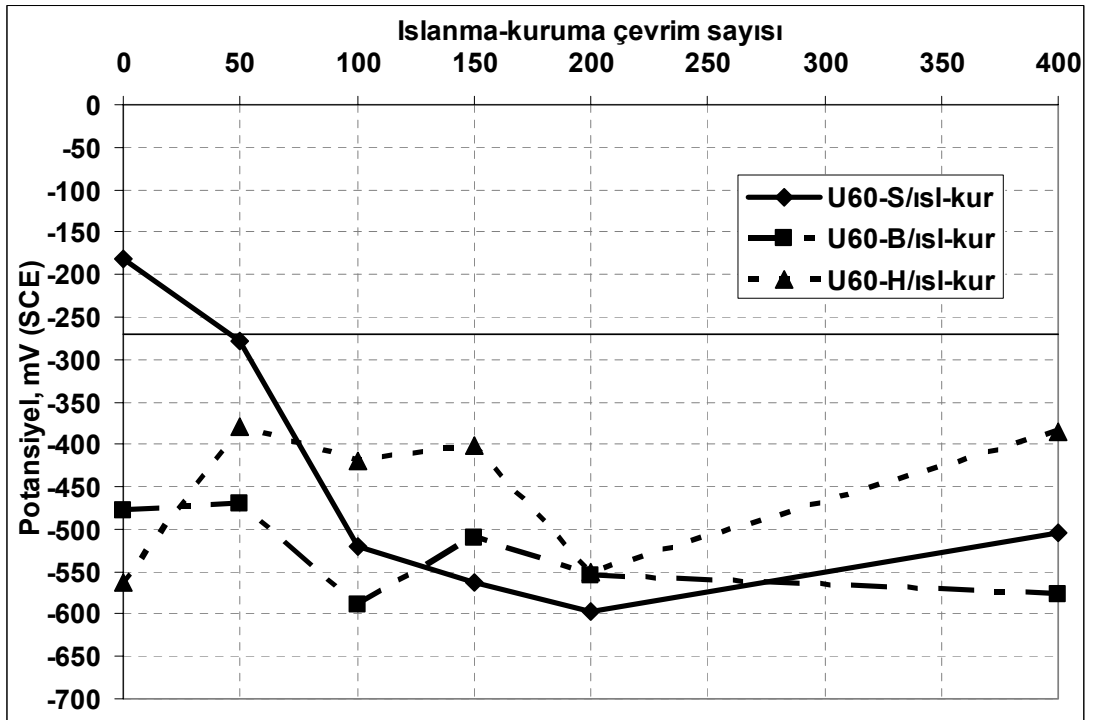
Kontrol betonları ile hazırlanmış örnekler %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakıldığında, başlangıçta -200 ile -300 mV arasında potansiyel değerleri göstermiştir. Standart kürlü örnekler 150 çevrimden sonra, kür yapılmamış ve buhar kürlü örnekler ise, 50 çevrimden sonra -270 mV değerini aşmış ve ASTM C 876'daki aktif korozyon gelişimi bölgesine girmiştir.

Herhangi bir kür işlemi yapılmayan örnekler ile buhar kürü uygulanmış örnekler, standart kür görmüş örneklerle kıyasla daha boşluklu olduklarından klorür etkisine daha çabuk maruz kalmışlardır. Bu etki mineral katkı betonlar ile hazırlanmış örnekler için de geçerlidir. Hatta yüksek mineral katkı oranlarında yetersiz kür durumunda ilk çevrimde bile donatılar aktif korozyon bölgesinde bulunmaktadır.

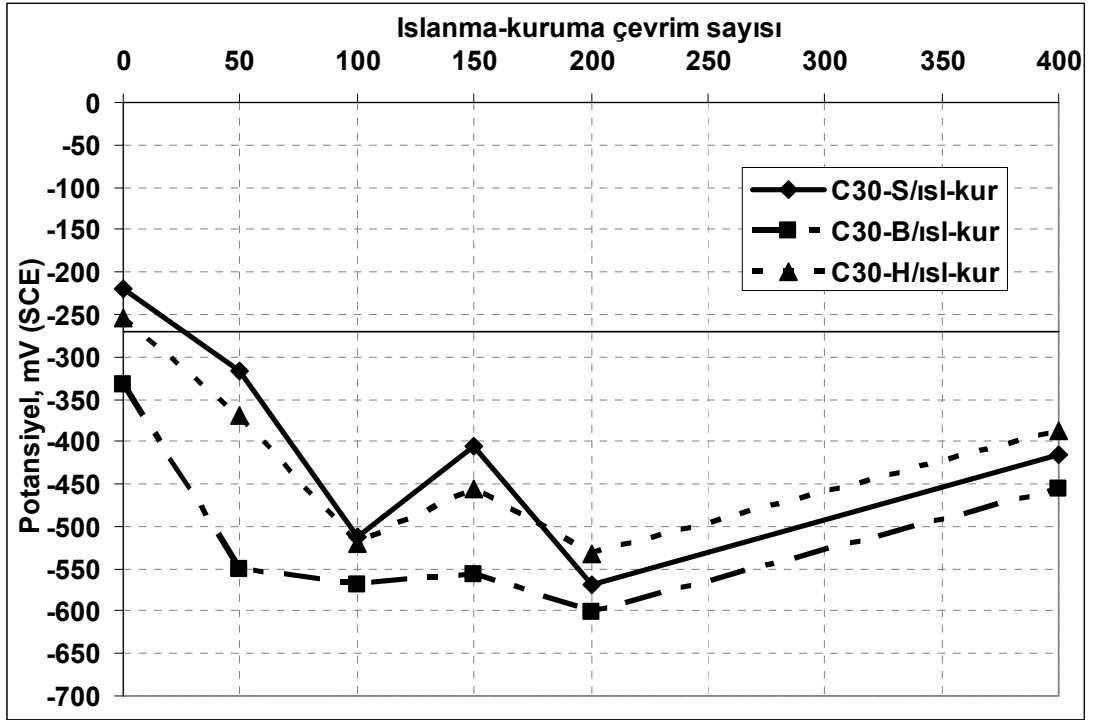
Bu noktada tekrar belirtmek gerekir ki, ASTM C876'ya göre donatıların elektrot potansiyeli değerleri yalnızca korozyon gelişiminin olup olmadığı hakkında fikir verebilmektedir. Korozyonun gelişim hızı ve yoğunluğu konusunda bilgi sağlayamamaktadır.



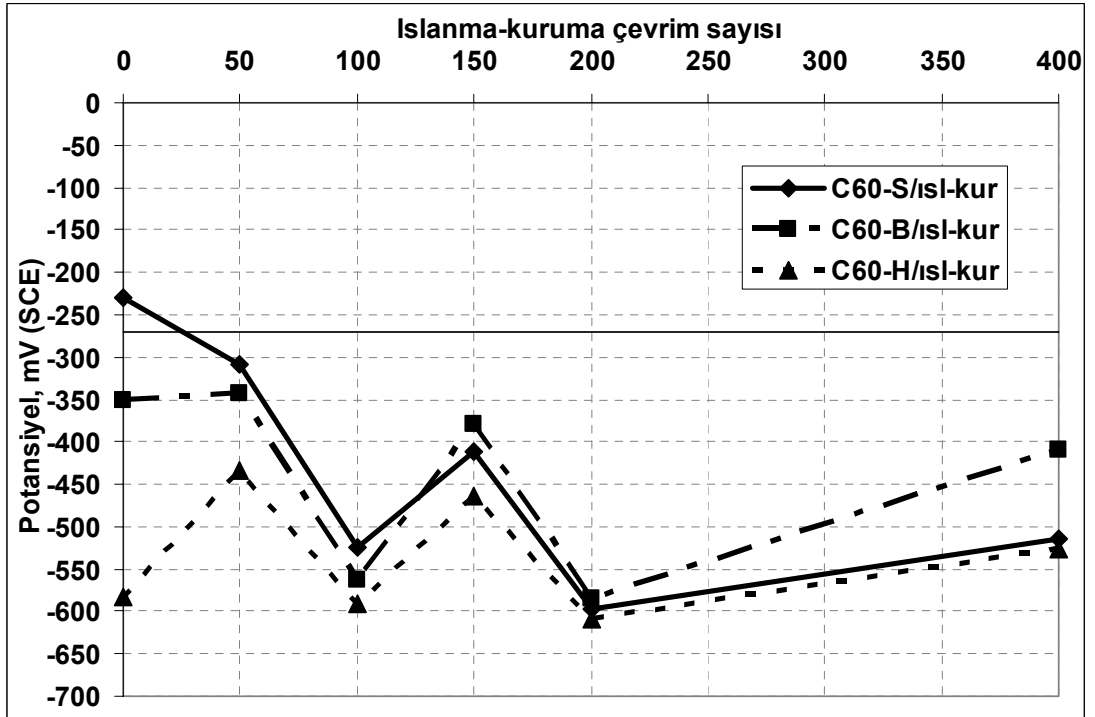
Şekil 9.26 Sodyum klorürde ıslanma-kuruma ortamında saklanan U30 karışımlarının çevrim sayısına göre elektrot potansiyeli değerleri.



Şekil 9.27 Sodyum klorürde ıslanma-kuruma ortamında saklanan U60 karışımlarının çevrim sayısına göre elektrot potansiyeli değerleri.

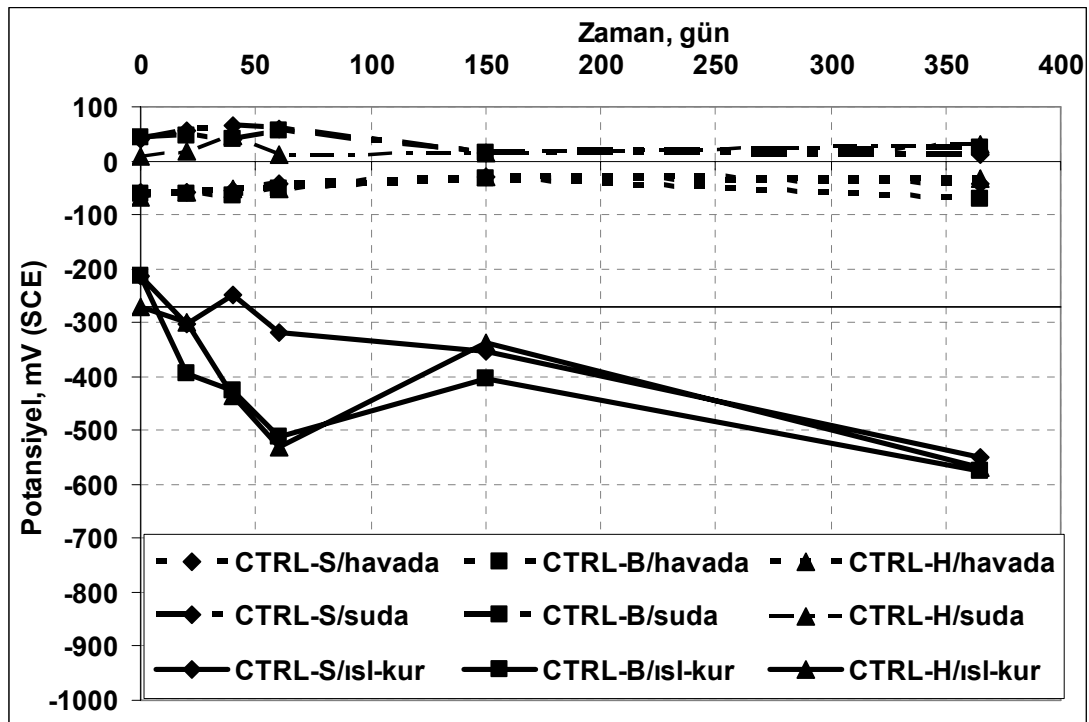


Şekil 9.28 Sodyum klorürde ıslanma-kuruma ortamında saklanan C30 karışımlarının çevrim sayısına göre elektrot potansiyeli değerleri.



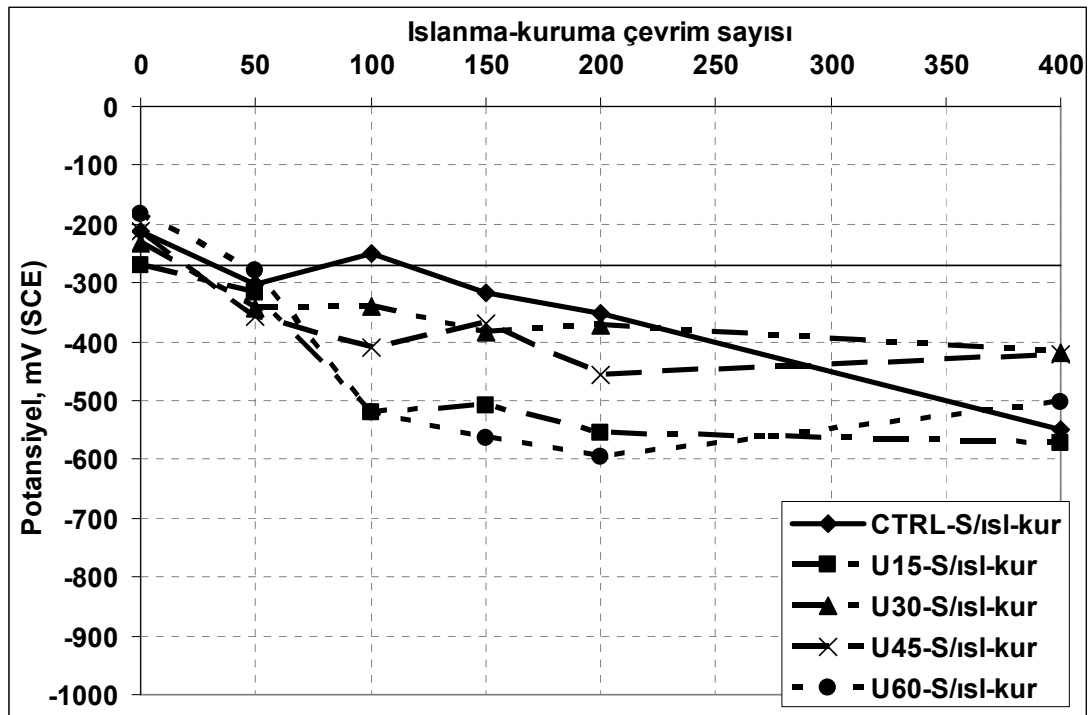
Şekil 9.29 Sodyum klorürde ıslanma-kuruma ortamında saklanan C60 karışımlarının çevrim sayısına göre elektrot potansiyeli değerleri.

Kontrol betonları ile hazırlanmış donatılı örneklerin değişik bekleme koşullarında zamana göre elektrot potansiyeli değişimleri grafiksel olarak Şekil 9.30'da verilmiştir. Havada ve suda bekletilen örneklerde herhangi bir aktivitenin olmadığı, değerlerin pasif bölgede kaldığı görülmektedir. NaCl etkisinde ıslanma-kurumaya maruz örneklerin ise, zamanla potansiyel değerlerinin daha negatif değerler aldığı ve korozyon olayının geliştiği söylenebilir.

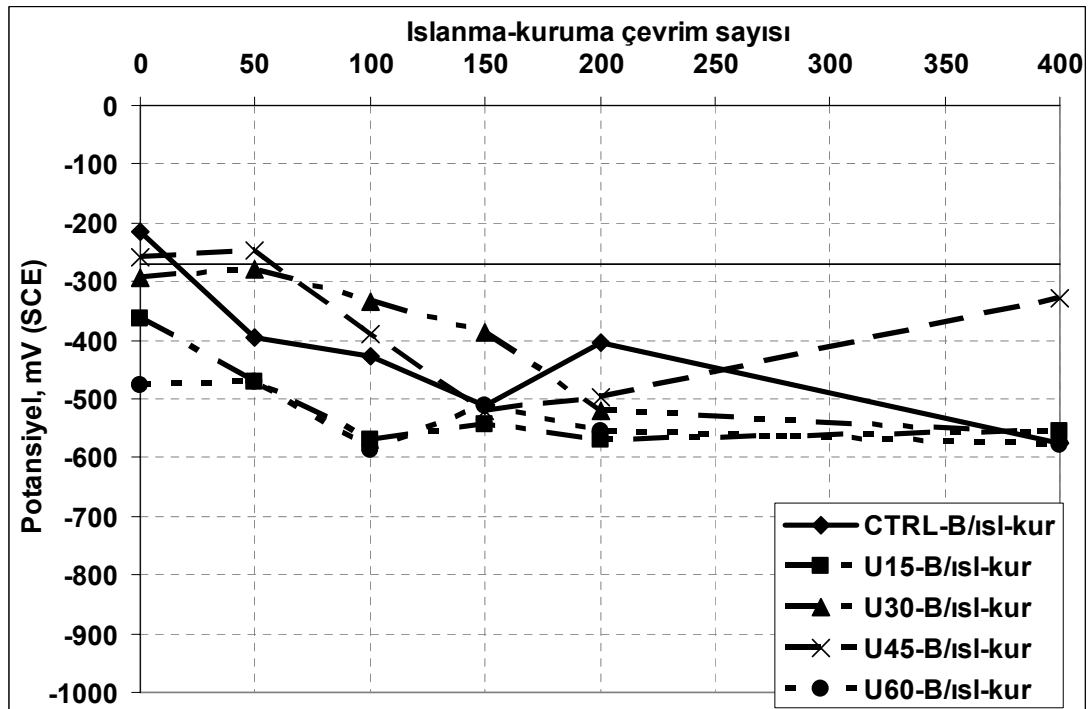


Şekil 9.30 Değişik bekleme koşullarında saklanan kontrol karışımlarının zamana göre elektrot potansiyeli değerleri.

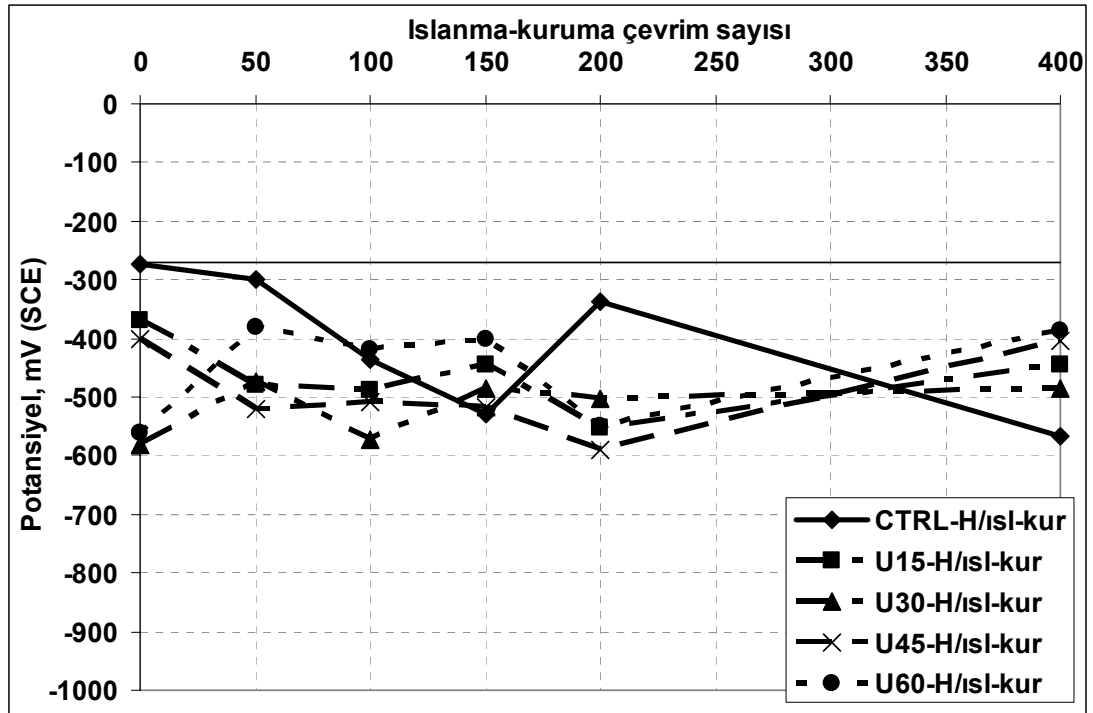
Uçucu kül içeren karışımlarda kullanım oranına göre, elektrot potansiyeli değerlerinin karşılaştırılması değişik kür yöntemleri için Şekil 9.31-9.33'te, yüksek fırın cürufu için söz konusu grafikler Şekil 9.34-9.36'da sunulmuştur. Bu grafiklerde genel eğilim, zamanla potansiyel değerlerinin negatif yönde artması ve korozyon aktivitesinin gelişmesi şeklindedir. Standart kürlü örneklerde (Şekil 9.31 ve Şekil 9.34) belirli bir zamandan sonra aktivite bölgesine geçiş söz konusu iken, buhar kürü uygulanmış (Şekil 9.32 ve Şekil 9.35) ve kürsüz örnekler (Şekil 9.33 ve Şekil 9.36) ilk çevrimden itibaren korozyon riskinin olduğu bölgede bulunmaktadır.



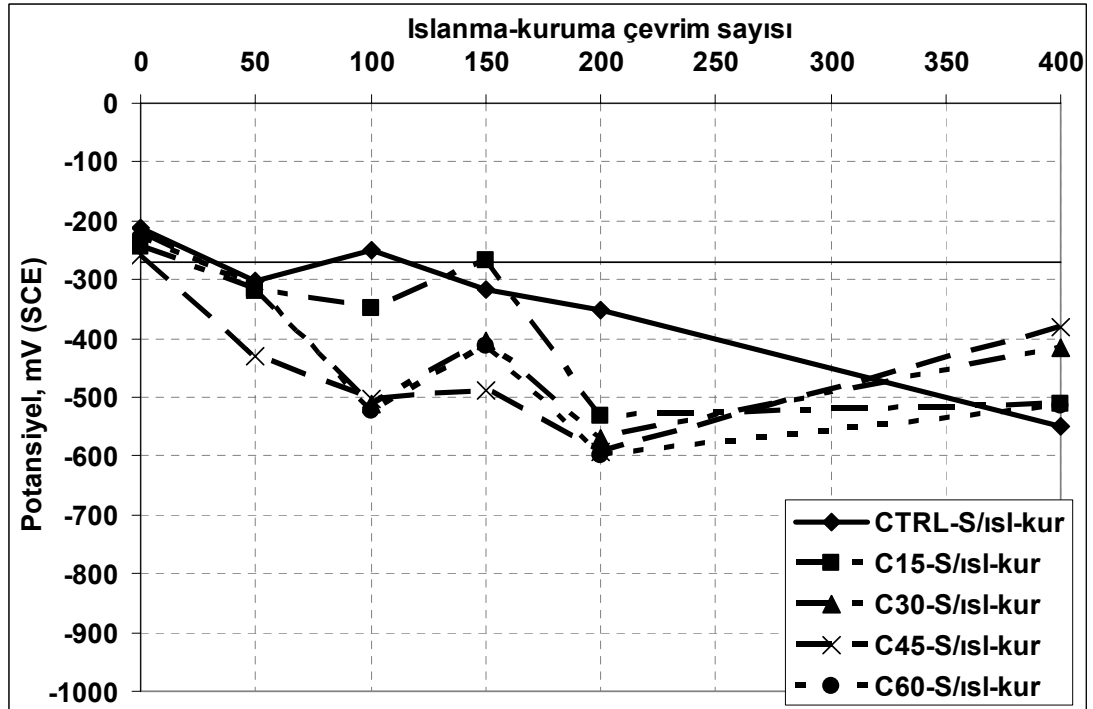
Şekil 9.31 Standart kür uygulanmış ve korozif ortamda bekleyen çeşitli dozajlarda uçucu kül içeren karışımlarla hazırlanmış örneklerin zamana göre elektrot potansiyeli değerlerinin karşılaştırılması.



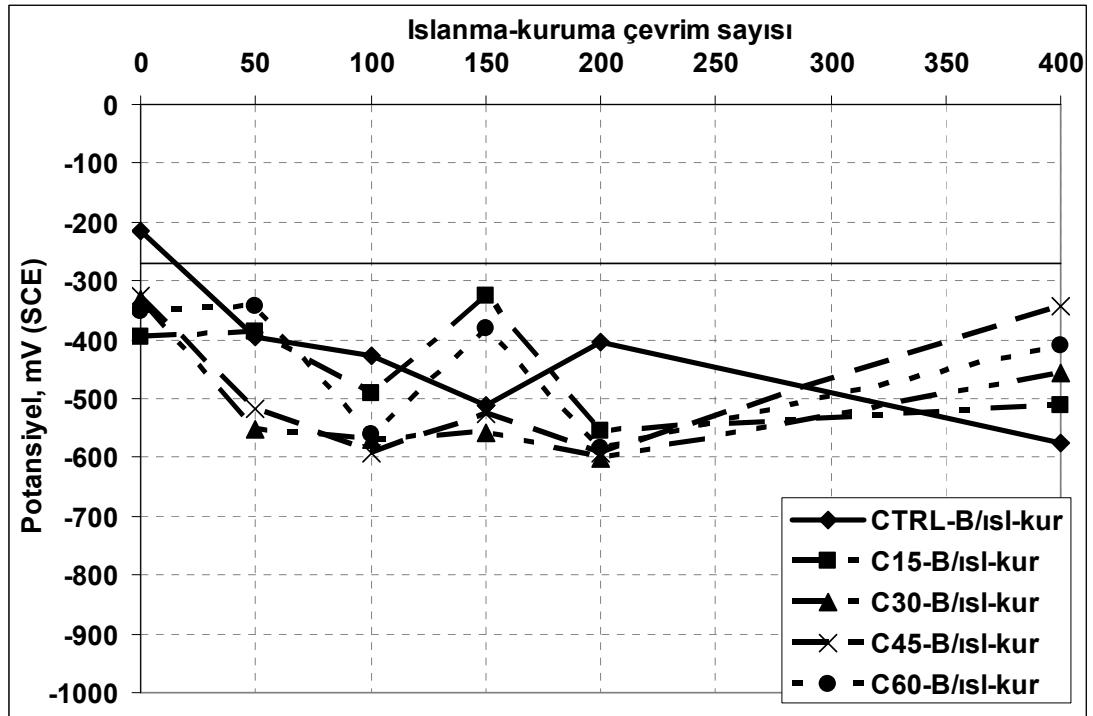
Şekil 9.32 Buhar kürü uygulanmış ve korozif ortamda bekleyen çeşitli dozajlarda uçucu kül içeren karışımlarla hazırlanmış örneklerin zamana göre elektrot potansiyeli değerlerinin karşılaştırılması.



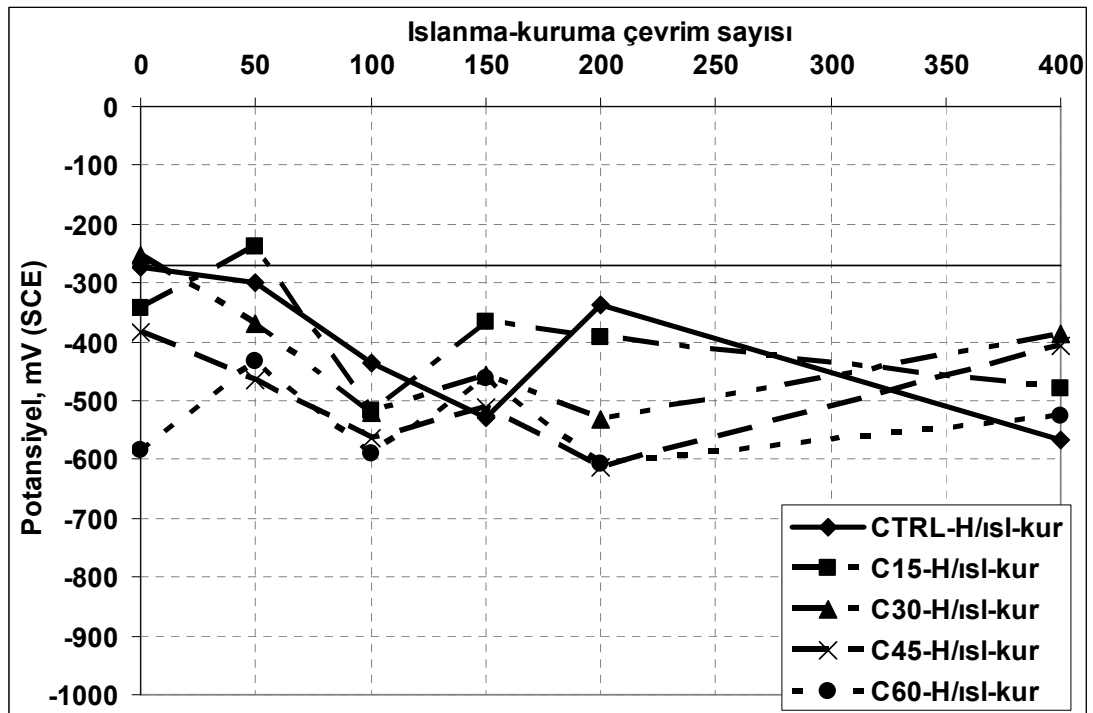
Şekil 9.33 Havada kür edilmiş ve korozif ortamda bekleyen çeşitli dozajlarda uçucu kül içeren karışımlarla hazırlanmış örneklerin zamana göre elektrot potansiyeli değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 9.34 Standart kür uygulanmış ve korozif ortamda bekleyen çeşitli dozajlarda yüksek fırın cürufu içeren karışımlarla hazırlanmış örneklerin zamana göre elektrot potansiyeli değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 9.35 Buhar kürü uygulanmış ve korozif ortamda bekleyen çeşitli dozajlarda yüksek fırın cürufu içeren karışımlarla hazırlanmış örneklerin zamana göre elektrot potansiyeli değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 9.36 Havada kür edilmiş ve korozif ortamda bekleyen çeşitli dozajlarda yüksek fırın cürufu içeren karışımlarla hazırlanmış örneklerin zamana göre elektrot potansiyeli değerlerinin karşılaştırılması.

9.7.2 Korozyon Akım Yoğunluğu Değerleri

Mineral katkı tipi, kullanım dozajı ve uygulanan kür yöntemine göre çeşitlilik gösteren betonarme örnekler üretimleri ve ilgili kür periyotlarından sonra sodyum klorür ortamında ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Çeşitli zamanlarda üç elektrotlu sistem ile yapılan polarizasyon çalışmalarından elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerleri bu bölümde sunulmuştur.

Tablo 9.9’da değişik oranlarda uçucu kül içeren ve değişik kür yöntemleri uygulanmış betonarme örneklerdeki donatıların, NaCl ortamında ıslanma-kuruma etkisinde çevrim sayısına göre korozyon akım yoğunluğu değerleri verilmiştir.

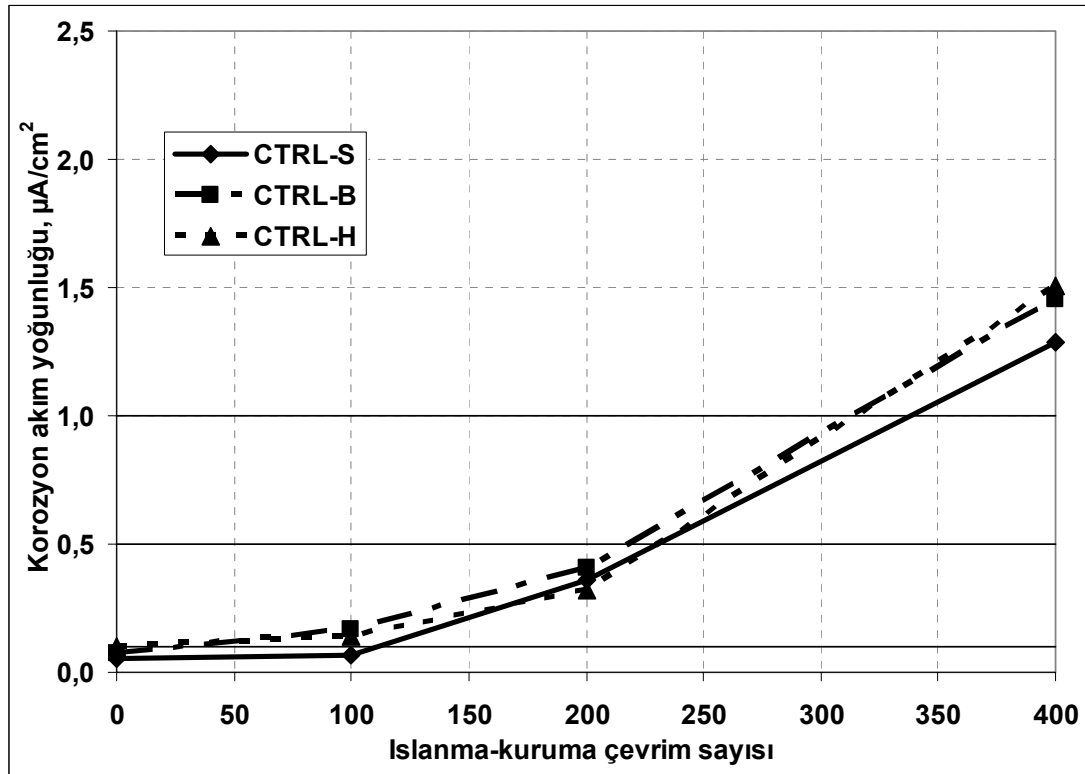
Tablo 9.9 Değişik oranlarda uçucu kül içeren karışımlarda kür yöntemi ve çevrim sayısına göre korozyon akım yoğunluğu değerleri

Örnek kodu	Korozyon akım yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
	0 çevrim	100 çevrim	200 çevrim	400 çevrim
CTRL-S	0,050875	0,063938	0,361250	1,287500
CTRL-B	0,072313	0,165000	0,406875	1,452500
CTRL-H	0,100000	0,137563	0,320000	1,508125
U15-S	0,217500	0,096083	0,296667	0,961875
U15-B	0,224375	0,160625	0,510000	1,443750
U15-H	0,248750	0,105250	0,470313	0,300625
U30-S	0,069083	0,045688	0,230417	0,425000
U30-B	0,053833	0,047625	0,284167	0,997500
U30-H	0,047625	0,066083	0,286875	0,275000
U45-S	0,093563	0,141250	0,148156	0,361250
U45-B	0,170063	0,135750	0,250000	0,675625
U45-H	0,092563	0,051333	0,446250	0,478750
U60-S	0,053458	0,121500	0,231667	0,918500
U60-B	0,105125	0,071833	0,200000	0,599313
U60-H	0,093792	0,042625	0,289583	1,061875

Deney sonuçları, aynı gruba ait dört örnekten elde edilen verilerin ortalaması şeklinde sunulmuştur. Numunelerdeki epoksi kaplamaların düzgün yapılamaması veya delinmesi gibi hatalı örnek hazırlanması sebebiyle elde edilen genel eğilimden çok farklılık gösteren veriler değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Değerlerin, kullanım oranı ve kür yöntemine göre karşılaştırılması Şekil 9.37 – Şekil 9.41 grafiklerde sunulmuştur. Grafiklerde $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ seviyelerindeki yatay çizgiler korozyon hızı sınıflandırmalarındaki limitleri göstermektedir. Korozyon akım yoğunluğu $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinin altında kaldığında ihmal edilebilir düzeyde korozyon gelişimi söz konusudur. Akım yoğunluğu değerinin $0,1$ ile $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında olması düşük korozyon hızlarının, $0,5$ ile $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında olması orta seviyede korozyon hızlarının göstergesidir. Korozyon akım yoğunluğu $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin üzerinde olduğunda yüksek hızda korozyon gelişimi söz konusudur.

Kontrol betonu ile hazırlanmış ve çeşitli şekillerde kür edilmiş örneklerin korozif ortamda ıslanma-kuruma sayısına göre korozyon akım yoğunluğundaki değişimler Şekil 9.37'de gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında başlangıç aşamasında ihmal edilebilir ve düşük hızlarda gelişen korozyon olayının, 200. çevrimden itibaren orta ve yüksek korozyon hızı seviyelerine çıktığı görülmektedir.



Şekil 9.37 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve korozyon ortamında bekleyen kontrol karışımı ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

Betonarme sistemlerde donatı korozyonunun başlangıç ve yayınma periyodu olarak iki aşamalı şekilde modellendiği düşünüldüğünde, örneklerin davranışı bu modele uymaktadır. Başlangıç aşamasında agresif klor iyonlarının betona difüzyonu söz konusudur. Henüz agresif iyonlar ile karşılaşmayan donatıda korozyon gelişimi söz konusu değildir. İlerleyen aşamalarda klor iyonları donatı yüzeyine ulaşır donatının pasifliğini kaybetmesine yol açarlar. Bu süreçten sonra, şiddeti ortam koşullarına ve beton özelliklerine bağlı olmak üzere korozyon belirli bir hız kazanır.

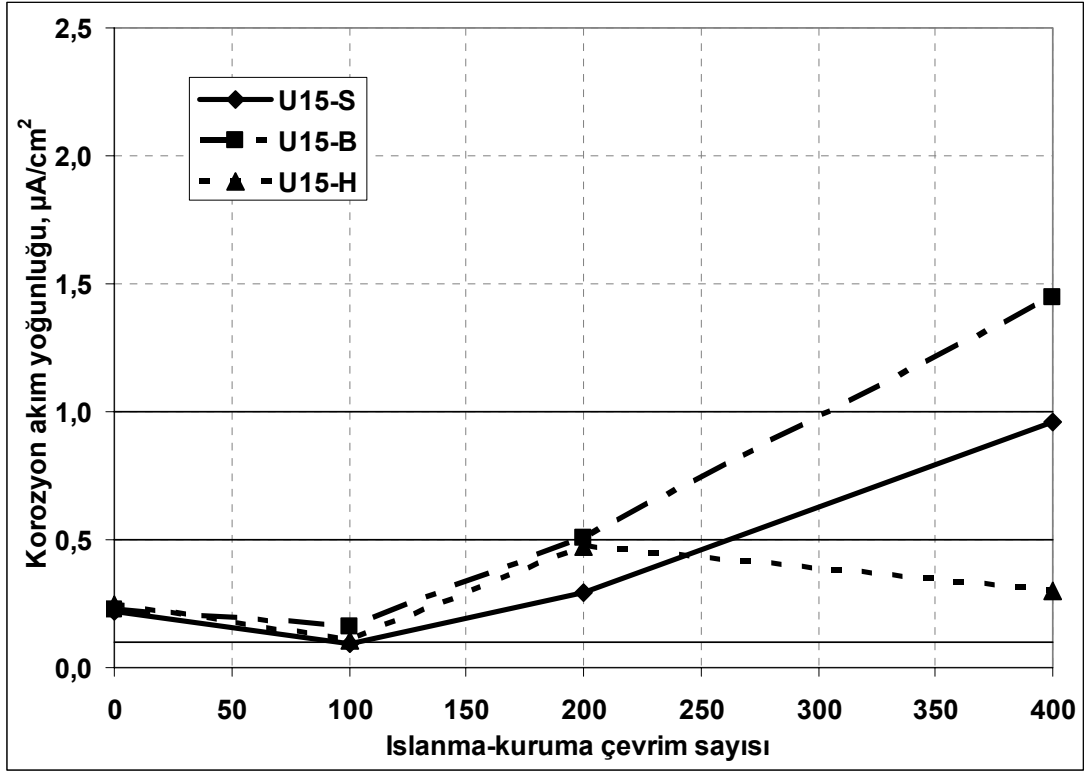
Korozyon açısından agresif klor iyonları, beton bünyesinde fiziksel ve kimyasal olarak tutulabilmektedir. Kimyasal olarak bağlama sırasında çimentonun alüminli karma bileşenleri ve klorürler arasındaki reaksiyondan Friedel tuzu ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) adı verilen kalsiyumkloroalüminat ürünü meydana gelir. Fiziksel bağlama jel boşluklarında klorür iyonlarının adsorbe edilmesiyle gerçekleşir. Dışarıdan gelen klorür etkisinde betonun klor iyonlarını bağlama yeteneği ne kadar yüksek ise etkilenme o kadar az olacaktır. Her ne kadar farklı bir çimento ile aynı

deney tekrarlanmamış olsa da, deneylerde kullanılan çimentonun (CEM I 42,5 R) C_3A içeriğinin (%5,70) nispeten düşük olduğu, dolayısıyla klor bağlama yeteneğinin az olduğu ve agresif koşullarda korozyon gelişiminin nispeten yüksek beklendiği düşünülmektedir. Suryavanshi vd. (1995) normal Portland çimentosunda C_3A fazının klorür iyonu bağlanmasında baskın bir rol oynadığını, Hussain vd. (1995) C_3A miktarının %2'den %14'e çıkması ile klorür bağlama kapasitesinin 2,43 kat, donatıda korozyon başlangıç zamanının ise 2,45 kat arttığını rapor etmiştir. Bir başka çalışmada ise, C_3A oranının %2,8'den 9,5'e çıkması ile 1,6 kat daha fazla klorür bağlanabileceği belirtilmiştir (Suryavanshi, Scantlebury, Lyon 1998). Dehwah vd. (2002), klorür ortamında sülfat iyonlarının varlığının donatı korozyonunun başlangıç zamanını değiştirmedeğini göstermiştir. Dolayısıyla, deniz ortamı gibi çevre koşullarında sülfat etkisinden çok klor etkisine karşı çimento ve mineral katkı seçiminin çok daha önemli olduğu vurgulanmalıdır.

Bu bölümde sonuçları verilen deneylerde tüm örneklerin paspayı tabakası kalınlıklarının aynı ve 30 mm olduğu düşünüldüğünde, fiziksel koruma açısından karşılaştırmalarda tek mekanizma betonun gözenekliliği ve geçirimsizliği olmaktadır. Dolayısıyla, aynı beton karışımlarına sahip örneklerde değişen kür yöntemleri sebebi ile oluşan farklı boşluk yapısı ve geçirimsizlik korozyon gelişiminde etkili bir rol oynamaktadır.

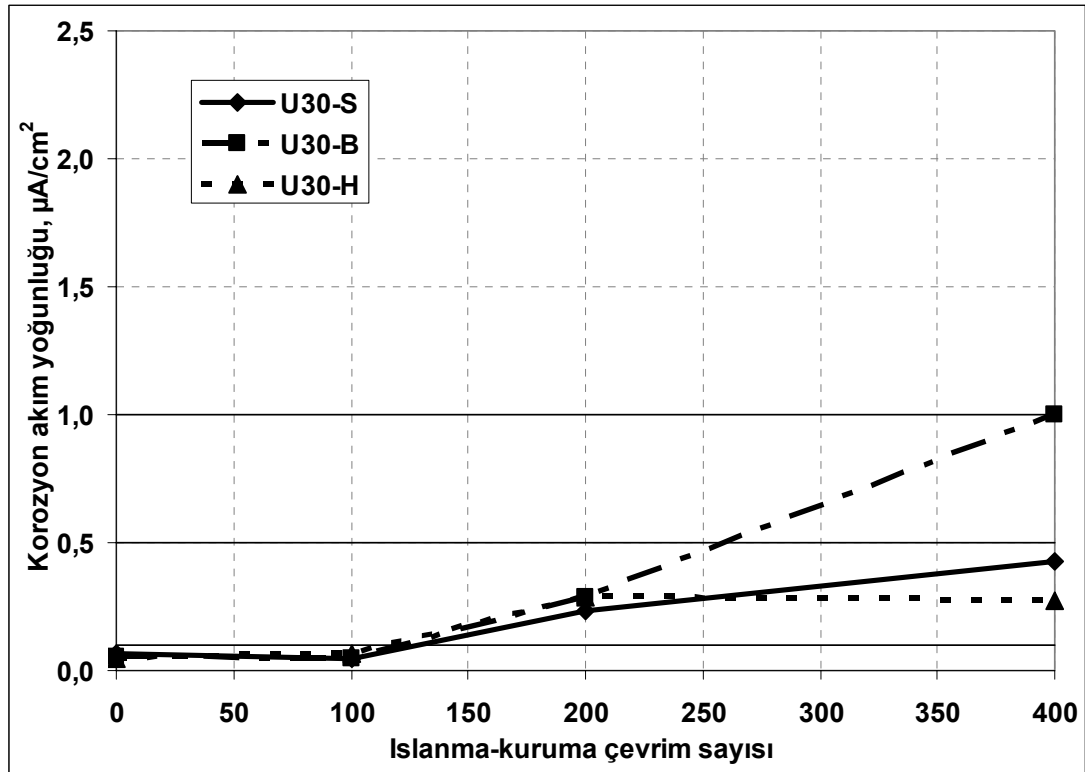
Kontrol betonu ile hazırlanmış örnekler kür yöntemi açısından karşılaştırıldığında, kürsüz ve buhar kürü uygulanmış örneklerin daha yüksek korozyon akım yoğunluğu değerleri gösterdiği görülmektedir. Standart kür yapılmış örneklere göre daha poroz yapıya sahip bu örneklerde daha hızlı korozyon gelişimi söz konusudur. Kürsüz örneklerin ve buhar kürü uygulanmış örneklerin daha boşluklu olması su emme deneyleri ile de ortaya konmuştur.

Değişik oranlarda uçucu kül içeren karışımlarla hazırlanmış örneklerden elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi Şekil 9.38-9.41'de kullanım oranı sırasında göre verilmiştir.



Şekil 9.38 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve korozif ortamda bekleyen %15 UK içeren karışım ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

Grafikler genel olarak incelendiğinde, uçucu kül kullanımının korozyon gelişimini yavaşlattığı görülmektedir. Standart kür ve buhar kürü uygulaması söz konusu olduğunda çimento yerine %45 UK kullanım oranına kadar, kürsüz durumda ise %30'a kadar UK kullanımı korozyon gelişimleri yavaşlatmaktadır.

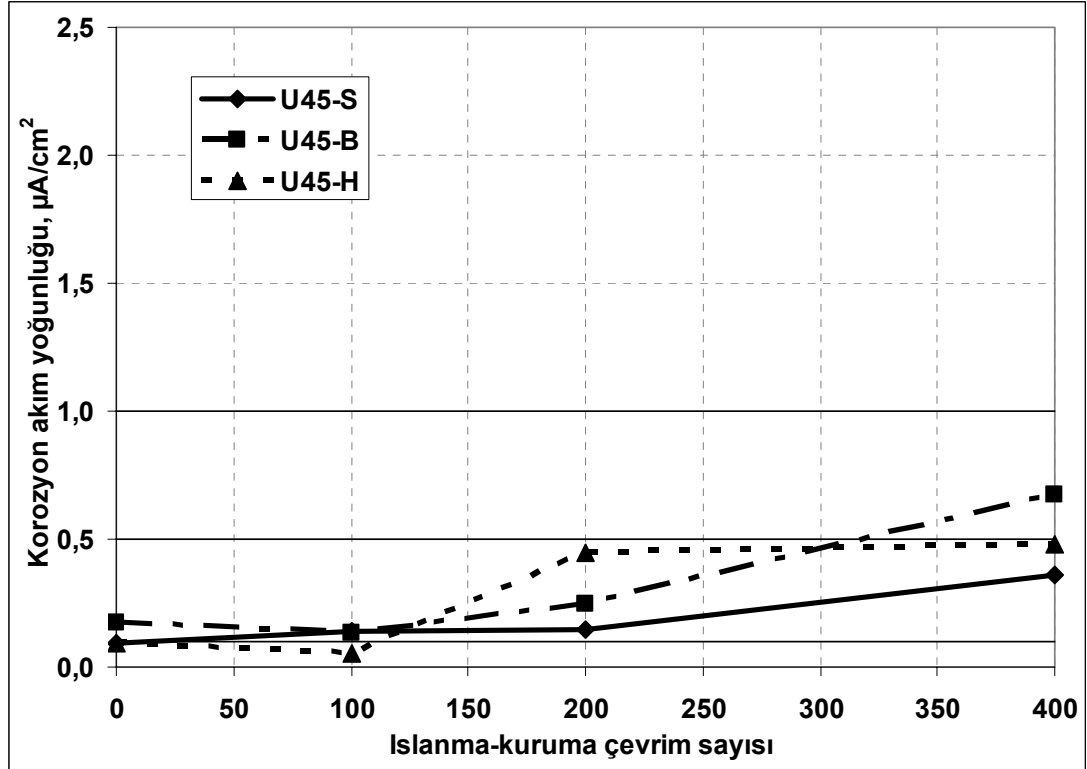


Şekil 9.39 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve korozyon ortamında bekleyen %30 UK içeren karışım ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

Klorür etkisine maruz betonlarda, uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanımının olumlu sonuçlar verdiği bilinmektedir (Hussain, 1994, Kayali ve Zhu 2005, Thomas ve Matthews, 2004). Bu sonuç mineral katkı ile klor iyonlarının kimyasal olarak bağlanması ile sağlanır. Klor iyonları beton bünyesine penetre olup mineral katkı tanelerinin yüzeyinde adsorblanır. Daha sonra alüminli bileşenler ile reaksiyon yaparak kloroalüminatlar şeklinde tutulur. Benzer reaksiyon, çimentonun C_3A bileşeni ile klor iyonları arasında da gerçekleştiği ve ürünün Friedel tuzu olduğu belirtilmişti. Mineral katkıların klor iyonları ile yaptığı reaksiyon da benzer bir ürün oluşturarak klor iyonlarının zararlı etkisinin azaltılmasını sağlar.

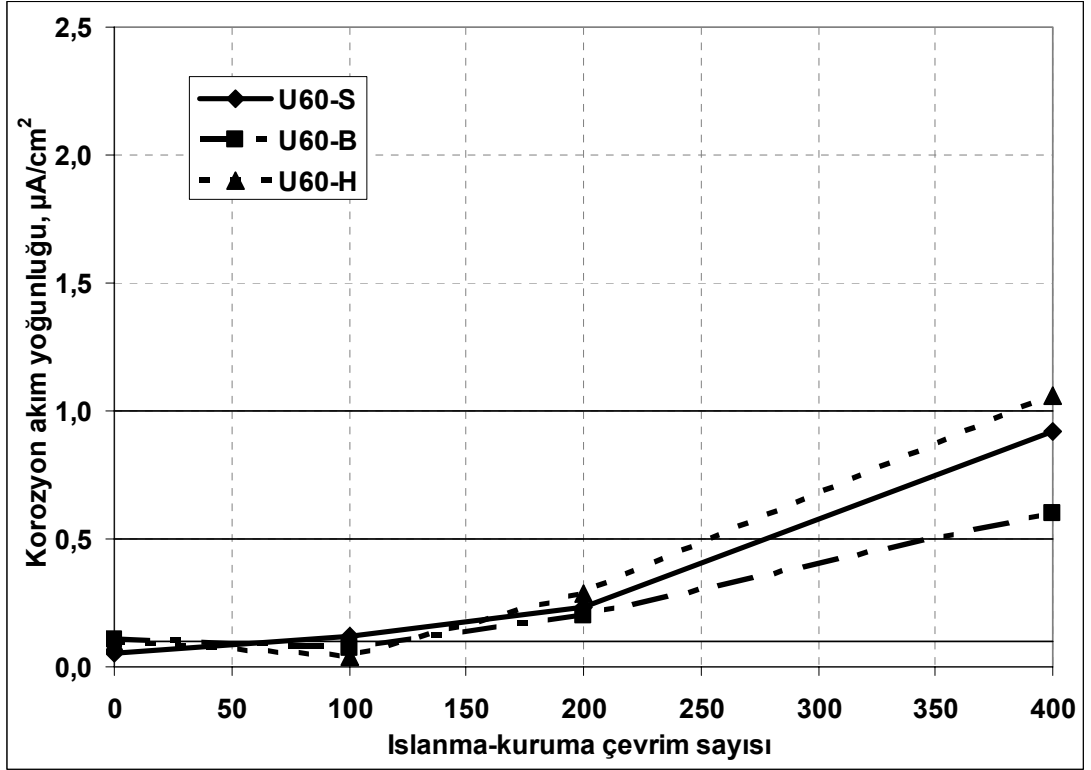
Söz konusu edilen reaksiyonlar aynı zamanda klor penetrasyon derinliği ölçümlerinde bulunan olumlu sonuçların da oluşmasını sağlamıştır. Çimentonun bir kısmı yerine mineral katkı kullanımı ile sistemdeki Al içeren bileşenler veya minerallerin

miktarının artması sağlanmıştır. Böylelikle klor iyonlarının betonun derinliklerine inmesi engellenmiştir.



Şekil 9.40 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve korozyif ortamda bekleyen %45 UK içeren karışım ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

Ancak ne var ki, bu olumlu davranış belirli bir kullanım oranına kadar fayda sağlamaktadır. Uçucu külün %45 ve %60 kullanım oranlarında, olumlu etki kaybolmuş ve korozyon akım yoğunluğu değerlerinde tekrar artış ortaya çıkmıştır. Basınç dayanımı, karbonatlaşma derinliği ve su emme deney verilerinden anlaşılacağı gibi, çimento yerine yüksek oranda uçucu kül kullanılması durumunda gözenekliliğin çok arttığı belirlenmiştir. Gözeneklilikteki artışın sebep olduğu bu durum, klor iyonlarının tutulması ile sağlanan olumlu davranışa baskın çıkmış ve sonuçta korozyon gelişiminin arttığı gözlenmiştir.



Şekil 9.41 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve korozif ortamda bekleyen %60 UK içeren karışım ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

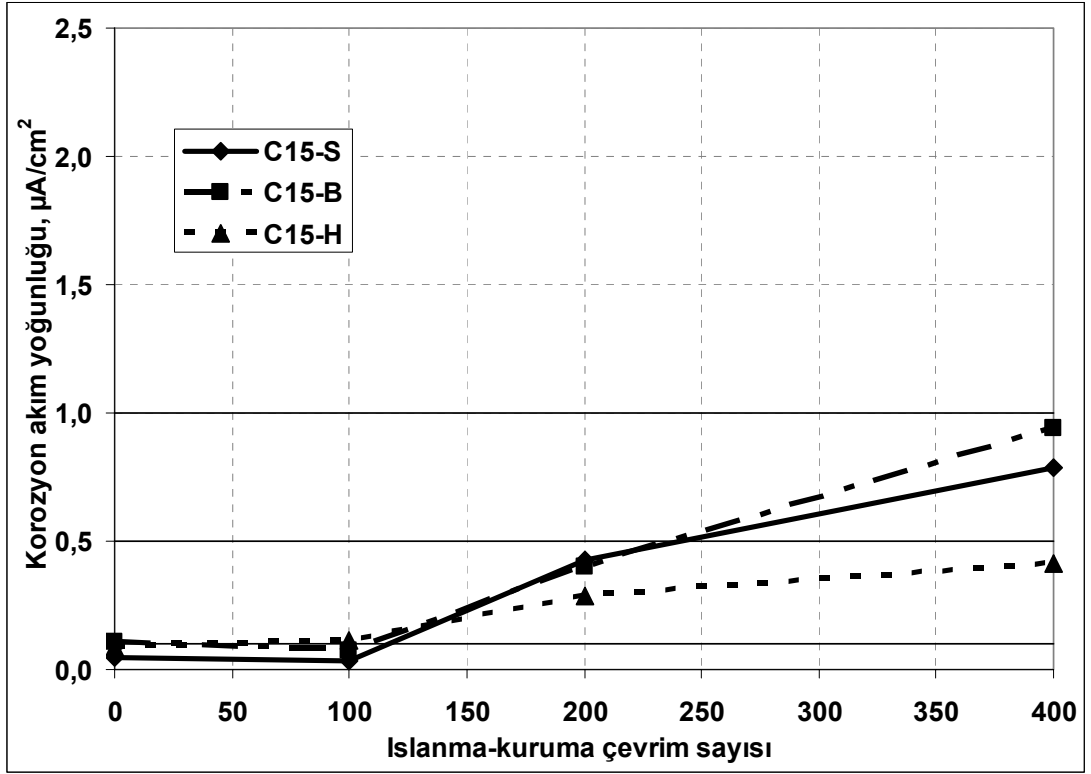
Bağlayıcı madde olarak çimento yerine değişik oranlarda yüksek fırın cürufu içeren ve değişik kür yöntemleri uygulanmış betonarme örneklerdeki donatıların ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre korozyon akım yoğunluğu değerleri Tablo 9.10'da verilmiştir.

Tablo 9.10 Değişik oranlarda yüksek fırın cürufu içeren karışımlarda kür yöntemi ve çevrim sayısına göre korozyon akım yoğunluğu değerleri

Örnek kodu	Korozyon akım yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
	0 çevrim	100 çevrim	200 çevrim	400 çevrim
CTRL-S	0,050875	0,063938	0,361250	1,287500
CTRL-B	0,072313	0,165000	0,406875	1,452500
CTRL-H	0,100000	0,137563	0,320000	1,508125
C15-S	0,046625	0,036667	0,426667	0,788125
C15-B	0,107750	0,071031	0,401563	0,937500
C15-H	0,088958	0,110906	0,283750	0,413625
C30-S	0,049792	0,116375	0,213125	0,435000
C30-B	0,058250	0,050406	0,240719	0,815000
C30-H	0,057958	0,062281	0,252500	0,282625
C45-S	0,047250	0,050938	0,273750	0,815625
C45-B	0,067228	0,038250	0,302083	1,015625
C45-H	0,171406	0,056906	0,316667	1,085625
C60-S	0,039819	0,098125	0,320000	1,326875
C60-B	0,037746	0,099313	0,153750	1,362500
C60-H	0,048950	0,133417	0,385000	1,165000

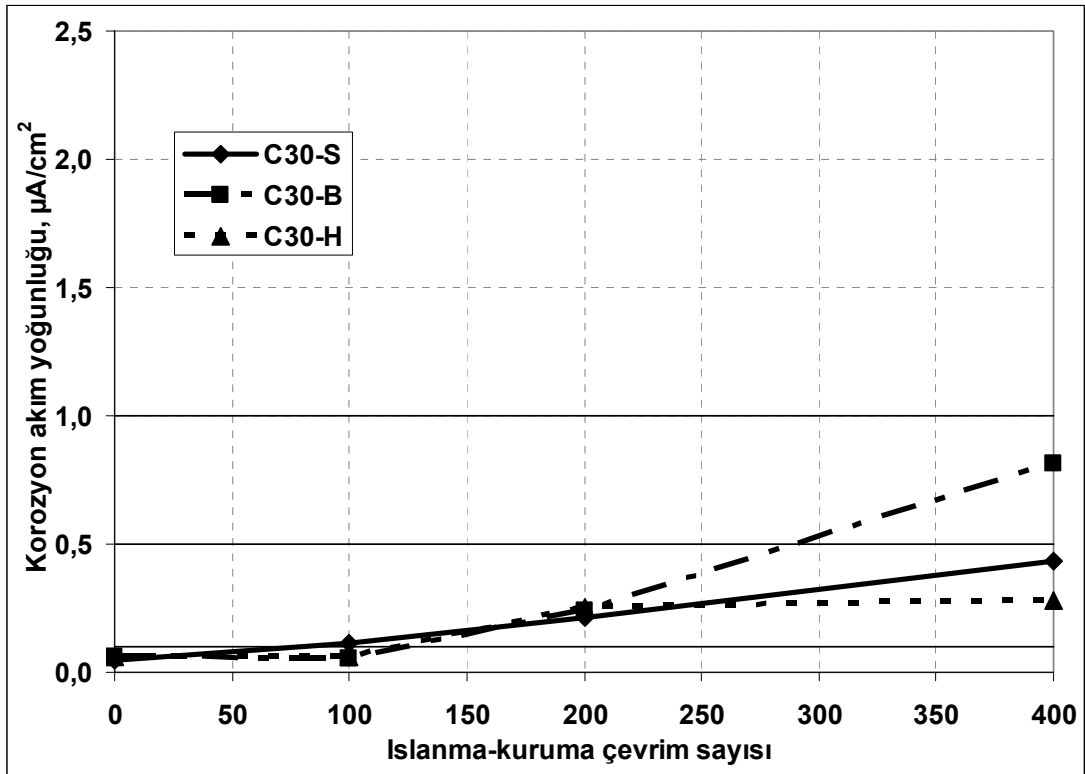
C15 kodlu (karışımında çimento yerine %15 yüksek fırın cürufu kullanılmış) beton ile hazırlanmış numunelerde korozi ortamda korozyon gelişimi Şekil 9.42'de grafik olarak gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, standart kürlü örnekler 400 çevrim sonunda $0,788 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu değer göstermiştir. Islanma-kuruma etkisinde 100 çevrime kadar çok düşük değerler ölçülürken, 200. çevrimden itibaren korozyon akım yoğunluğu değerleri düşük ve orta hızda korozyon gelişim sınıfına çıkmıştır. Klor iyonlarının betona nüfuz etmesi aşaması başlangıç aşaması olup korozyon gelişimi ihmal edilebilir düzeydedir. Yayınma periyodu ise 200 çevrimden sonra başlamış ve korozyon gelişimi hızlanmıştır.

Buhar kürü uygulamasının daha yüksek korozyon gelişimine sebep olduğu YFC içeren karışımlarda da gözlenmiştir. Bu durum her kullanım oranı için geçerlidir.

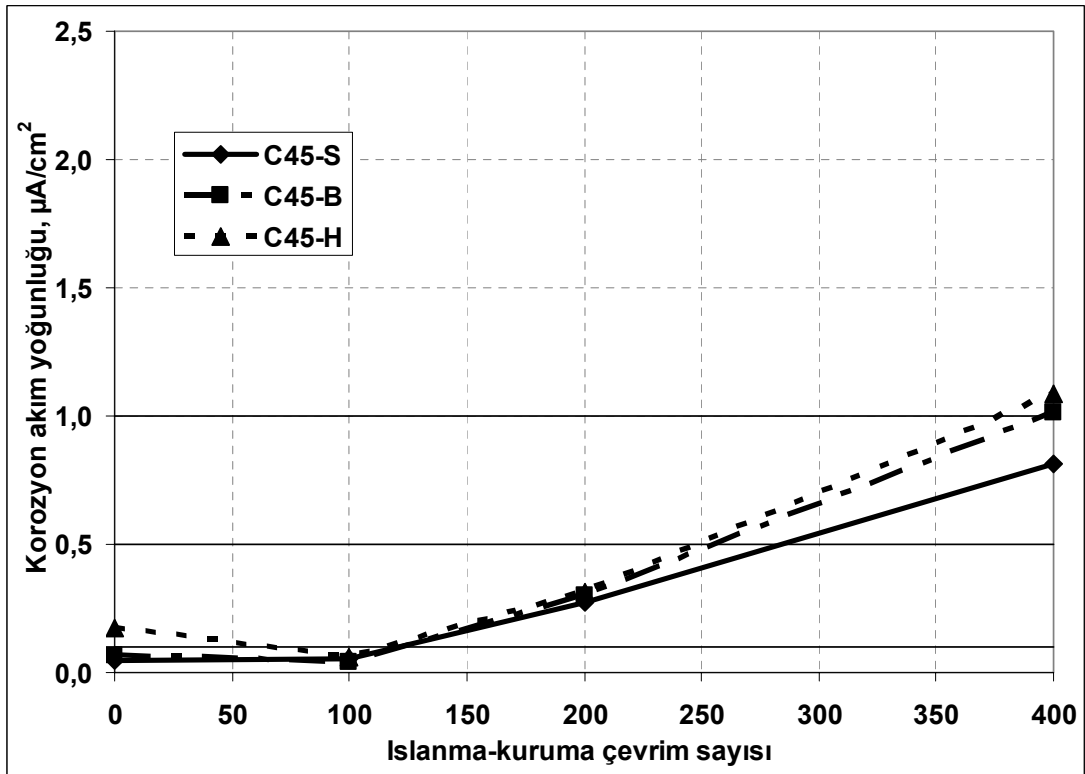


Şekil 9.42 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve korozif ortamda bekleyen %15 YFC içeren karışım ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

İlginç bir şekilde, kürsüz örneklerden elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin %15 ve %30 YFC kullanım oranlarında standart kürlü örneklerden bile daha düşük olduğu görülmüştür. Bu çelişkili sonuç tekrar edilmesi gereken bir ölçüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

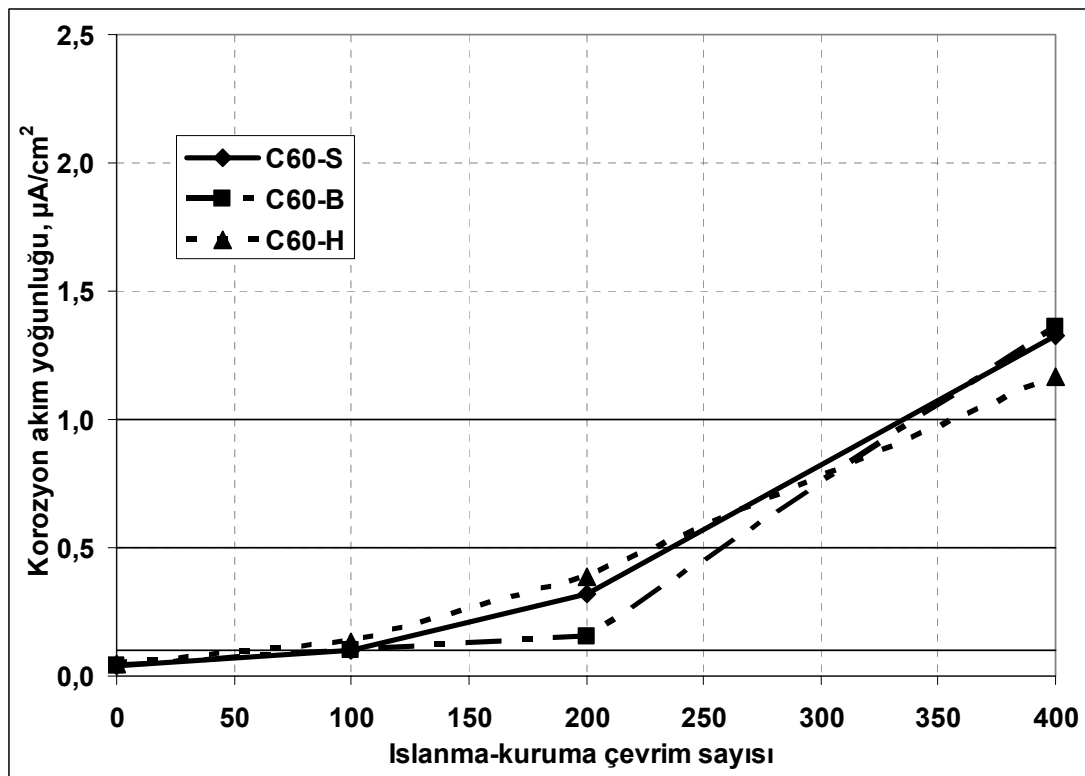


Şekil 9.43 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve korozyon ortamında bekleyen %30 YFC içeren karışım ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.



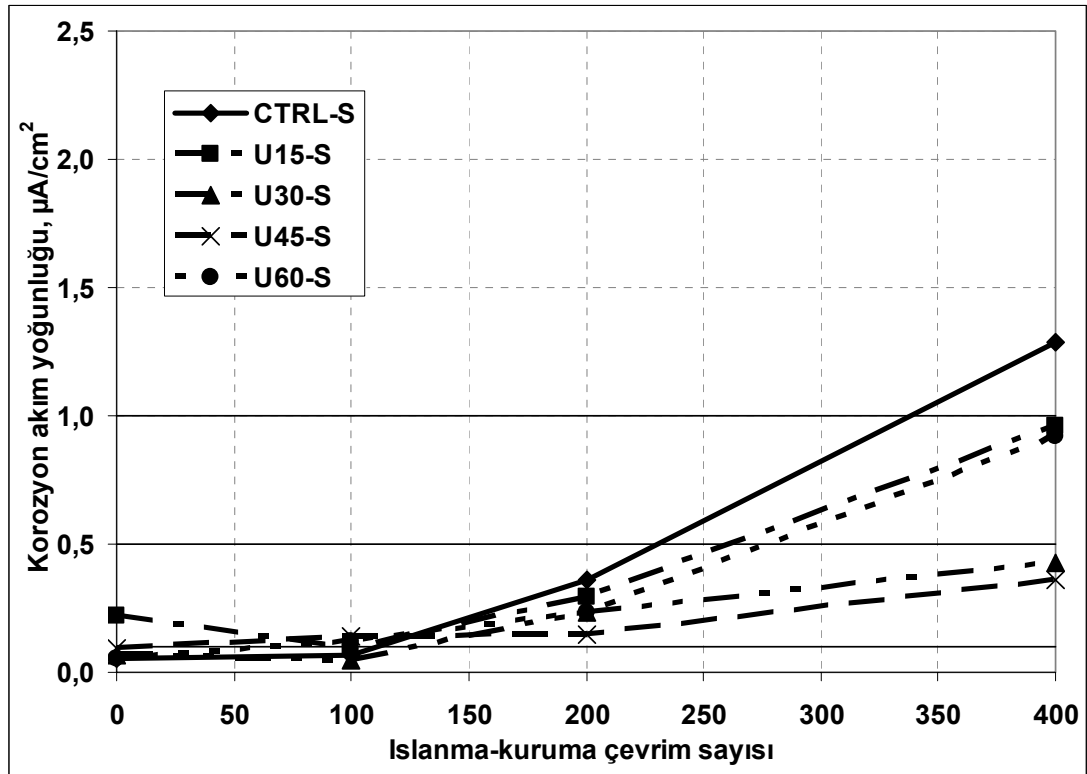
Şekil 9.44 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve korozyon ortamında bekleyen %45 YFC içeren karışım ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

Uçucu kül kullanımı ile benzer mekanizma sebebi ile belirli bir optimum yüksek fırın cürufu kullanım oranında korozyon gelişimi yavaşlamaktadır. Bu değer tüm kür yöntemleri için yaklaşık bir şekilde %30 olarak belirlenmiştir. Daha yüksek kullanım oranlarında artan gözeneklilik nedeni ile korozyon tekrar hızlanmaya başlamış, klor iyonlarının kimyasal olarak bağlanmasının sağladığı olumlu etki görünmez hale gelmiştir.

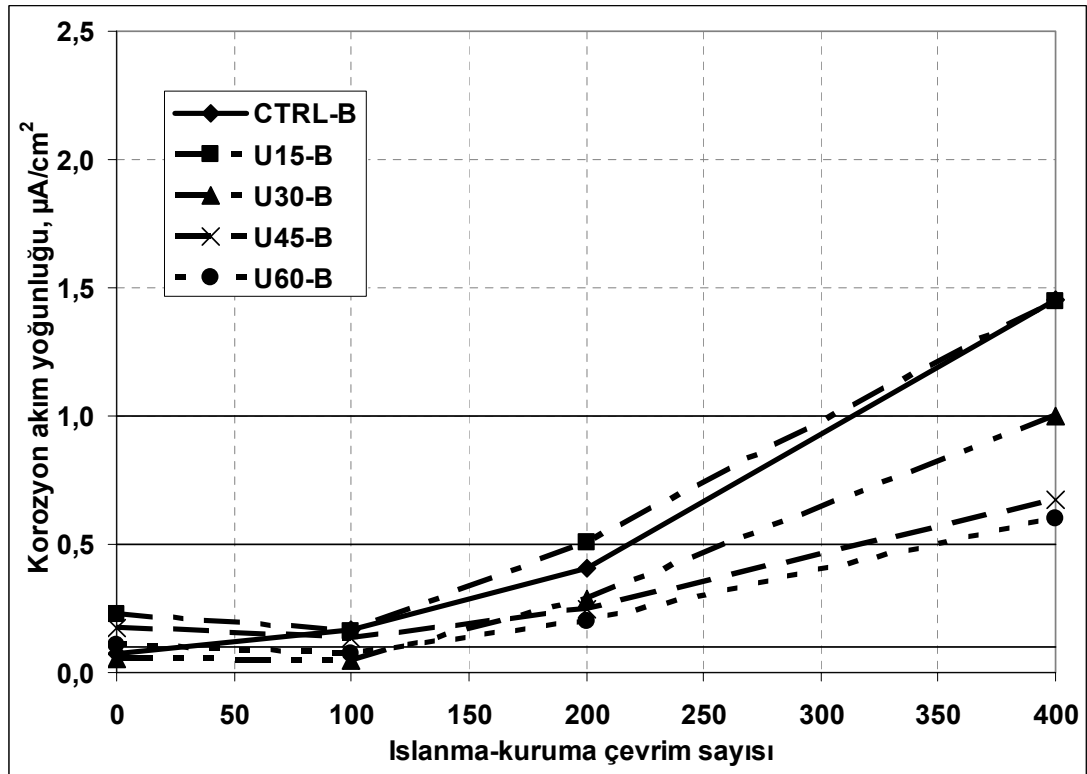


Şekil 9.45 Farklı yöntemlerle kür edilmiş ve koroziif ortamda bekleyen %60 YFC içeren karışım ile hazırlanmış örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

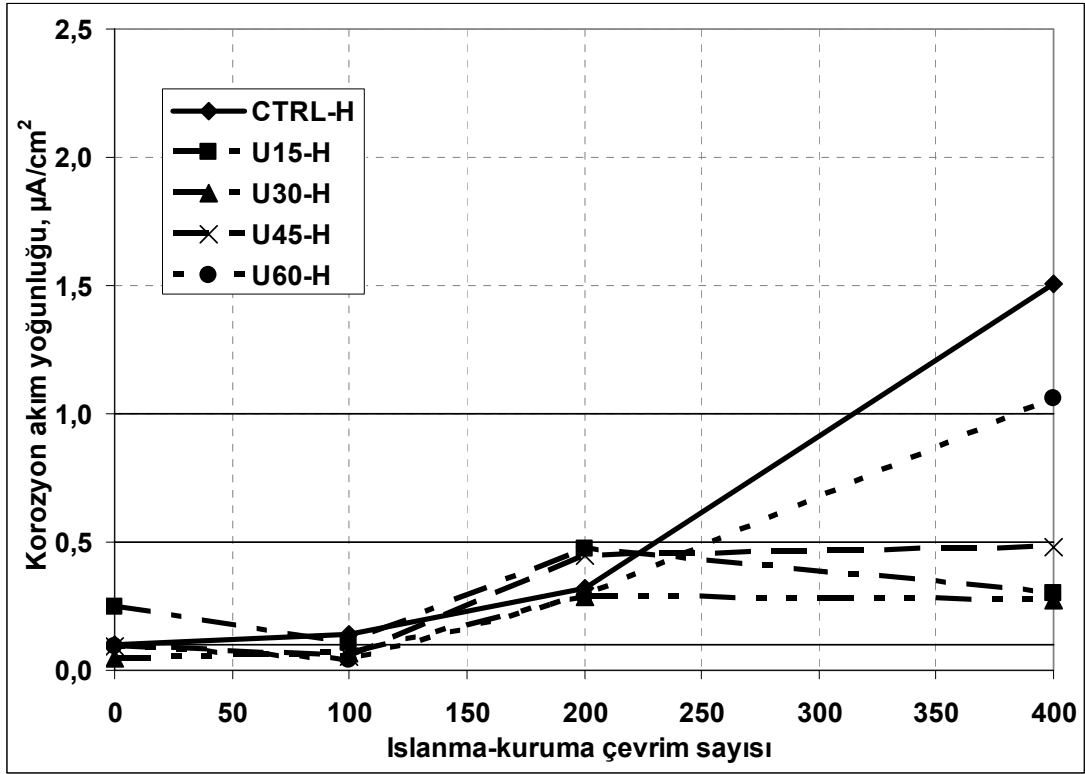
Aynı grafik üzerinde kür yöntemi sabit kalmak koşulu ile beton karışımlarının farklılık arz ettiği örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerleri uçucu kül kullanımı için Şekil 9.46-9.48'de, yüksek fırın cürufu kullanımı için ise Şekil 9.49-9.51'de gösterilmiştir. Bu grafiklerden belirli oranlara kadar mineral katkıların kullanımının, kontrol betonlarına kıyasla donatıda korozyon akım yoğunluğu değerlerini azalttığı takip edilebilir.



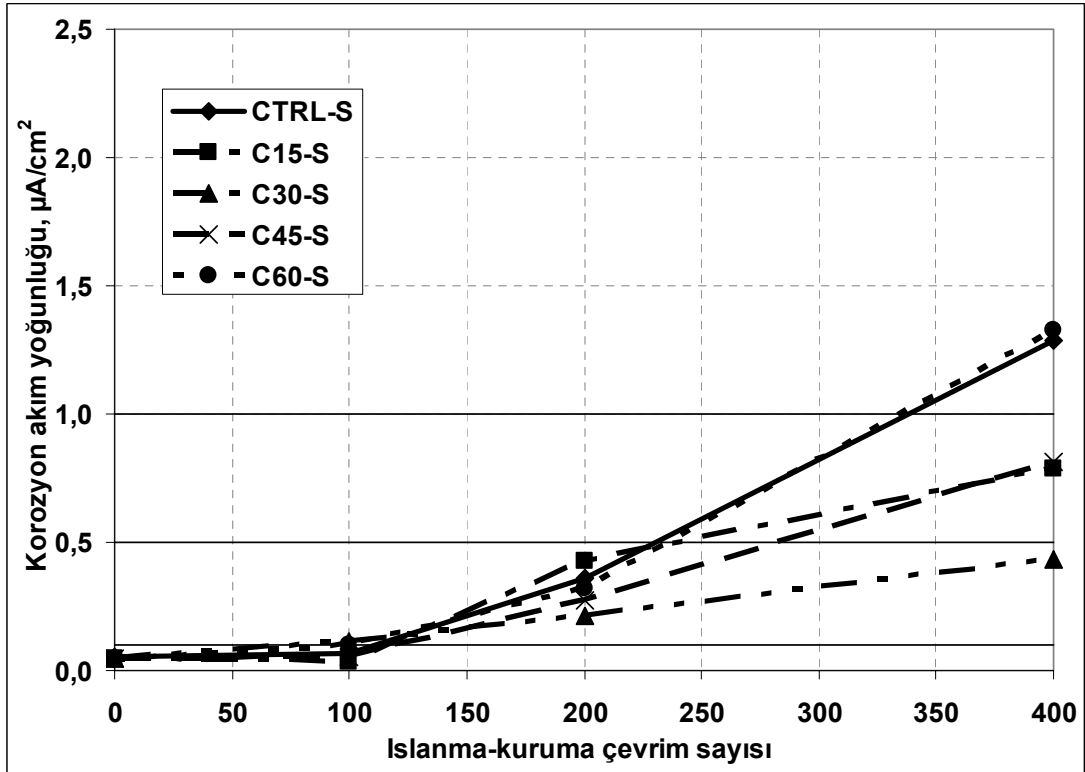
Şekil 9.46 Standart yöntemle kür edilmiş ve korozyon ortamında bekleyen çeşitli oranlarda UK içeren örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.



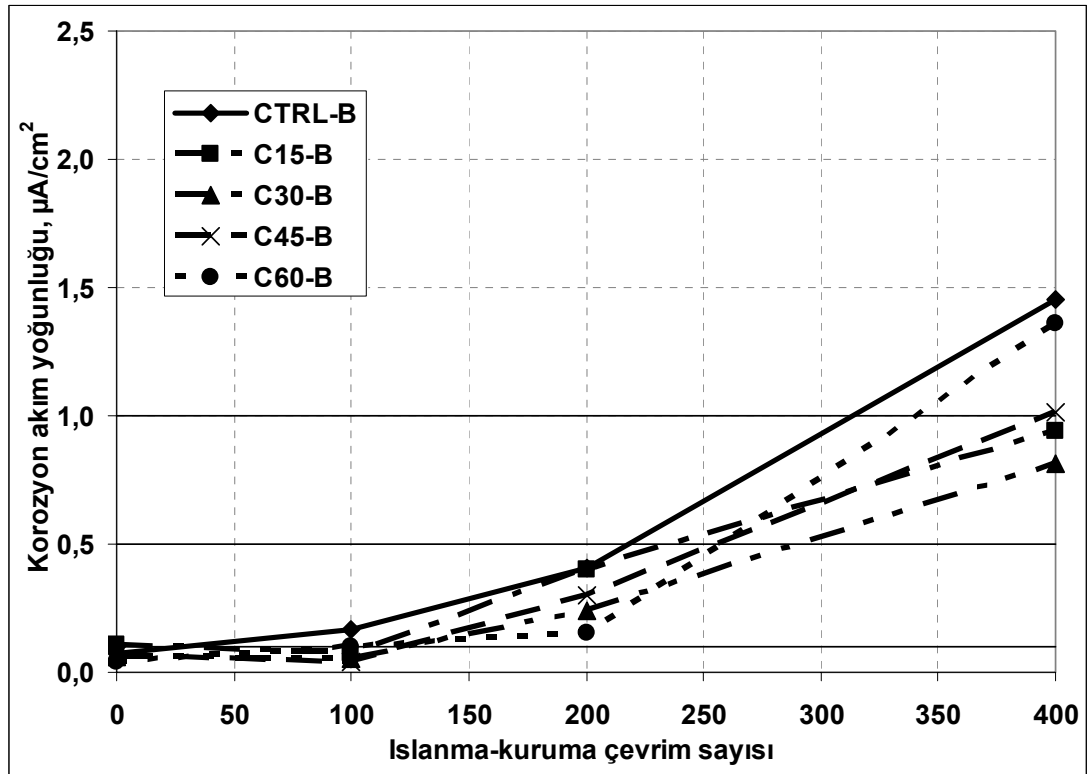
Şekil 9.47 Buhar kürü uygulanmış ve korozyon ortamında bekleyen çeşitli oranlarda UK içeren örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.



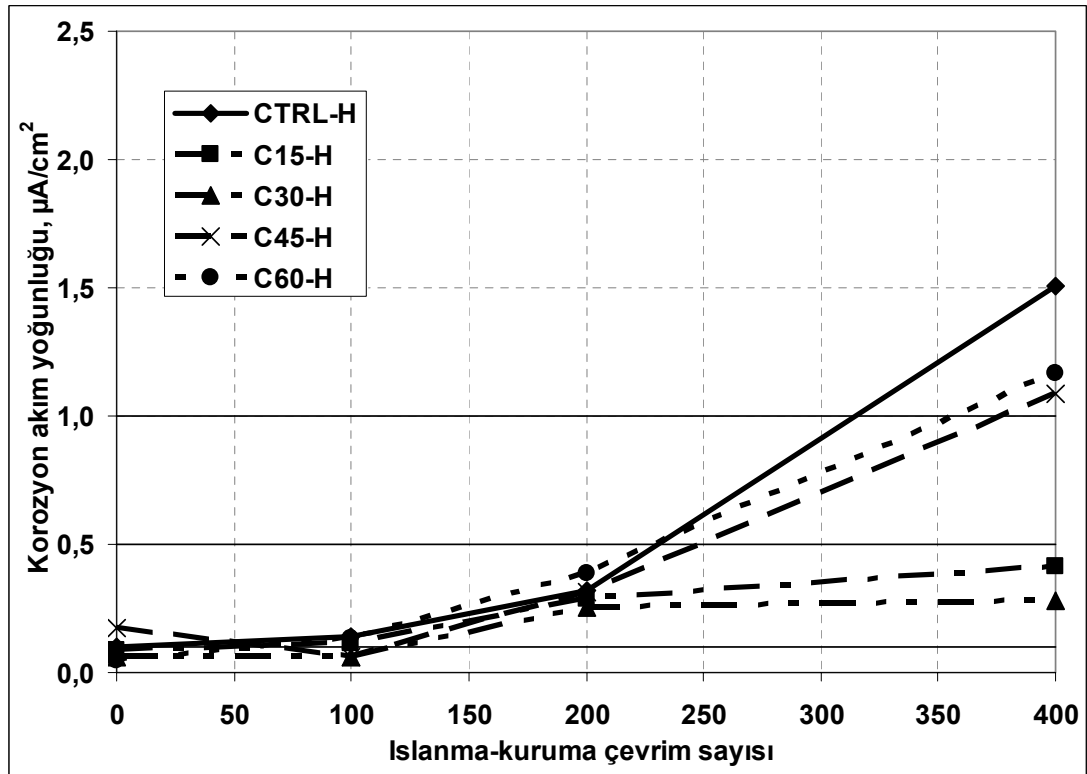
Şekil 9.48 Kür uygulaması yapılmamış ve korozyon ortamında bekleyen çeşitli oranlarda UK içeren örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.



Şekil 9.49 Standart yöntemle kür edilmiş ve korozyon ortamında bekleyen çeşitli oranlarda YFC içeren örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

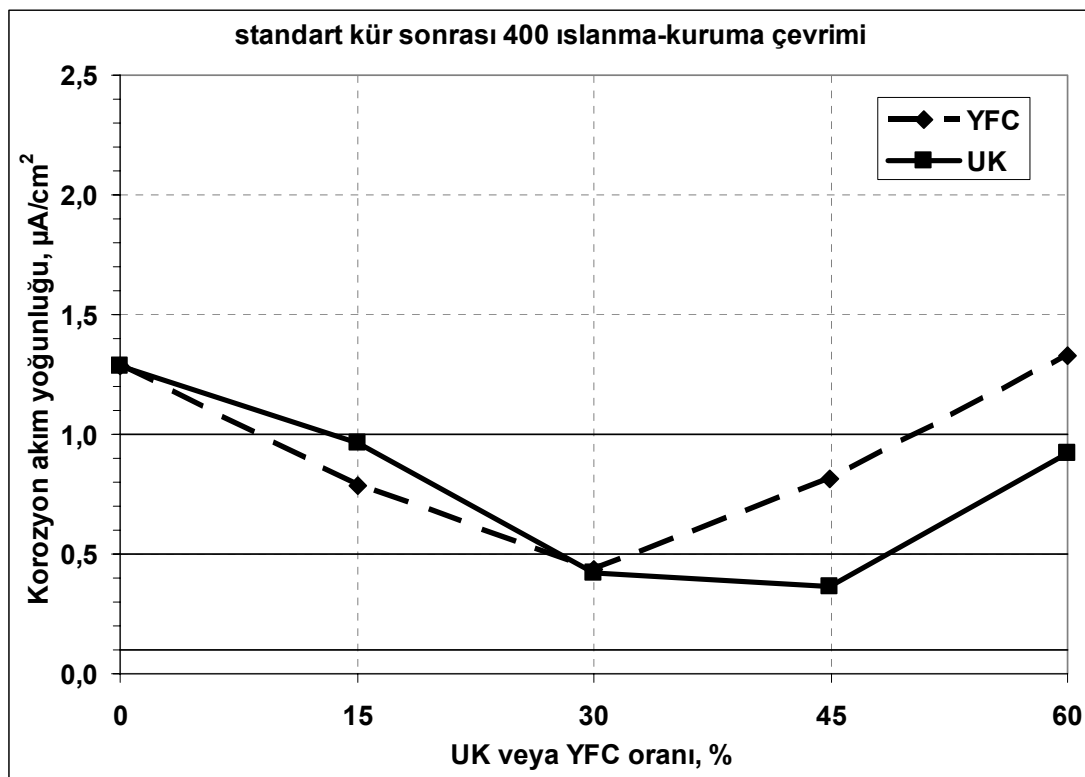


Şekil 9.50 Buhar kürü uygulanmış ve korozyon ortamında bekleyen çeşitli oranlarda YFC içeren örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.



Şekil 9.51 Kür uygulaması yapılmamış ve korozyon ortamında bekleyen çeşitli oranlarda YFC içeren örneklerdeki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin gelişimi.

NaCl ortamında 400 ıslanma-kuruma çevrimi sonunda ulaşılan en yüksek korozyon akım yoğunluğu değerlerini mineral katkıların tipi (UK veya YFC) ve kullanım oranı açısından karşılaştırabilmek için standart kür durumu için Şekil 9.52, buhar kürü uygulaması için Şekil 9.53 ve kürsüz örnekler için Şekil 9.53'teki grafikler çizilmiştir. Grafiklerde aynı zamanda korozyon hızı sınıfları için sınır değerler de çizilmiştir.



Şekil 9.52 Çeşitli oranlarda UK ve YFC içeren, standart yöntemle kür edilmiş örneklerde korozif ortamda 400 çevrim sonrasındaki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin karşılaştırılması.

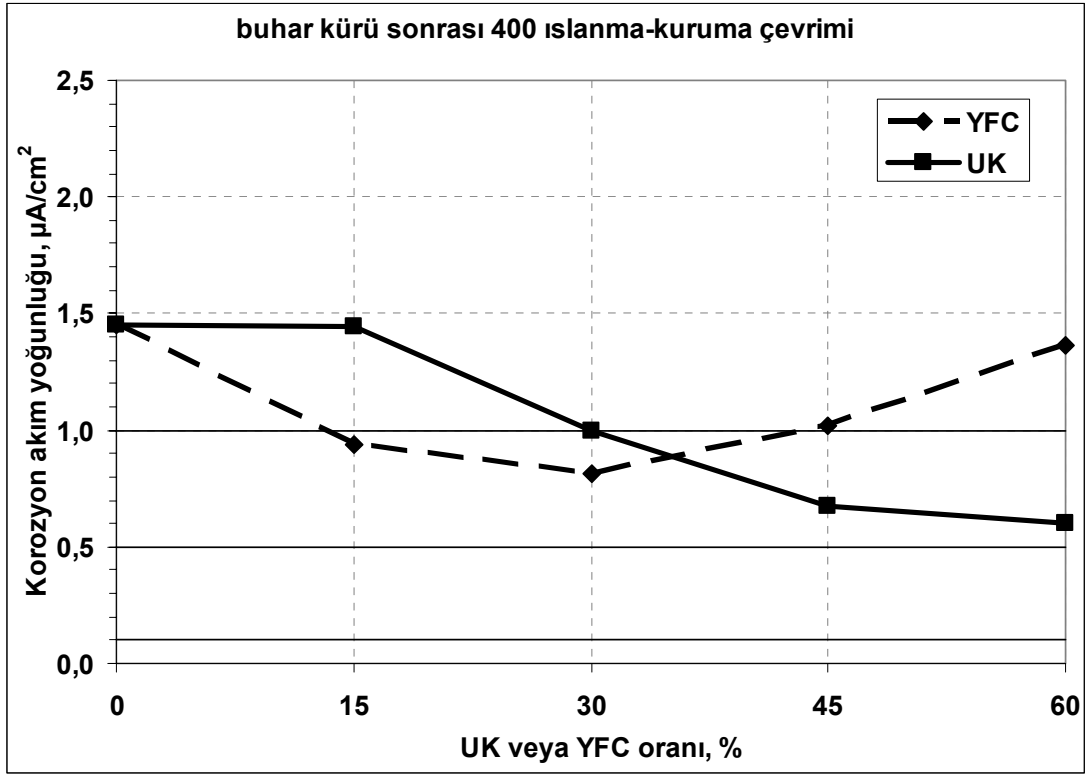
Standart kürlü örneklerin uzun dönemli korozyon performansı açısından bakıldığında çimento yerine yüksek fırın cürufu kullanımı için optimum oranın %30, C tipi uçucu kül kullanımı için optimum oranın %45 olduğu Şekil 9.52'den görülmektedir. Bu oranlardan daha yüksek mertebede kullanım durumunda korozyon akım yoğunluğu değerleri tekrar artış göstermektedir. Ha ve diğ. (2007) de F tipi

uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada, sabit voltaj kullanarak anodik polarizasyon ve makrohücre ölçümlerinden, %30'a kadar uçucu kül kullanımının korozyon başlangıç zamanını geciktirdiğini ve korozyon yoğunluğu değerlerinin azaldığını tespit etmişlerdir.

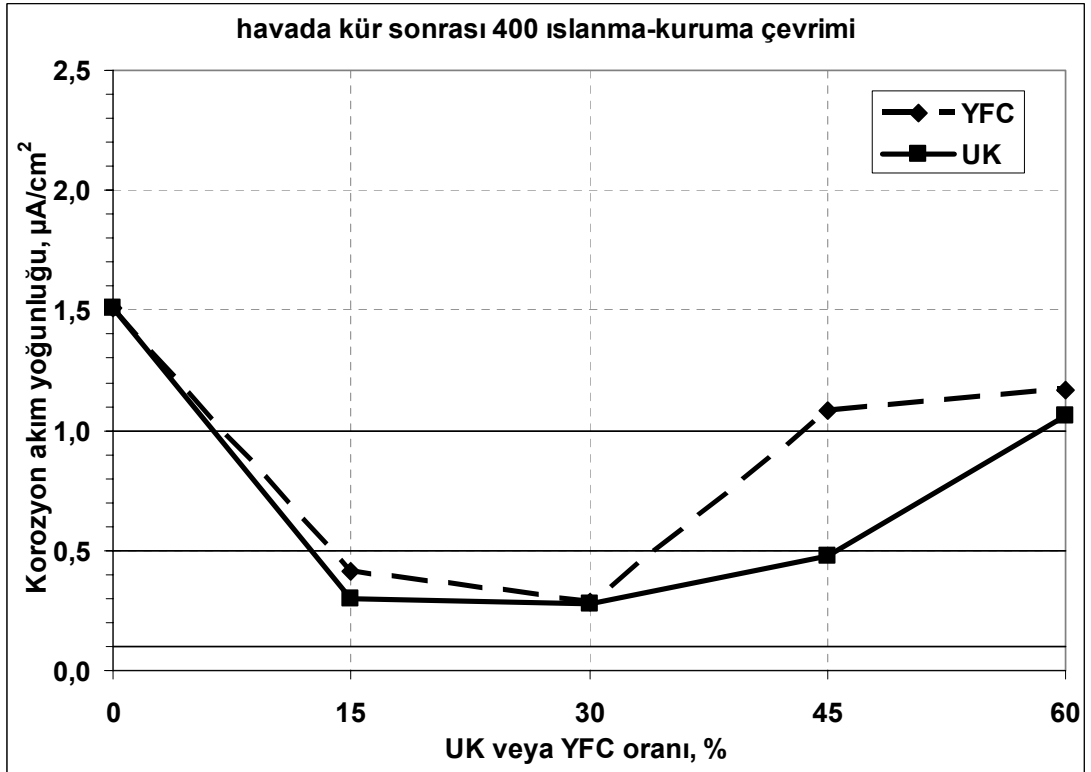
Kontrol örneklerinde 400. çevrimde $1,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluğu değerinde ve yüksek hız sınıfında korozyon gelişimi söz konusu iken, %15 mineral katkı kullanımında $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinin altında ve orta korozyon hızı sınıfına geçilmiştir. Katkı oranının %30 çıkması korozyon hızını düşük sınıfa indirmiştir. Katkı kullanım oranının %45'e çıkması, uçucu kül kullanımı için değerleri bir miktar daha düşürüp sınıf değiştirememiş ancak, yüksek fırın cürufu için değerler artış gösterip tekrar orta korozyon hızı sınıfına çıkmıştır. Oranın %60 olması durumunda ise uçucu kül içeren örnekler orta düzeyde, yüksek fırın cürufu içeren örnekler ise yüksek düzeyde korozyon gelişimine maruz kalmaktadır.

Bu karşılaştırma çerçevesinde bakıldığında, %30'a kadar nispeten düşük kullanım oranlarında yüksek fırın cürufunun, %30'dan daha yüksek oranlarda ise uçucu külün daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Klorür etkisine maruz kalacak betonarme yapılarda donatıların daha iyi korunması için bu davranışa göre beton üretilmesi önerilebilir.

Buhar kürü uygulanmış ve herhangi bir kür uygulaması yapılmamış örneklerin mineral katkı tipi ve kullanım oranı açısından uzun dönemli karşılaştırmaları Şekil 9.53 ve Şekil 9.54'te gösterilmiştir.



Şekil 9.53 çeşitli oranlarda UK ve YFC içeren, buhar kürü uygulanmış örneklerde korozif ortamda 400 çevrim sonrasındaki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 9.54 çeşitli oranlarda UK ve YFC içeren, k r uygulaması yapılmamış örneklerde korozif ortamda 400 çevrim sonrasındaki korozyon akım yoğunluğu değerlerinin karşılaştırılması.

Buhar kürü ve kürsüz durumlar için de benzer eēilimlerin geçerli olduēu söylenbilir. Öte yandan buhar kürü durumunda, kürsüz durumdan bile daha yüksek korozyon akım yoēunluēu deēerlerinin elde edildiēi çarpıcı bir Şekilde ortaya çıkmıştır.

BÖLÜM ON

PAS PAYI TABAKASI KALINLIĞININ DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ

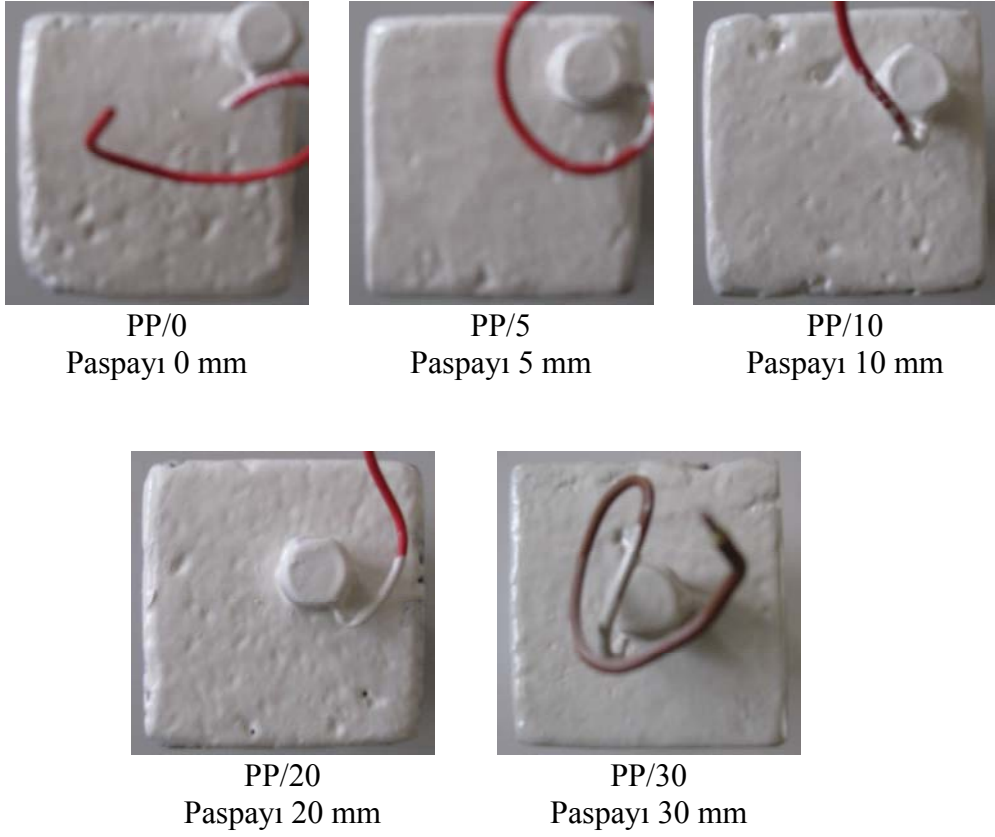
Deneysel çalışmaların son bölümü olarak, korozif ortama maruz kalan betonarme örneklerde pas payı tabakası kalınlığının donatıdaki korozyon gelişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, 6.6 bölümünde detayları anlatılan örnekler üretilmiş ve önceki çalışmalara benzer yöntem izlenmiştir. Örnekler %3,5 NaCl çözeltisinde önceki bölümlerde uygulanan ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Başlangıçta, 25., 50. ve 100. çevrimlerde korozyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada beş farklı pas payı tabakası kalınlığı seçilmiştir. Herhangi bir pas payı tabakası bulunmayan bir başka deyişle, donatının beton yüzeyinde olduğu betonarme örnekler ile 5, 10, 20 ve 30 mm paspayı tabakası kalınlığına sahip örnekler üretilmiştir. Pas payı tabakası kalınlığının sıfır olduğu örnekler üç farklı grupta toplanmıştır. A grubu örneklerde tüm numunelerde donatı beton dış yüzeyinde olup donatı tamamen açıktadır. B grubu örneklerde donatı yüzeyi kısmen çimento şerbeti ile kaplanmıştır. Donatıların tamamen ince bir çimento şerbeti tabakası ile kaplanmış olduğu örnekler ise C grubu olarak tarif edilmiştir.

Tablo 10.1 Betonarme örnek kodları ve açıklamaları

Örnek kodu	Pas payı tabakası kalınlığı	Açıklama
PP/0-A	0	Donatı tamamen açıkta
PP/0-B	0	Donatı kısmen çimento şerbetiyle kaplı
PP/0-C	0	Donatı tamamen şerbetle kaplı
PP/5	5	Donatı 5 mm betonla kaplı
PP/10	10	Donatı 10 mm betonla kaplı
PP/20	20	Donatı 20 mm betonla kaplı
PP/30	30	Donatı 30 mm betonla kaplı

Değişik pas payı tabakası kalınlığına sahip örnekler Şekil 10.1’de, paspayı tabakası olmayan ancak yüzeyde kısmen çimento şerbeti bulunan örnek ise Şekil 10.2’de gösterilmiştir.



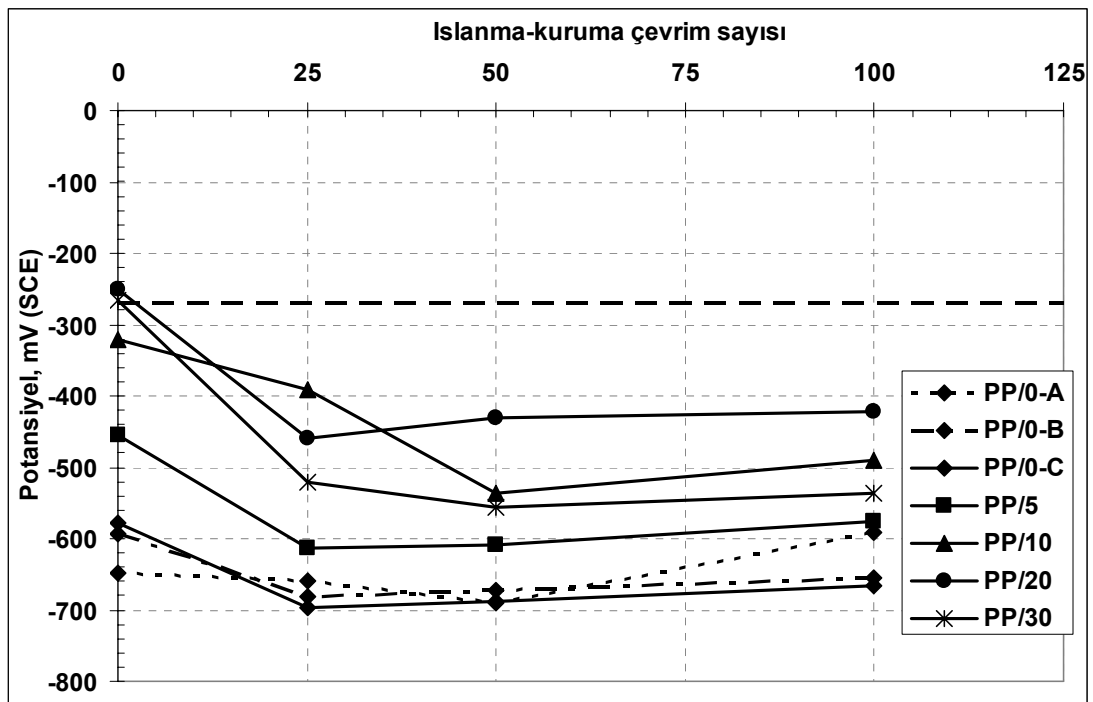
Şekil 10.1 Değişik pas payı tabakası kalınlığına sahip örnekler.



Şekil 10.2 Donatı yüzeyinde kısmen çimento şerbeti olan örnekler.

10.1 Elektrokimyasal Ölçümler

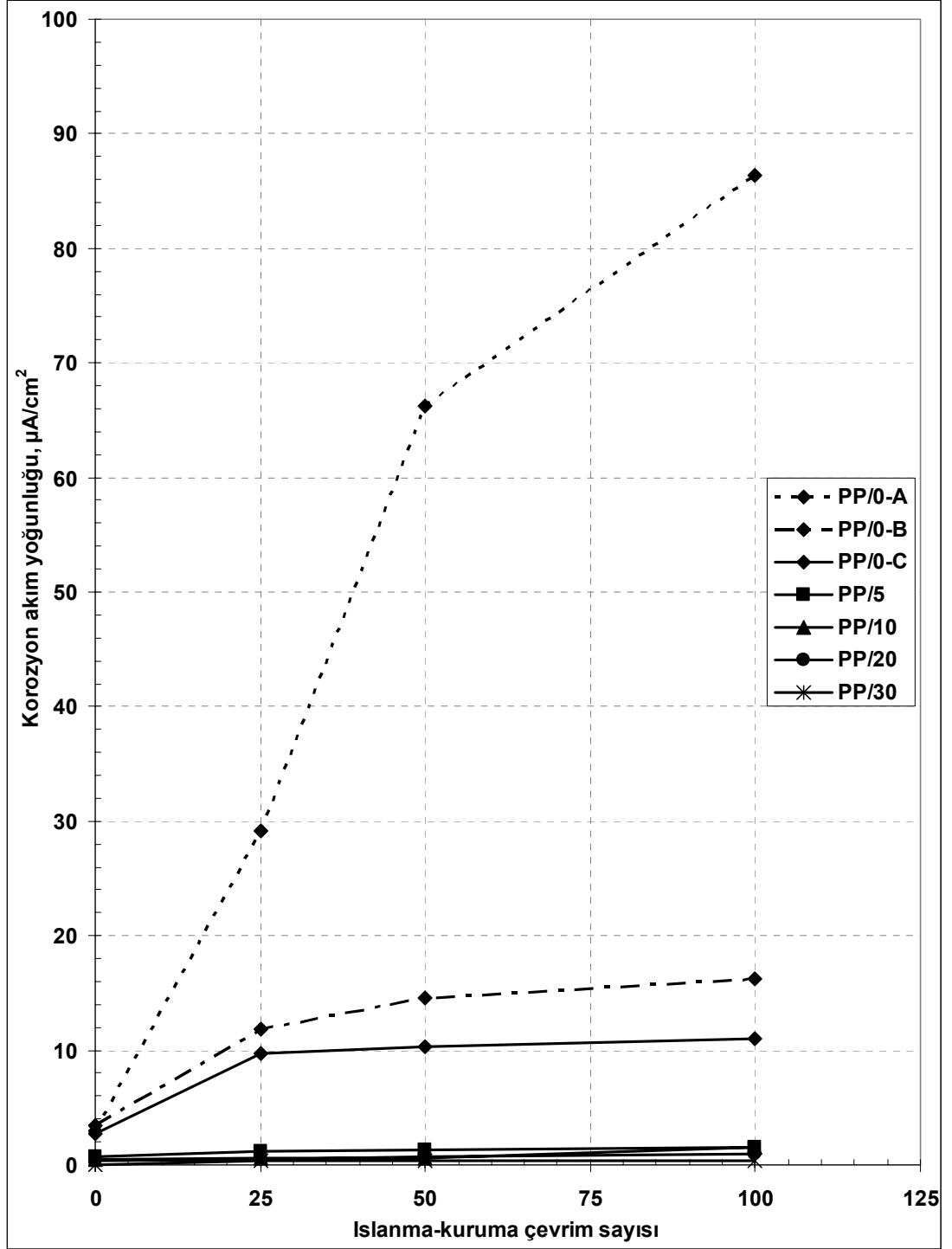
Çeşitli pas payı tabakası durumları için örneklerin ıslanma-kuruma çevrim sayılarına göre, elektrot potansiyeli değerleri Şekil 10.3'te sunulmuştur. Değerlerin tümü -270 mV değerinden daha negatif olup, ASTM C 876'ya göre aktif korozyon gelişimine işaret etmektedir. Potansiyel değerlerinde genel eğilim başlangıçta negatif yönde artış şeklindedir. Bu eğilim zamanla korozyon gelişiminde bir aktifleşmenin göstergesidir. Daha sonra ise belirli bir potansiyel değerinde sabitlenme görülmüştür. Korozyonun yaygın periyoduna geçtiği ikinci aşama olarak kabul edilebilir.



Şekil 10.3 Değişik paspayı tabakası kalınlığına sahip örneklerde NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre korozyon potansiyeli değerleri.

Paspayı tabakası bulunmayan örnekler en yüksek potansiyel değerlerini vermiştir. Bu durum korozyona en yüksek eğilim şeklindedir. Kalınlık arttıkça potansiyel değerlerinde gerileme söz konusudur. Bu eğilim de fiziksel korumanın bir yansımasıdır.

Fiziksel korumanın gerçek etkinliği korozyon hızı değerlerinde görölmektedir. Korozyon akım yoğunluğu değerlerinin paspayı tabakası kalınlığına ve ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre gelişimi Şekil 10.4'ten görölebilir.

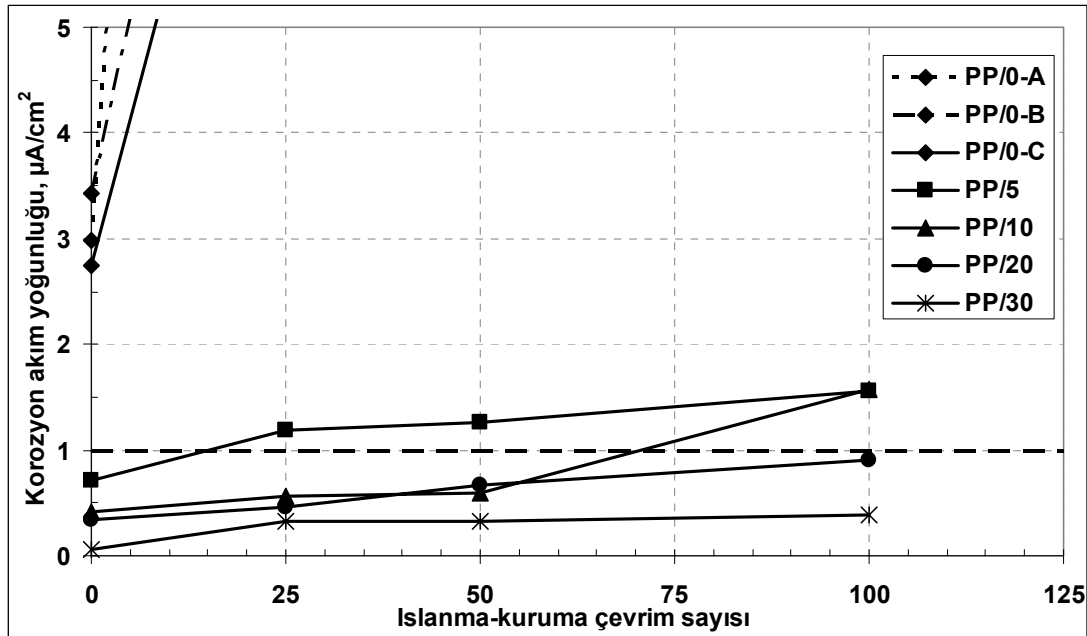


Şekil 10.4 Değişik pas payı tabakası kalınlığına sahip örneklerde NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre korozyon akım yoğunluğu değerleri.

Şekil 10.4'e bakıldığında pas payı tabakası oluşturulmuş örneklerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin, pas payı olmayanlara göre çok büyük farklılık arz ettiği görülmektedir. Bu durum ince bile olsa bir pas payı tabakasının teşkilinin önemini ortaya koymaktadır.

Diğer yandan paspayı tabakası olmayan seride üç grup karşılaştırıldığında ise, yine çarpıcı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Yüzeyi tamamen açık olan donatılarda 100 çevrimde korozyon akım yoğunluğu değeri $86,4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine ulaşmıştır. Eğilim sürekli artış şeklindedir. Donatı yüzeyi kısmen çimento şerbeti ile kaplanmış örneklerde 100 çevrimde $16,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değeri, tamamen çimento şerbeti ile örtülü örneklerde ise $11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değeri ölçülmüştür. Donatının yetersiz de olsa çimento şerbeti ile kaplanması bile karbonatlaşmaması halinde korozyon hızını sekizde bir oranında azaltabilmektedir.

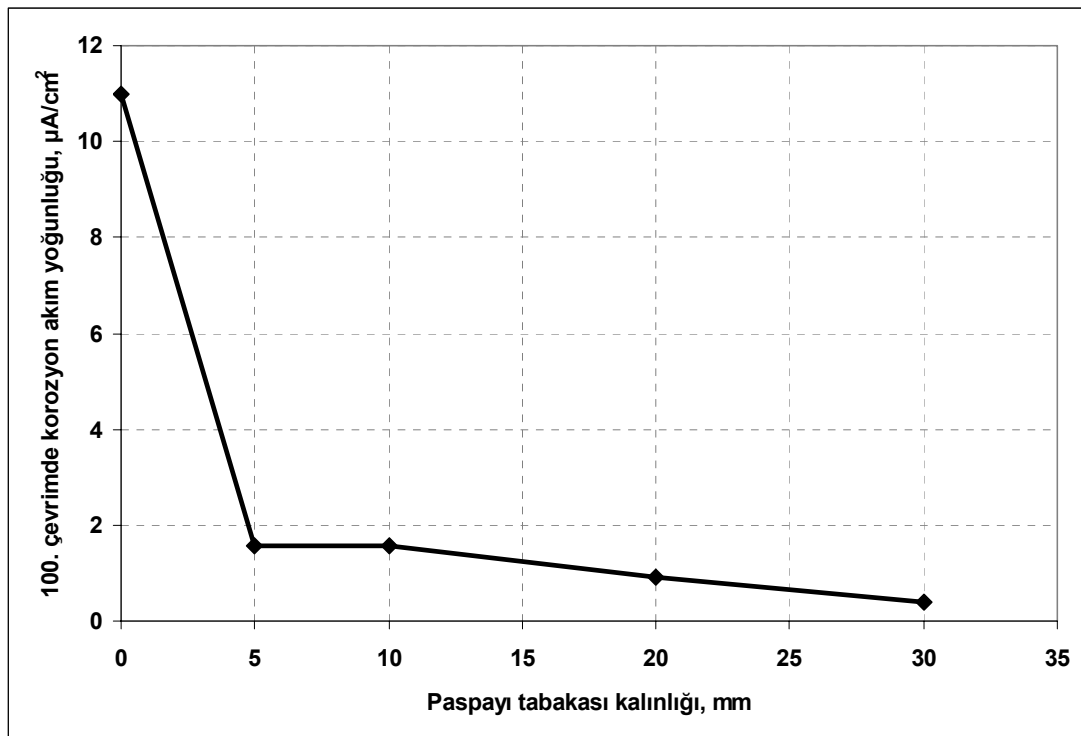
Şekil 10.4'teki 5, 10, 20 ve 30 mm paspayı tabakası kalınlığına sahip örnekleri daha iyi değerlendirebilmek amacı ile, aynı grafik küçültülmüş ölçekte Şekil 10.5'te tekrar verilmiştir.



Şekil 10.5 Değişik paspayı tabakası kalınlığına sahip örneklerde NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrim sayısına göre korozyon akım yoğunluğu değerleri.

Korozyon akım yoğunluğu için $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değeri yüksek korozyon hızı sınıflandırmasına girdiğine göre; 5 mm paspayı tabakası kalınlığına sahip örnekler, 25. çevrimden itibaren yüksek hızda korozyon gelişimine maruz kalmaktadır. Paspayı tabakası kalınlığı 10 mm olduğunda yüksek hızda korozyon için örneklerin 100 çevrim geçirmesi gereklidir. Diğer örneklerden 20 mm paspayı tabakası bulunan örnekler 100. çevrimde orta düzeyde ($0,5 - 1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), 30 mm paspayı tabakasına sahip örneklerde düşük düzeyde ($0,1-0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) korozyon gelişimi söz konusudur.

Korozif etkide 100. ıslanma-kuruma çevriminde elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin pas payı tabakası kalınlığına göre değişimi Şekil 10.6'da gösterilmiştir. Grafikte, pas payı tabakası bulunmayan örnekler için, yüzeyi tamamen çimento şerbeti ile kaplı örneklerden elde edilen değerler kullanılmıştır. Pas payı tabakası kalınlığı arttıkça korozyon akım yoğunluğu değerlerinin önemli bir şekilde azaldığı şekilden görülebilir.



Şekil 10.6 Pas payı tabakası kalınlığı ile korozif etkide 100. ıslanma-kuruma çevriminde elde edilen korozyon akım yoğunluğu değerlerinin değişimi.

10.2 Gözlemsel İncelemeler

Korozif ortam olarak seçilen %3,5 NaCl çözeltisinde 100 ıslanma-kuruma çevrimi sonunda değişik paspayı tabakası kalınlıklarına (5, 10, 20, 30 mm) sahip betonarme örneklerin görünüşleri Şekil 10.7'de verilmiştir.

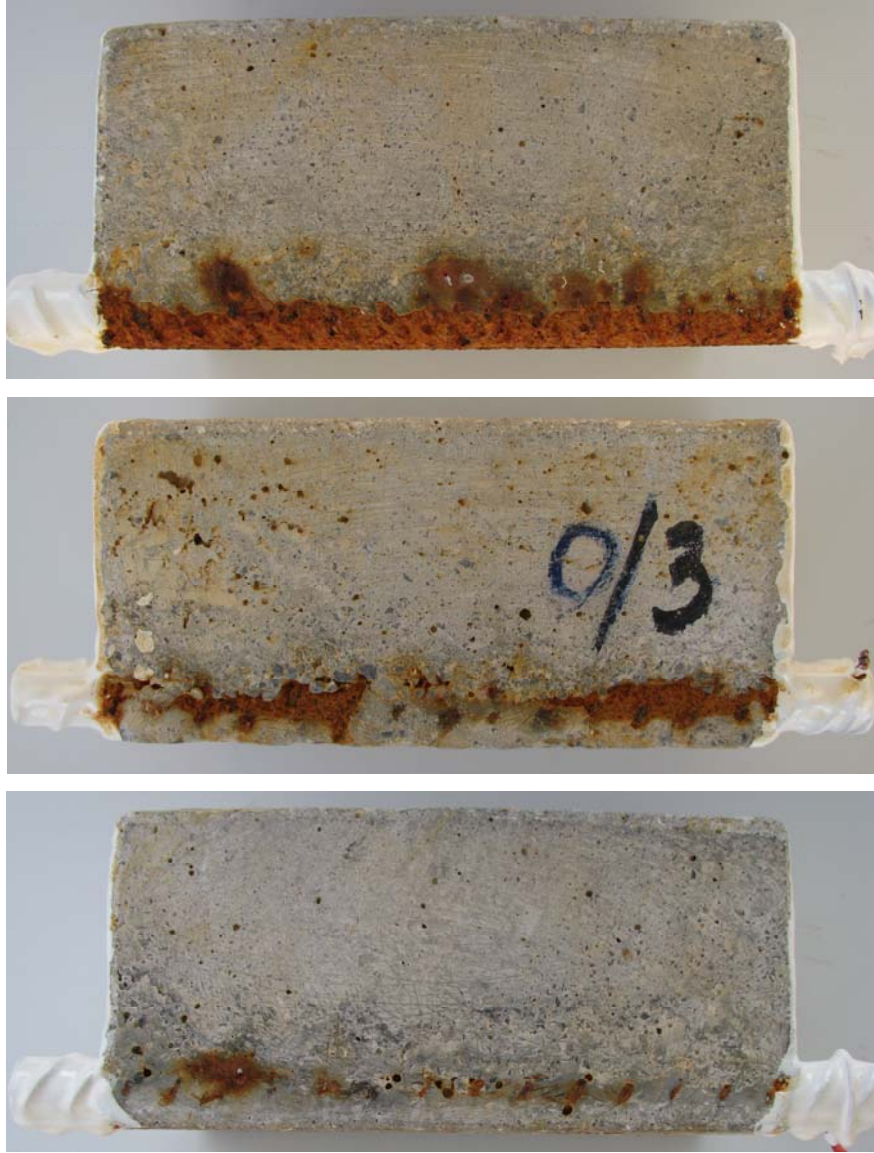
Paspayı oluşturmada üretilen üç farklı gruptaki (donatı tamamen açıkta, kısmen çimento şerbeti ile kaplı, tamamen çimento şerbeti ile kaplı) örneklerin ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası görünüşleri Şekil 10.8'de sunulmuştur.

Paspayı tabakası oluşturulmuş örneklerde ıslanma-kuruma çevrimleri sırasında önemli tahribat yok iken, paspayı bırakılmadan üretilmiş örneklerde ciddi hasarların oluştuğu görülmektedir.

Donatı yüzeyinde paspayı tabakası teşkil edilmeyip sadece çimento hamuru ile kaplanmış bile olsa donatıların 100 çevrim gibi kısa bir sürede nispeten korunduğu, buna karşın tamamen açıkta bırakılan donatılarda önemli kayıpların olduğu görülmektedir.



Şekil 10.7 Değişik paspayı tabakası kalınlığına (sıra ile 30, 20, 10 ve 5 mm) sahip örneklerin görünümü.



Şekil 10.8 Paspayı tabakası olmayan örneklerde farklı grupların görünümü.

Betonarme örnekler ıslanma-kuruma çevrimleri sonrasında kırılarak açılmış ve donatılarda gözlemsel incelemeler yapılmıştır. Klorür korozyonuna maruz betonarme donatılarında karakteristik özellik, lokal korozyon gelişimi ve çukurcuk korozyonu gelişimi şeklindedir. Özellikle ince paspayı tabakasına (5 mm) sahip örneklerde lokal ve çukurcuk korozyonu şeklinde gelişen hasarlar sırası ile Şekil 10.9 ve Şekil 10.10'da gösterilmiştir.

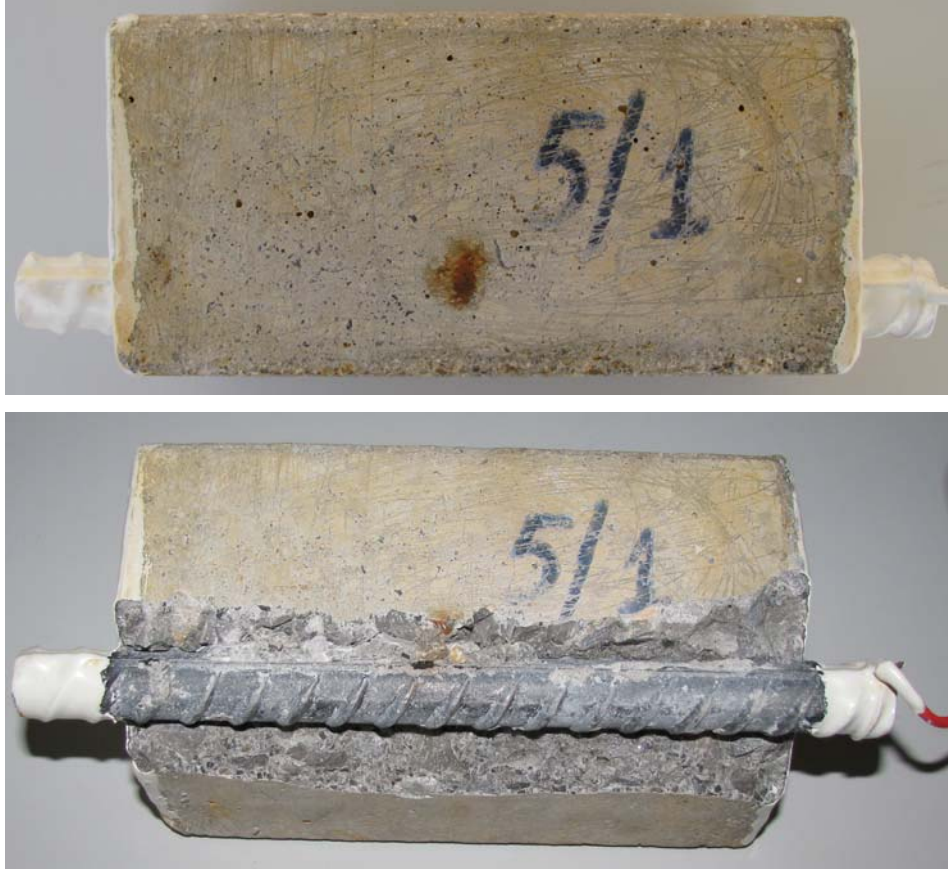


Şekil 10.9 Betonarme örneklerde klorür etkisi sebebiyle lokal korozyon gelişimi.



Şekil 10.10 Donatı yüzeyinde gelişen çukurcuk (pitting) korozyonu.

Korozyon reaksiyonları sonucu oluşan pas ürünlerinin hacminde büyük artışların olması 3. bölümde verilmişti. Oluşan pas ürünleri beton boşluklarını doldurarak yüzeye doğru sızarlar. Küçük paspayı tabakası oluşturacak şekilde üretilen numunelerde de benzer bir gözlem yapılmış ve örneklerin görünümü Şekil 10.11’de verilmiştir.



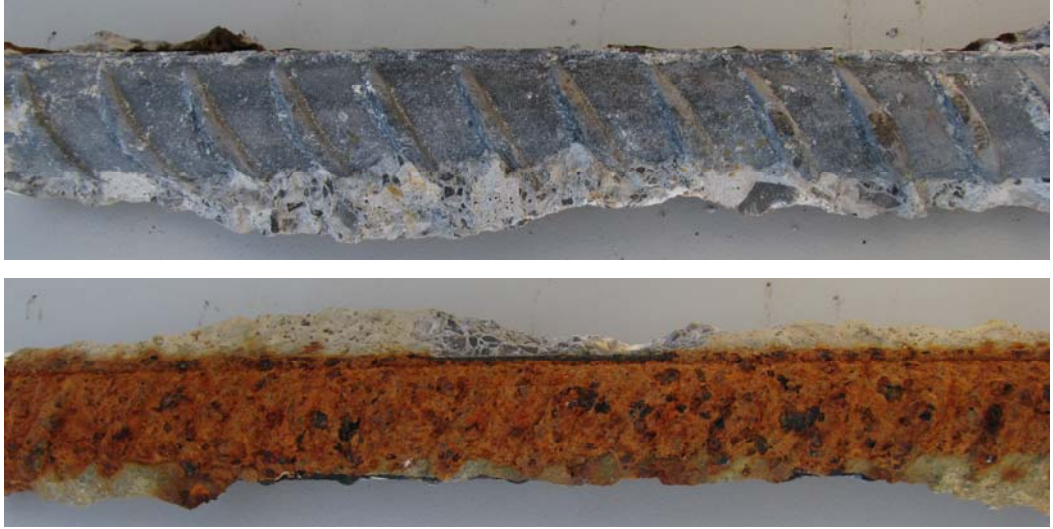
Şekil 10.11 Korozyon sonucu oluşan pas ürünlerinin paspayı tabakasını aşarak beton yüzeyinden çıkışı.

Lokal korozyon durumunda çelik donatının bir bölümü paslanarak malzeme kaybına uğrar. Diğer bölümleri ise korunur. Çelik donatılar üzerindeki beton tabakası açıldıktan sonra ve çelik donatı ASTM G1’de tarif edilen temizleme çözeltisi (Clarke çözeltisi olarak da bilinen) ile temizlendikten sonraki görünümleri Şekil 10.12’de verilmiştir.



Şekil 10.12 Lokal korozyon gelişimi ve çelik donatıda malzeme kaybı.

Herhangi bir paspayı teşkil edilmeden üretilen örneklerde dış kısımda kalan ve NaCl çözeltisi ile doğrudan temas eden donatı yüzeyi korozyon reaksiyonlarında anodik bölge olarak gelişmiş, beton ile kaplanmış bölge ise, korunumlu taraf olan katodik bölgeyi oluşturmuştur. Donatılar örnekten çıkarıldıktan sonra çekilen fotoğraflar Şekil 10.13’de gösterilmiştir.



Şekil 10.13 Paspayı olmayan örnekte ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası donatının arka ve ön yüzeyleri.

Bölüm 6’da belirtildiği gibi, betonarme örneklerin hazırlanması aşamasında beton prizmaların alt ve üst tabanlarından çıkan çelik donatılara, korozyon olayının sadece beton içerisinde gelişmesini sağlamak amacı ile kaplama yapılmıştır. Ayrıca, klorür etkisinin belirli bir paspayı bölgesini geçerek donatıya ulaşmasını sağlamak amacı ile prizma tabanları da kaplanmıştır. Ancak, yapılan bu epoksi kaplamanın bazı örneklerde sağlıklı uygulanamadığı ıslanma-kuruma etkisinde ortaya çıkmıştır. Hatalı uygulamalar Şekil 10.14’teki fotoğraflarda görülebilir.



Şekil 10.14 Epoksi kaplamanın sağlıklı yapılamadığı örneklerde istenmeyen korozyon gelişimi.

Epoksi kaplamada bulunabilen çok küçük delikler bile örneklerden alınan verilerin yanlış olmasına sebep olmaktadır. Bu şekilde yapılan ölçümlerde gerçekte olmayan daha yüksek korozyon gelişimi değerleri elde edilmektedir. Hatalı örneklerden elde edilen veriler değerlendirme dışı bırakılmıştır.

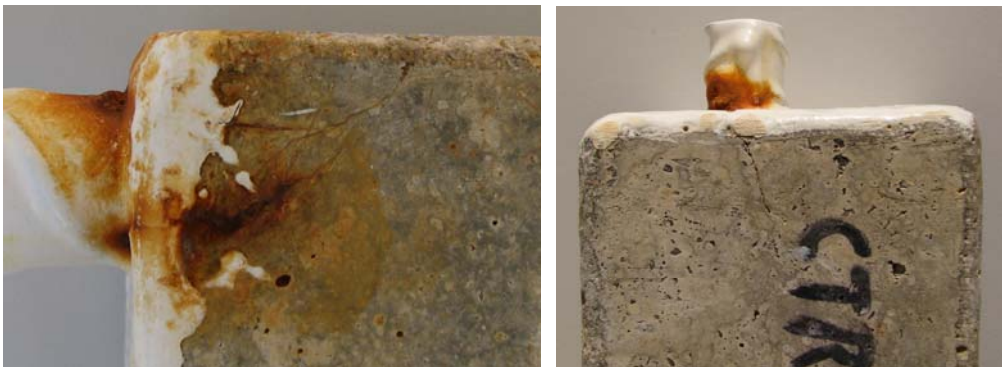
Göze görülemeyecek kadar küçük kusurların bile etkili olduğu bu ölçümlerde, hatalar eskitme sürecinde ortaya çıkmaktadır. Sağlıklı değerlendirmelerin yapılabilmesi için başlangıçta fazla sayıda ve çok dikkatli örnek hazırlanması gereklidir.

Yine hatalı şekilde epoksi kaplama yapılmış bir örneğin görünümü Şekil 10.15'te sunulmuştur. Bu numune de kaplamanın kusurlu bölgesinden içeri giren korozif sıvı, nispeten zayıf ve boşluklu olan donatı-beton ara yüzeyinde ilerleyerek tüm donatı boyunca hasara neden olmuştur.



Şekil 10.15 Epoksi kaplamadaki delik sebebi ile donatı-beton ara yüzeyine sızan klorür çözeltisinin oluşturduğu korozyon.

Belirli bir karakteristik göstermese de eskitme sürecinde sadece birkaç numunenin korozyon sebebi ile çatladığı görülmüştür (Şekil 10.16).



Şekil 10.16 Donatıdaki korozyon gelişimi sebebi ile betonda oluşan çatlakların görünümü.

Daha önce de belirtildiği gibi, donatılar beton içerisinde çıkarıldıktan sonra pas ürünleri ASTM G1’de tarif edilen temizleme çözeltisi ile temizlenmiştir. Bu çözelti genellikle Clarke Çözeltisi olarak da bilinir. Söz konusu temizleme çözeltisi, sıvı haldeki 1000 ml hidroklorik asit (HCl) ile toz haldeki 50 g kalay klorür (SnCl_2) ve 20 g antimon oksit (Sb_2O_3) karışımından elde edilmektedir. Donatıların iki ucundaki epoksi kaplı bölgeler ise, ancak döner tel fırça ile mekanik olarak temizlenebilmiştir.

Pas ürünlerinden temizlenmiş donatılar Şekil 10.17’de gösterilmiştir.



Şekil 10.17 Pas ürünleri ve beton kalıntılarından temizlenmiş donatıların görünümü (yukarıdan aşağıya sırası ile paspayı tabakası kalınlığı 0, 5, 10, 20 ve 30 mm).

10.3 Donatılarda Kütle Kayıpları

Bu bölümde korozyon sebebi ile elektrokimyasal ölçümlerden tahmin edilen kütle kayıpları ile gravimetrik olarak ölçülen kütle kayıplarının karşılaştırması yapılmıştır.

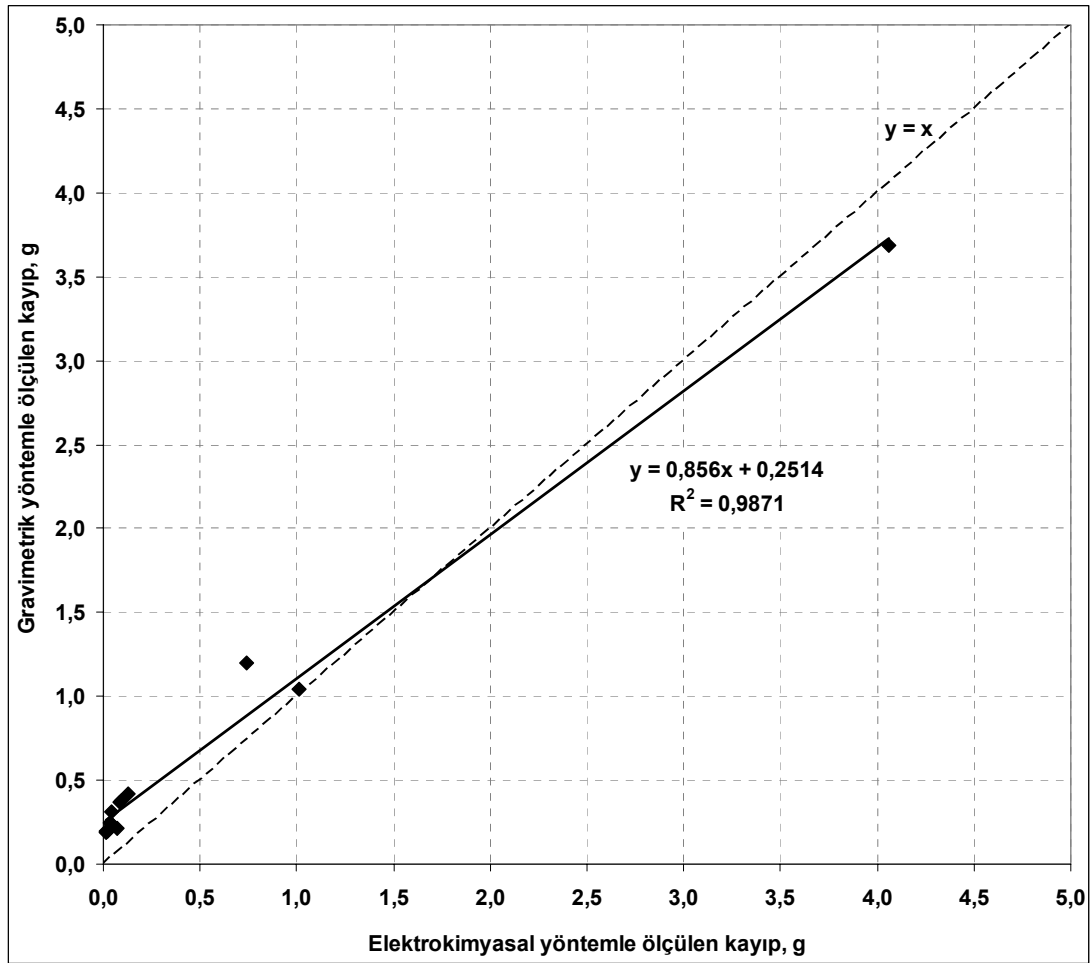
Betonarme örneklerin korozif ortamda eskitme süreci sırasında çeşitli zamanlarda korozyon hızı değerleri elektrokimyasal olarak ölçülmüştü. Bu değerler zamana göre integre edilerek süreç zarfındaki malzeme kayıpları hesaplanmıştır. Çelik donatıda elektrokimyasal olarak ölçülen kütle kaybı, tahmini bir değer olmaktadır.

Öte yandan, çelik donatılar beton içerisinden çıkarılıp donatı yüzeyindeki pas ürünleri ve beton kalıntıları temizlenmiştir. Örneklerin hazırlanma aşamasında hassas olarak tartılan donatılar, son aşamada temizleme işleminden sonra tekrar hassas bir şekilde tartılarak gravimetrik olarak ölçülen kütle kayıpları belirlenmiştir.

Elektrokimyasal yöntemle ölçülen kütle kayıpları ile gravimetrik yöntemle ölçülen kütle kayıplarının karşılaştırılması Şekil 10.18'de verilmiştir.

Grafikten de görülebileceği gibi, ölçümler sonucunda elektrokimyasal yöntemler ile tahmin edilen kütle kayıpları ile gravimetrik ölçümler ile bulunan kütle kayıpları arasında yüksek korelasyonlu bir ilişki tespit edilmiştir. Doğrusal olarak belirlenen bu ilişki, bire bir uyumu gösteren $y=x$ doğrusundan bir miktar sapmaktadır.

Elde edilen verilere göre, gerçekte yüksek dereceden kütle kayıpları söz konusu olduğunda, elektrokimyasal yöntem bu kayıpları bir miktar fazla şekilde tahmin edebilmektedir. Tersisi durumda, gerçekteki düşük kütle kayıpları ise elektrokimyasal olarak daha düşük tahmin edilmektedir.



Şekil 10.18 NaCl çözeltisinde 100 ıslanma-kuruma çevrimi sonunda elektrokimyasal olarak hesaplanan kütle kayıpları ile gravimetrik olarak ölçülen kütle kayıplarının karşılaştırılması (donatı çapı $\Phi=16$ mm, korozyon bölgesindeki donatı uzunluğu $L=160$ mm).

Tespit edilen ilişkinin tamamen doğrusal bir ilişki olması beklenirdi. Bir başka deyişle, formülde toplam şeklinde bulunan bir sabit öngörülmemiştir. Ancak, özellikle yüksek paspayı tabakasına sahip ve dolayısıyla düşük kütle kayıpları gösteren örneklerdeki donatıların temizlenmesi sırasında HCl etkisi ile bir kayıp söz konusu olduğu, bu sabit sayının (0,2514) da bu sebeple ortaya çıktığı düşünülmektedir.

Şekil 4.3'te lineer polarizasyon ölçümlerinden bulunan elektrokimyasal kayıplar ile gravimetrik kayıpların karşılaştırılması verilmiştir. Sözü edilen grafikte de bir doğrusal ilişki ortaya konmuş, ayrıca yeterli doğrulukta ölçüm yapılabildiği belirtilmiştir.

Sunulan çalışmada daha sağlıklı bir hata değerlendirmesi yapabilmek amacıyla, daha fazla sayıda örnek üzerinde ve daha uzun eskitme süreçlerinde elde edilen veriler ile değerlendirme yapılması önerilmektedir.

BÖLÜM ONBİR

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, betonarme yapılarda önemli derecede etkili olan klorid korozyonu gelişimi, beton bileşenleri ve beton üretim teknolojisi açısından ele alınmıştır. Betonda çeşitli mineral katkıların kullanımı, betona uygulanan kür yöntemi, korozyon açısından inhibitör ve epoksi yalıtım uygulamaları ile pas payı tabakasının kalınlığının betonarme yapılarda klorid korozyonu gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Korozif etkilerin ve ölçüm tekniklerinin sıkça incelendiği çalışmalarda beton bileşenleri açısından nadir sayıda çalışma mevcuttur. Daha önce yapılan çalışmalarda betona uygulanan kür yöntemi açısından korozyon gelişimi değerlendirilmemiştir. Sunulan çalışmanın bu ihtiyaçlara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Çeşitli elektrokimyasal yöntemlerin uygulama kriterlerinin literatürde tartışılması genellikle, zorlanmış potansiyel ve zorlanmış akım teknikleri uygulanan deney verileri üzerinden yapılmaktadır. Bu çalışmada ise, örneklere korozyon etki sürecinde herhangi bir zorlanmış akım veya potansiyel uygulaması yapılmamıştır. Örneklere hızlandırılmış ancak çok sayıda tekrarlı doğal eskitme süreci uygulanmıştır. Literatürde sıkça kullanılan zorlanmış yöntemlerin aksine, bu çalışmada örnekler çevresel ortamdan kaynaklanan klorür etkisine maruz bırakılmış ve serbest korozyon gelişimleri değerlendirilmiştir.

Korozyon gelişimlerinin değerlendirilmesi için uygulanan polarizasyon tekniğinin, literatürdeki bilgi birikimi oluşturma çalışmalarına destek olması umulmaktadır. Potansiyel taraması ile gerçekleştirilen anodik polarizasyon tekniği ile korozyon hızı değerlerinin ölçümü başarılı sonuçlar vermektedir.

Çalışmanın planlama aşamasında dikkate alınan bir diğer özellik, gerçek çaptaki donatılar ile nispeten büyük örnekler üzerinde çalışılmasıdır. Daha önceki çalışmalarda genellikle, küçük boyutlu harç örneklerin ve ince çaplı donatıların kullanımı tercih edilmiştir. Bu açıdan bakıldığında da çalışma sonuçlarının önem teşkil edeceği düşünülmektedir.

Bu tez kapsamında çeşitli aşamalardaki ayrıntıları ilgili bölümlerde sunulan deneysel çalışmalardan ulaşılan sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- Üç elektrotlu sistem ile anodik yönde potansiyel taraması yaparak kullanılan polarizasyon yöntemi, değişik betonarme örneklerde korozyon hızı değerlerinin tespit edilmesi için oldukça uygun sonuçlar vermektedir.
- Bazı düşük su/çimento oranına sahip numunelerde beklenenin aksine daha yüksek korozyon hızının ortaya çıkmasının sebebi olarak, işlenebilirliği çok düşük olan bu karışımlarda yetersiz sıkışma sonucu fiziksel korumanın etkin olmadığı düşünülmektedir. Geçirimsizliği yüksek olan betonlara gömülü donatılarda, beton basınç dayanımı değerleri yüksek olmasına rağmen, yüksek hızda korozyon gelişimleri gerçekleşebilmektedir.
- Zengin çimento içerikli karışımlarda fiziksel ve kimyasal koruma üst seviyededir. Buna karşılık çimento açısından zayıf karışımlarda gömülü donatı tam olarak hamurla sarılamadığından beton tarafından korunamamaktadır.
- Hızlı klor geçirimsizliği değerleri açısından bakıldığında, yüksek performanslı betonlarda geçirimsizlik değerleri normal betonlara kıyasla % 62–63 oranında daha azdır. Bu bulgu betonun azalan boşluk yapısının bir sonucudur. Çimento yerine %40 oranında uçucu kül kullanımı geçirimsizlik değerleri %57 oranında, %10 oranında silis dumanı kullanımı ise hızlı klor geçirimsizliği

değerlerini yaklaşık %81 mertebesinde azaltmıştır. Mineral katkı kullanımı, betonda boşluk miktarını azalttığı gibi, aynı zamanda betonun elektriksel rezistivitesini de arttırdığından daha düşük hızlı klor geçirimliliği sağlamaktadır.

- Hızlı klor geçirimliliği deneyi verileri ile klor penetrasyon derinliği deney verileri arasında iyi bir ilişki tespit edilmiştir. Elde edilen grafiğe göre hızlı klor iyon geçirimliliği değerleri klor penetrasyon derinliği değerlerinin karesi ile orantılıdır.
- Kirece doymuş suda bekleyen numunelerden elde edilen korozyon hızı değerlerinin tümü ihmal edilebilir ya da çok düşük düzeydedir. Bu durum korozif olmayan bu ortamda beklenen bir sonuçtur.
- Hızlandırılmış korozyon etkisinde başlangıç aşamalarında korozyon akım yoğunluğu değerleri çok düşük iken, çevrim sayısı arttıkça korozyon gelişimi de hızlanmıştır. Numunelere klor iyonu penetrasyonu arttıkça korozyon hızı değerleri de artış göstermiştir. Bu durum iki aşamalı korozyon modeli ile iyi bir uyum göstermektedir.
- Mineral katkı kullanımı korozif ortamda (NaCl ıslanma-kuruma) başlangıçta ve uzun dönemde korozyon akım yoğunluğu değerlerini azaltmıştır.
- İnhibitör kullanımı açısından bakıldığında, normal ve yüksek performanslı betonlarda inhibitör kullanımının korozyona olumlu etki yaptığı, kullanım dozajı açısından incelendiğinde ise, 10 lt/m³ kullanımının nispeten etkili olduğu, fazlasının pratik bir fayda sağlamadığı görülmüştür. Donatı korozyonu açısından, beton karışımlarında mineral katkı ile inhibitörlerin bir arada kullanımında çoğu olumsuz çelişkili sonuçlar söz konusudur. Bu konunun detaylı olarak araştırılması önerilmektedir.

- Korozyondan korunmak için en etkili yöntemin yalıtım olduğu, epoksi malzeme ile yalıtım yapılan numunelerde korozyon gelişiminin ihmal edilebilir düzeylerde geliştiği görülmüştür.
- Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun kullanım oranı ile kür yönteminin etkilerinin incelendiği aşamada, incelenen kür yöntemlerinin basınç dayanımı açısından yetersiz kaldığı, katkı dozajlarının artması ile kısa ve uzun dönemli dayanımların azaldığı tespit edilmiştir.
- Gerek uçucu kül gerekse yüksek fırın cürufu dozajı arttıkça hızlı klor geçirimsizliği değerleri önemli mertebede azalmaktadır. Değişen boşluk yapısı ve artan rezistivite bu olumlu davranışı sağlamaktadır.
- Havada bekleme ve %3,5 NaCl ortamında ıslanma-kuruma koşulları donatı derinliğindeki pH değerlerini 1 yıl içerisinde 0,5–0,7 birim azaltmaktadır. Havada bekleme koşulunda etkili mekanizma karbonatlaşma iken, tuzlu suda ıslanma-kuruma etkisinde klor iyonları pH değerlerini azaltmıştır.
- Uçucu kül veya yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıkça karbonatlaşma derinliği değerleri de artış göstermiştir. Yüksek mineral katkılı sistemlerin başlangıç pH değerleri nispeten daha düşük olduğundan, düşük pH'lı karbonatlaşma cephesi de daha kolay ilerleyebilmektedir. Diğer yandan, mineral katkı kullanımı ile çimentonun reaksiyon ürünü olan Ca(OH)_2 puzolanik reaksiyonlar ile tüketilmektedir. Sistemde karbonatlaşacak daha az kireç kaldığından, cephe daha çok ilerlemiştir.
- Kullanılan mineral katkı oranı arttıkça klor penetrasyon derinliğinin azaldığı görülmüştür.

- Havada ve suda bekleme koşullarında donatılı betonarme örneklerde korozyon gelişimleri görülmemiştir. Elektrot potansiyeli değerlerinin zaman içerisinde gelişimine bakıldığında, belirli negatif değerlerden daha pozitif değerlere doğru bir eğilim göze çarpmaktadır. Bu eğilim donatıların zaman içerisinde pasifleştiğinin ve daha kararlı bir hale geldiğinin bir göstergesidir.
- Herhangi bir kür işlemi yapılmayan örnekler ile buhar kürü uygulanmış örnekler, standart kür görmüş örneklere kıyasla daha boşluklu olduklarından klorür etkisine daha çabuk maruz kalmışlardır. Bu etki mineral katkı betonlar ile hazırlanmış örnekler için de geçerlidir. Hatta yüksek mineral katkı oranlarında yetersiz kür durumunda ilk çevrimde bile donatılar aktif korozyon bölgesinde bulunmaktadır.
- Kontrol betonu ile hazırlanmış örneklere bakıldığında başlangıç aşamasında ihmal edilebilir ve düşük hızlarda gelişen korozyon olayının, 200. çevrimden itibaren orta ve yüksek korozyon hızı seviyelerine çıktığı görülmektedir.
- Mineral katkı kullanımının korozyon gelişimini yavaşlattığı görülmektedir. Standart kür ve buhar kürü uygulaması söz konusu olduğunda, çimento yerine %45 UK kullanım oranına kadar, kürsüz durumda ise %30'a kadar UK kullanımı korozyon gelişimleri yavaşlatmaktadır. Yüksek fırın cürufu için tüm kür yöntemlerinde optimum oran %30'dur. Optimum değerlerden daha yüksek kullanım durumunda artan gözeneklilik nedeni ile korozyon gelişimleri tekrar artmaktadır.
- Paspayı tabakası bulunmayan örnekler en yüksek potansiyel değerlerini vermiştir. Bu durum korozyona en yüksek eğilim şeklindedir. Kalınlık arttıkça potansiyel değerlerinde gerileme söz konusudur. Bu eğilim de fiziksel korumanın bir yansımasıdır.

- Pas payı tabakası oluşturulmuş örneklerde korozyon akım yoğunluğu değerlerinin, pas payı olmayanlara göre çok büyük farklılık arz ettiği görülmektedir. Bu durum ince bile olsa bir pas payı tabakasının teşkilinin önemini ortaya koymaktadır.
- Epoksi kaplamada bulunabilen çok küçük delikler bile örneklerden alınan verilerin yanlış olmasına sebep olmaktadır. Bu şekilde yapılan ölçümlerde gerçekte olmayan daha yüksek korozyon gelişimi değerleri elde edilmektedir. Hatalı örneklerden elde edilen veriler değerlendirme dışı bırakılmalıdır.
- Ölçümler sonucunda elektrokimyasal yöntemler ile tahmin edilen kütle kayıpları ile gravimetrik ölçümler ile bulunan kütle kayıpları arasında yüksek korelasyonlu bir ilişki tespit edilmiştir. Doğrusal olarak belirlenen bu ilişki, bire bir uyumu gösteren $y=x$ doğrusundan bir miktar sapmaktadır. Elde edilen verilere göre, gerçekte yüksek dereceden kütle kayıpları söz konusu olduğunda, elektrokimyasal yöntem bu kayıpları bir miktar fazla şekilde tahmin edebilmektedir. Ters durumda, gerçekteki düşük kütle kayıpları ise elektrokimyasal olarak daha düşük tahmin edilmektedir.
- Klorür korozyonuna maruz betonarme donatılarında karakteristik özellik, lokal korozyon gelişimi ve çukurcuk korozyonu gelişimi şeklindedir.
- Toz numune ile pH ölçümlerinde bir miktar hata yapılmaktadır. Örneğin karbonatlaşmış bölümlerinden alınan toz ile pH değeri 11-11,5 bulunmaktadır. Oysa fenolftalein $pH>8,5$ te renk değiştirmektedir. Bunun sebebinin kırılarak üretilmiş toz numunelerde jelin çözünerek pH'ı arttırması olduğu düşünülmektedir.
- Fiziksel koruma kimyasal korumaya göre oldukça etkilidir. Gerek mineral katkıları ile azaltılan geçirimsizlik, gerekse paspayı kalınlığının artışı ile sağlanan koruma korozyon performansı açısından çok daha yararlıdır.

- Özellikle şiddetli derecede karbonatlaşma etkisine maruz kalacak betonarme yapılarda yüksek oranda mineral katkı kullanılmamalıdır. Karbonatlaşma açısından kür yöntemine dikkat edilmelidir. Yetersiz kür sonucu karbonatlaşma çok daha hızlı gerçekleşmektedir.
- Klorür etkisine maruz kalacak betonarme yapılarda ise mineral katkı kullanımını donatı korozyonu açısından olumlu davranış göstermektedir. Ancak uygulanacak kür yönteminin yeterliliğine dikkat edilmelidir.
- İki aşamalı (başlangıç periyodu ve yayınma periyodu) korozyon modeli uygun sonuçlar vermektedir. Etkinin sürekli olması nedeni ile, geçiş aşamasında süreksizlik gösteren bu model yerine parabolik bir model geliştirilebilir.

Bu çalışmada örneklerde korozyon gelişimi sağlamak amacıyla uygulanan hızlandırılmış doğal eskitme süreci oldukça şiddetli bir etki oluşturmuştur. Klorid korozyonu açısından bu şiddetli etki ile gerçek hayattaki korozif etkinin ilişkilendirilmesi betonarme inşaat süreçlerine daha sağlıklı öneriler sağlayabilecektir.

Sunulan çalışma kapsamında beton bileşenleri ve beton üretim teknolojileri açısından klorid kaynaklı korozyon incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Karbonatlaşma ve asit etkisi gibi diğer korozif etkiler bu çalışma kapsamında incelenmemiştir. Ayrıca, betonarme elemanların aynı anda birden fazla korozif etkiye maruz kalması, donatılardaki korozyon gelişimini beklenenden daha fazla arttırabilmektedir. Bu konu üzerinde ek çalışmaların yapılması yararlı olacaktır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda korozif etkiye maruz bırakılan betonarme örneklerde herhangi bir yük veya gerilme uygulaması yapılmamıştır. Donatılarda gerilme altında çok daha şiddetli korozyon gelişimi göstereceği tahmin edilmesine

karşın, mertebelerin belirlenebilmesi için gerilmeli korozyon üzerinde araştırma çalışmaları hayata geçirilmelidir.

Korozyon olayının önlenmesi veya geciktirilebilmesi için yüksek performanslı malzeme geliştirme çalışmalarına daima önem verilmelidir.

KAYNAKLAR

ACI 222.3R-03 (2003). Design and construction practices to mitigate corrosion of reinforcement in concrete structures. *Manual of Concrete Practice*. American Concrete Institute.

ACI 222R-01 (2001). Protection of metals in concrete against corrosion. *Manual of Concrete Practice*. American Concrete Institute.

ACI 222R-96 (1997). Corrosion of metals in concrete. *Manual of Concrete Practice*. American Concrete Institute.

Alonso, C., Andrade, C. & Gonzales, J.A. (1988). Relation between concrete resistivity and corrosion rate of the reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. *Cement and Concrete Research*, 18 (5), 687-698.

Al-Tayyib, A.J., Khan, M.S., Allam, I.M. & Al-Mana, A.I. (1990). Corrosion behaviour of pre-rusted bars after placement in concrete. *Cement and Concrete Research*, 20 (6), 955-960.

Ampadu, K.O., Torii, K. (2002). Chloride ingress and steel corrosion in cement mortars incorporating low-quality fly ashes. *Cement and Concrete Research*, 32, 893-901.

Andrade, C. & Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, 10 (5), 315-328.

- Andrade, C. & Alonso, C. (2001). On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, 15, 141-145.
- Andrade, C. & Alonso, M.C. (2004), Values of corrosion rate of steel in concrete to predict service life of concrete structures, In Gustavo Cragolino, Narasi Sridhar (Eds) *ASTM Symposium on Application of Accelerated Corrosion Tests to Service Life Prediction of Materials*, 282-295, American Society for testing and Materials. PA.
- Andrade, C. & Gonzales, J. A. (1978). Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements. *Werkstoffe und Korrosion*, 29, 515-519.
- Andrade, C., Alonso, C. & Gonzales, J.A. (1990). An initial effort to use corrosion rate measurements for estimating rebar durability. In *Corrosion rates of steel in concrete*. ASTM Special Technical Publications –1065. Editors: Berke/Chaker/Whiting. 200 p. American Society for testing and Materials. PA.
- Andrade, C., Alonso, C. & Molina, F.J. (1993). Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I - Experimental test. *Materials and Structures*, 26, 453-464.
- Andrade, C., Alonso, C. & Sarria, J. (2002). Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere. *Cement and Concrete Composites*, 24, 55-64.
- Andrade, C., Alonso, C., Arteaga, A. & Tanner, P. (2000). Methodology based on the electrical resistivity for the calculation of reinforcement service life. *Fifth CANMET / ACI International Conference on Durability of Concrete*, Barcelona, Spain.

Apostolopoulos, C. A., Papadopoulos, M. P. & Pantelakis, S.G. (2006). Tensile behavior of corroded reinforcing steel bars BSt500s. *Construction and Building Materials*, 20, 782-789.

ASM Metals Handbook, Volume 13-Corrosion, 9th edition.

ASTM C876-91 (2004) Test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02, 11-16. American Society for Testing and Materials. PA.

ASTM G1-03 (2004) Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02, 17-25. American Society for Testing and Materials. PA.

ASTM G109-99a (2004). Standard test method for determining the effects of chemical admixtures on the corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposed to chloride environments. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02, 492-496. American Society for Testing and Materials. PA.

ASTM G15-04 (2004). Standard terminology relating to corrosion and corrosion testing. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02, 72-76. American Society for Testing and Materials. PA.

ASTM G5-94 (2004) Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02, 60-71. American Society for Testing and Materials. PA.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)* (1. Baskı). İzmir: D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları.

- Basheer, P.A.M., Gilleece, P.R.V., Long, A.E., Mc Carter, W.J. (2002). Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. *Cement and Concrete Composites*, 24, 437-449.
- Batis, G. & Routoulas T. (1999). Steel rebars corrosion investigation with strain gages. *Cement and Concrete Composites*, 21, 163-171.
- Bäumel, A. (1959). The effect of additives on the corrosion behavior of steel in concrete. *Zement-Kalk-Gips*.
- Benjamin, S.E., Khalid, F.A., Khan, R.A. (2000). Performance of steel in ordinary Portland, fly ash and slag cement mortars during the hydration period. *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 383-388
- Böhni, H. (2005). *Corrosion in Reinforced Concrete Structures*. Woodhead Publishing, Limited. 262 p.
- Broomfield, J. P., Davies, K. & Hladky, K. (2002). The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 24, 27-34.
- Broomfield, J.P. (2003). *Corrosion of steel in Concrete-understanding, investigation and repair*. Taylor & Francis e-Library.
- Chalee, W., Teekavanit, M., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., Jaturapitakkul 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.

- Dawson, J.L., Farrell, D.M., Aylolt, P.J. & Hadky, K. (1989). Corrosion monitoring using electrochemical noise measurement. *NACE, Corrosion 89*, New Orleans, paper 31.
- Dehwah, H.A.F., Maslehuddin, M., Austin S.A., (2002). Long-term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes, *Cement and Concrete Composites*, 24, 17– 25.
- Dhouibi-Hachani, L., Raharinaivo, A. Triki, E. & Fiaud, C. (1994) Assessing the corrosion of rebars in concrete deteriorated by sulfates and carbonation. *Int. Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*. Ed. R.N. Swamy, Sheffield, July 1994, 258-267.
- Elsener, B. (2002). Macrocell corrosion of steel in concrete implications for corrosion monitoring. *Cement And Concrete Composites*, 24, 65-72.
- Elsener, B., Böhni, H. (1994). Galvanostatic pulse measurements. Rapid on-site corrosion monitoring. *Int. Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*. Ed. R.N. Swamy, Sheffield, July 1994, 236-246.
- Elsener, B., Klinghoffer, O., Frolund, T., Rislund, E., Schiegg, Y. & Böhni, H. (1997). Assessment of reinforcement corrosion by means of galvanostatic pulse technique. *Proceedings from Int. Conf. "Repair of Concrete Structures"*, Svolve, Norway.
- Feliu, S., Gonzales, J.A. (1988). On-site determination of the polarization resistance in a reinforced concrete beam. *Corrosion*, 44 (10), 761-765.
- Gonzales, J.A., Andreade, C., Alonso, C. & Feliu, S. (1995). Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 257-264.

- Gonzales, J.A., Molina, A., Escudero, M.L. & Andreade, C.(1985). Errors in the electrochemical evaluation of very small corrosion rates. Part I. Polarization resistance method applied to corrosion of steel in concrete. *Corrosion Science*, 25, 917-930.
- Güneyisi, E., Özturan, T., Gesoğlu M. (2006) Performance of plain and blended cement concretes against corrosion cracking. In *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, ed: M.S. Konsta-Gdoutos, 189–198. Springer. Netherlands.
- 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.
- Hansen, C.M. & Sorenson, B. (1990). Threshold concentration of chloride in concrete for the initiation of reinforcement corrosion. In *Corrosion rates of steel in concrete*. ASTM Special Technical Publications - 1065. Editors: Berke/Chaker/Whiting. 200 p. American Society for Testing and Materials. PA.
- Huang, R. & Yang, C. C. (1997). Condition assessment of reinforced concrete beams relative to reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Composites*, 19, 131-137.
- Husain, A., Al-Bahar, S., AbdulSalam, S. & Al-Shamali, O. (2004). Accelerated AC impedance testing for prequalification of marine construction materials. *Desalination*, 165, 377-384.
- Hussain Rasheeduzzafar, S.E. (1994). Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete. *ACI Materials Journal*, 91, 264-272.

- Hussain Rasheeduzzafar, S.E., Al-Musallam, A., Al-Gahtani, A.S. (1995). Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete, *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1543–1555.
- John, D.G., Coote AT., Treadaway, K.W.J. & Dawson, J.L. (1983). Repair of concrete – A laboratory and exposure site investigation. In A.P. Crane, (Ed.). *Corrosion of reinforcement in concrete construction* (263-286). London: Halsted Press.
- John, G., Searson, P. & Dawson, J. (1981), *Brit. Corros. J.*, 16 (2), 102-106.
- Joiret, S., Keddani, M., Novoa, X.R., Perez, M.C., Rangel, C. & Takenouti, H. (2002). Use of EIS, Ring – Disk Electrode, EQCM and Raman Spectroscopy to study the film of oxides formed on iron in 1M NaOH. *Cement and Concrete Composites*, 24, 7-15.
- Kaesche, H. (1959). Testing corrosion danger of steel reinforcement due to admixtures in concrete. *Zement-Kalk-Gips*.
- Kayali, O., Zhu, B. (2005). Chloride induced reinforcement corrosion in lightweight aggregate high-strength fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 19, 327-336.
- Khalaf, F. M. & Wilson, J.G. (1999). Electrical properties of freshly mixed concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11, 242-248.
- Lemoine, L., Wenger, F. & Galland, J. (1990). Corrosion rates of steel in concrete. ASTM STP-1065, eds N.S. Berke, V. Chaker, D. Whiting, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 118-133.

- Loveday, D., Peterson P. & Rodgers B. (2004). Evaluation of organic coatings with electrochemical impedance spectroscopy - Part I: Fundamentals of electrochemical impedance spectroscopy. *JCT Coatings Tech*, 1 (8), 46-52
- Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M. M., Abdulguddus, S.U.A., Rehman, S. & Ahsan, S.N. (2002). Effect of steel manufacturing process and atmospheric corrosion on the corrosion resistance of steel bars in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24, 151-158.
- Molina, F.J., Andrade, C. & Alonso, C. (1993). Cover cracking as a function of bar corrosion: Part II - Numerical model. *Materials and Structures*, 26, 532-548.
- Montemar, M. F., Cunha, M. P., Ferreira, M. G. & Simoes, A. M. (2002). Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbondioxide and chlorides. *Cement and Concrete Composites*, 24, 45-53.
- NACE, (2002) Glossary of corrosion related terms. *Nace International*, item no: 26012
- Newton, C.J. & Sykes, J.M. (1988). A galvanostatic pulse technique for investigation of steel corrosion in concrete. *Corrosion Science*, 28, 1051-1074.
- Papadopoulos, M. P., Apostolopoulos, C. A., Alexopoulos, N. D. & Pantelakis, S.G. (2007). Effect of salt spray corrosion exposure on the mechanical performance of different technical class reinforcing steel bars. *Materials and Design*, volume 28, issue 8, 2318-2328.
- 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.

- Pourbaix, M. (1973). *Lectures on electrochemical corrosion*. New York: Plenum Press. p.271
- Proverbio, E. & Cigna, R. (1995). Influence of rebar surface condition on polarization resistance measurements in concrete structures. *Materials Science Forum*, 192-194: 877-882.
- Rasheeduzzafar, X., Al-Saadoun, S.S., Al-Gahtani, A.S., Dakhil, F.H. (1990). Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete, *Cement and Concrete Research*, 20, 723– 738.
- Reddy, B., Glass, G.K., Lim, P.J., Buenfeld, N.R. (2002). On the corrosion risk presented by chloride bond in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24, 1-5.
- Rodriguez, J., Ortega, L.M., Garcia, A.M., Johansson, L.M. & Petterson, O.K. (1994). International Conference on Concrete Across Borders, Odense, Denmark, Vol.1, 215-226.
- Saricimen, H., Mohammad, M., Quddus, A., Shameem, M., Barry, M.S. (2002). Effectiveness of concrete inhibitors in retarding rebar corrosion. *Cement and Concrete Composites*, 24, 89-100.
- 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.
- Suryavanshi, A.K., Scantlebury, J.D., Lyon, S.B. (1995). The binding of chloride ions by sulphate resistant portland cement. *Cement and Concrete Research*, 25 (3) 581–592.

- Suryavanshi, A.K., Scantlebury, J.D., Lyon, S.B. (1998). Corrosion of reinforcement steel embedded in high water–cement ratio concrete contaminated with chloride. *Cement and Concrete Composites*, 20, 263– 381.
- Thangavel, K. & Rengaswamy, N. S. (1998). Relationship between chloride / hydroxide ratio and corrosion rate of steel in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 20, 283-292.
- Thomas M.D.A, Matthews, J.D. (2004). Performance of pfa concrete in a marine environment – 10 year result. *Cement and Concrete Composites*, 26 (1), 5-20.
- TS 708 (1996). Beton çelik çubukları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS-EN 206-1 (2002). Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Venkatesan, P., Palaniswamy, N. & Rajagopal, K. (2006). Corrosion performance of coated reinforcing bars embedded in concrete and exposed to natural marine environment. *Progress in Organic Coatings*, 56, 8-12.
- 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. & Kim, E. (2005). An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 35, 1391-1399.
- Yiğiter, H., Yazıcı, H., Aydın, S. (2007) Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete. *Building and Environment*, 42, 1770–1776.

Yüzer, N. (1998). Silis dumanı katkılı betonarme elemanlara klorür etkisinin hızlandırılmış korozyon deneyi ile araştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayım Merkezi, İstanbul.

Zivica, V. (2003). Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbondioxide. *Bulletin of Materials Science*, 26 (6), 605-608.

EKLER

EK-1: SEMBOL LİSTESİ

a	: elektrot aralığı
A	: numune alanı
AC	: alternatif akım
B	: polarizasyon sabiti
c	: kapasitans
CE	: karşıt elektrot
CR	: korozyon hızı
CSE	: bakır-bakırsülfat elektrodu
d	: yoğunluk
DC	: doğru akım
E	: potansiyel
E_{corr}	: korozyon potansiyeli
EIS	: elektrokimyasal impedans spektroskopisi
E_{oc}	: açık devre potansiyeli
E_{pass}	: pasivasyon potansiyeli
F	: Faraday sabiti (96500 coulomb)
I	: akım
I_{corr}	: korozyon akımı
I_{galv}	: galvanik akım
i_{corr}	: korozyon akım yoğunluğu
j	: sanal birim ($\sqrt{-1}$)
K	: korozyon hızı sabiti (3272 mm/A.cm.yıl)
L_{crit}	: akımın ulaşacağı kritik uzunluk
P_{maks}	: maksimum çukurcuk derinliği
P_{ort}	: ortalama penetrasyon derinliği
R_e	: elektrolit ohmik direnci

R_p	: polarizasyon direnci
R_{papp}	: görünür polarizasyon direnci
R_T	: transfer direnci
SCE	: doygun kalomel elektrot
SHE	: standart hidrojen elektrodu
t	: zaman
w	: açısal frekans
W_m	: moleküler ağırlık
z	: değerlik
Z	: impedans
β_a	: anodik Tafel sabiti
β_c	: katodik Tafel sabiti
ΔE	: potansiyel farkı
ΔI	: akım farkı
ΔW	: ağırlık kaybı
ρ	: elektriksel direnç