

**SİLİS DUMANI KATKISININ BETONARME ÇELİĞİ
KOROZYONUNA ETKİSİ**

Aykut DEĞİRMENCİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2006
ANKARA**

Aykut DEĞİRMENCİ tarafından hazırlanan SİLİS DUMANI KATKISININ BETONARME ÇELİĞİ KOROZYONUNA ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Tülin KIYAK

2. Danışman

Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

1. Danışman

Bu çalışma, jürimiz tarafından Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa TOKYAY

Üye : Prof. Dr. Metin ARSLAN

Üye : Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ

Üye : Doç. Dr. Tülin KIYAK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

Tarih : 27.09.2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Aykut DEĞİRMENCİ

**SİLİS DUMANI KATKISININ BETONARME ÇELİĞİ
KOROZYONUNA ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Aykut DEĞİRMENCİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2006

ÖZET

Bu çalışmada silis dumanı (SD) katkısının betonarme çeliği korozyonuna etkisi araştırılmıştır.

Bu amaçla SD, PÇ 42,5 çimentosuna ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15'i yerine ikame edilerek kullanılmıştır. 7, 28 ve 90 günde betonun basınç dayanımını belirlemek için 100 mm'lik standart küp numuneler, elektrokimyasal korozyon ölçümleri için de 50x100 mm'lik özel silindir betonarme numuneler üretilmiştir.

Betonarme çeliği korozyonunu ölçmek için üç elektrotlu sistem kullanılmıştır. Akım potansiyel gürültü ölçüm teknikleri, betonarme çeliği korozyonu için uyarlanmış, ayrıca tahribatlı ve tahribatsız ölçüm yöntemleri ile yaşlandırma yapılarak betonarme çeliği korozyonu belirlenmiştir.

Basınç dayanımı deneyi sonucunda SD miktarı arttığında genel olarak betonların basınç dayanımları da artmaktadır. SD katkısı betonarme çeliği korozyonu üzerinde birbirine zıt yönde iki farklı etkide bulunmaktadır. SD betonun porozitesini azaltarak çeşitli korozif maddelerin çevreden çelik yüzeyine difüzyon hızını kısıtlamasına rağmen, çelik yüzeyinde kendisinin temas ettiği bölgelerde korozyon direncini düşürerek, özellikle lokalize korozyonu hızlandırmaktadır. Bu sonuca, hem SD içindeki yüksek değerlikli demir

bileşiklerinin çelik üzerindeki korozif etkisinin ve lokal bölgelerde pH düşmesinin, hem de betonun kompozit özelliğindeki artışın yol açtığı önerilmiştir.

Bilim Kodu : 714.1.143
Anahtar Kelimeler : Puzolan, silis dumanı, korozyon, betonarme çelik, üç elektrot sistemi, polarizasyon
Sayfa Adedi : 89
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. H.Yılmaz ARUNTAŞ
: Doç. Dr. Tülin KIYAK

EFFECT OF SILICA FUME ADDITION ON REINFORCING STEEL BAR CORROSION

(M. Sc. Thesis)

Aykut DEĞİRMENÇİ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

September 2006

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the effects of silica fume (SF) addition on the reinforcing steel bar corrosion.

For this purpose, SF was applied to PC 42,5 cement by replacement for 5%, 10% and 15% in weight. To determine the compressive strength of concrete at the 7, 28 and 90 days, standard cube samples of 100 mm were prepared, while special cylindrical reinforced concrete samples of 50x100 mm were used in measurements of electrochemical corrosion.

A three-electrode system was used to measure the corrosion in reinforcing steel bars. The current/potential noise measuring methods were adapted to the reinforcing steel bar corrosion, and the reinforcing steel bar corrosion was determined by means of aging through the damaged and undamaged measuring methods.

The compressive strength test reveals that the compressive strength of concretes usually increases with the increasing SF amount. SF addition has two controversial effects on the reinforcing steel bar corrosion. Though it limits the diffusion rate of various corrosive substances on to the steel surface as a result of the decreased concrete porosity, it reduces the corrosion strength at its

contact areas on the steel surface, so that particularly the localized corrosion is accelerated. This could be attributed both to the corrosive effects of the high value ferric compounds in SF and locally pH drop, and also to the increase in composite characteristics of the concrete.

Scientific Code : 714.1.143
Keywords : Pozzolan, silica fume, corrosion, reinforcing steel bar, three-electrode system, polarization
Number of Pages : 89
Thesis Supervisors : Assoc. Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
Assoc. Prof. Dr. Tülin KIYAK

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca bilgi, tecrübe, öneri ve yönlendirmeleriyle göstermiş oldukları yardım ve anlayışlarından dolayı danışmanlarım, Doç. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ'a ve kendisinden korozyon konusunda çok şey öğrendiğim Doç. Dr. Tülin KIYAK'a, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü öğretim üyelerinden Prof. Dr. Metin ARSLAN, Prof. Dr. M. Haluk ÇELİK, Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK ve Yrd. Doç. Dr. Hanifi TOKGÖZ'e, araştırma görevlilerinden Mustafa DAYI, Gökhan DURMUŞ ve Ömer CAN'a, bilgi alışverişi yaptığım Mustafa SEMİZ'e, çimento ve agregaların temininden dolayı Set Beton yetkililerine, betonarme çeliklerin temininden dolayı da Samsun Yeşilyurt Demir Çekme San. Tic. Ltd. Şti'ne, kimya laboratuvarındaki çalışma arkadaşlarıma, ayrıca hayatım boyunca her türlü destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Agregalar	3
2.1.1. Agregaların özellikleri	5
2.1.2. Agregaların fiziksel özellikleri.....	5
2.1.3. Agregaların mekanik özellikleri.....	5
2.1.4. Agregaların kompasitesi.....	6
2.2. Çimento	6
2.2.1. Çimento çeşitleri	8
2.2.2. Portland çimentosu (PÇ)	8
2.2.3. Çimento dayanım sınıfları.....	9
2.3. Su	10
2.4. Katkılar.....	12

Sayfa

2.4.1. Kimyasal katkılar	12
2.4.2. Mineral katkılar (puzolanlar)	13
2.5. Silis Dumanı	13
2.5.1. Silis dumanının fiziksel özellikleri	19
2.5.2. Silis dumanı ile ilgili standartlar	22
2.6. Betonarme Çelik Çubukları.....	23
2.7. Çeliğin Korozyonu	24
2.8. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonu	26
2.9. Korozyon ve Çeşitleri	28
2.9.1. Genel korozyon	28
2.9.2. Galvanik korozyon	28
2.9.3. Aralık korozyonu	30
2.9.4. Çukur korozyonu.....	32
2.9.5. Kabuk altı korozyon.....	33
2.9.6. Filiform korozyon	33
2.9.7. Seçimli korozyon	34
2.9.8. Taneler arası korozyon.....	35
2.9.9. Erozyonlu Korozyon	36
2.9.10. Kavitasyon (oyuk hasarları)	37
2.9.11. Gerilmeli korozyon çatlaması (stres korozyon)	38
2.9.12. Yorulmalı korozyon	38
2.9.13. Hidrojen kırılganlığı.....	39
2.9.14. Kaçak akım korozyonu	39

Sayfa

2.9.15. Mikrobiyolojik korozyon	40
2.10. Korozyon Ölçüm Yöntemleri.....	41
2.10.1. Tafel ekstrapolasyon yöntemi	41
2.10.2. Çizgisel polarizasyon (polarizasyon direnci) yöntemi.....	43
2.10.3. Potansiyodinamik metodu	45
2.10.4. Dönüşümlü polarizasyon.....	45
2.10.5. Galvanik eşleşme	47
2.10.6. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (eis)	47
2.11. Kaynak Araştırması.....	48
3. MATERYAL VE METOT	51
3.1. Materyal	51
3.1.1. Çimento	51
3.1.2. Agregat	51
3.1.3. Karışım suyu	51
3.1.4. Silis Dumanı.....	53
3.1.5. Betonarme çelik (çalışma elektrotu)	54
3.2. Metot	55
3.2.1. Basınç dayanımları için numune üretimi	56
3.2.2. Basınç dayanımı deneyi	59
3.2.3. Elektrokimyasal ölçümler için numune üretimi	57
3.2.4. Betonarme çeliğinde elektrokimyasal korozyon belirlemede temel prensip	59

Sayfa

3.2.5. Betonarme eliğinde elektrokimyasal korozyon parametrelerinin belirlenmesinde üç elektrotlu ölçüm teknikleri (galvanostatik, potansiyostatik, potansiyodinamik yöntemler)	60
3.2.6. Deney çalışmalarında kullanılan cihaz ve ekipmanlar.....	61
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIşMA	63
4.1. Basınç Dayanımları	63
4.2. Elektrokimyasal Bulgular.....	64
4.2.1. SD katkılı betonarme numunelerin sulu ortamdaki korozyonunun tahribatsız elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi	65
4.2.2. Kimyasal evresi değişen betonarme numunelerin korozyon özelliklerinin tahribatsız elektrokimyasal yöntemlerle incelenmesi	73
4.2.3. SD'nin betonarme çeliği korozyonuna etkisinin tahribatlı elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi: aşır polarizasyon etkisi.....	77
4.2.4. Betonsuz elik korozyonu üzerine silis dumanın doğrudan etkisi	80
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
KAYNAKLAR	85
ZGEMİş	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Agrega tane çapının en büyük değerleri	4
Çizelge 2.2. Çimento dayanım sınıfları.....	9
Çizelge 2.3. Suların zararlılık dereceleri için sınır değerleri	10
Çizelge 2.4. SD' nin karşılaştırıldığı materyaller	19
Çizelge 2.5. Harç ve betonda kullanılacak SD konusunda bazı standartlar.....	23
Çizelge 3.1. Çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri	52
Çizelge 3.2. Agregaların fiziksel özellikleri	52
Çizelge 3.3. Kullanılan agreganın tane dağılımı	53
Çizelge 3.4. SD' nin kimyasal bileşimi.....	54
Çizelge 3.5. Deneylerde kullanılan betonarme çeliğin kimyasal bileşimi	55
Çizelge 3.6. Üretilen betonların malzeme miktarları (1 m ³ için).....	56
Çizelge 4.1. Basınç dayanımı deneyi sonuçları	63
Çizelge 4.2. %3,5 NaCl ortamında farklı betonarme numunelerine ait çeliklerin polarizasyonları sonucunda oluşan elektrokimyasal ve diğer fiziksel parametrelerin beton cinsine göre değişimleri	79
Çizelge 4.3. Farklı ortamlarda bekletilen ve polarize edilen betonsuz çeliklerde üç elektrotlu sistem ile gürültü ölçüm tekniği ve polarizasyon eğrilerine göre elde edilen elektrokimyasal parametreler.....	79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ferrosilisyum üretim şeması ve baca tozlarının toplanması	15
Şekil 2.2. Silikoferrokrom ve ferrokrom üretim şeması	16
Şekil 2.3. Beton içindeki donatının korozyonu ve passivasyon tabakasının oluşumu	27
Şekil 2.4. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri.....	42
Şekil 2.5. Polarizasyon direnç yöntemiyle korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi	44
Şekil 2.6. Geri dönüşümlü polarizasyon eğrisi	46
Şekil 3.1. Kullanılan agreganın tane dağılımı eğrisi	53
Şekil 3.2. Kullanılan betonarme çeliğin boyutları	55
Şekil 3.3. Betonarme çeliğinin beton içindeki durumu.....	58
Şekil 3.4. Bir betonarme numunesinde, çeliğin korozyon özelliklerini belirleyen bölgelerin şematik gösterimi	59
Şekil 3.5. Çözeltideki çeliğin korozyon özelliklerinin incelendiği üç elektrotlu sistem	61
Şekil 3.6. Karşı elektrot.....	62
Şekil 4.1. Basınç dayanımlarının günlere göre değişimi.....	63
Şekil 4.2. %3,5 NaCl ortamında elektrokimyasal denge sağlandıktan sonra 195 gün suda (A), 10 gün rutubetli hava ortamında (B) bekletilen farklı çimento türleri içeren betonarme numunelerin üç elektrotlu düzeneğe (Resim 3.3) ve standart doygun kalomel elektroda (SCE) karşı değişik zamanlarda elde edilen açık devre potansiyellerinin (ADP, Yarı Hücre Potansiyeli) zamana göre dağılımları	66
Şekil 4.3. Şekil 4.2 koşullarında tahribatsız elektrokimyasal yöntemle elde edilen korozyon potansiyeli ortalamalarının (a), korozyon potansiyel farklarının (b) günlere göre değişimi	67

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Şekil 4.2'deki potansiyel verilerinin elektrokimyasal gürültü ölçüm tekniğine göre düzenlenmiş hali (a); PÇ 42,5, (b); %5 SD, (c); %10 SD (d); %15 SD	69
Şekil 4.5. Şekil 4.2'de verilen koşullarda, farklı numunelerin tuzlu suda 195 gün bekleme süresi içinde betonarme çeliklerin gösterdiği tüm korozyon potansiyel değer dağılımının örnek cinsine göre değişimi	71
Şekil 4.6. Şekil 4.2'de verilen koşullarda, farklı numunelerin tuzlu suda 195 gün bekleme süresi içinde betonarme çeliklerin gösterdiği tüm korozyon akımı değerleri dağılımının örnek cinsine göre değişimi	72
Şekil 4.7. Şekil 4.2'de verilen koşullarda, farklı numunelerin tuzlu suda 195 gün bekleme süresi içinde betonarme çeliklerin gösterdiği tüm polarizasyon dirençleri (korozyon direnci, Rp) dağılımının örnek cinsine göre değişimi	72
Şekil 4.8. 195 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılarak çevre değiştiren numunelere ait sudaki ve havadaki korozyon potansiyel dağılımlarının toplu olarak gösterilmesi	73
Şekil 4.9. 195 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılarak çevre değiştiren numunelere ait sudaki ve havadaki polarizasyon dirençlerinin dağılımlarının toplu olarak gösterilmesi	74
Şekil 4.10. 195 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılarak çevre değiştiren numunelere ait sudaki ve havadaki korozyon akımlarının (korozyon hızı ile doğru orantılı olan) dağılımlarının toplu olarak gösterilmesi	74
Şekil 4.11. Aynı numune gruplarının farklı sürelerde ve farklı ortamlarda beklemesi sonucunda elde edilen Rp değerlerinin çimento türüne göre değişim ve dağılımları (a) Sudaki 92. günde; (b) sudaki 195. günde; (c) sudan çıkarıldıktan 10 gün sonra	76
Şekil 4.12. Aynı numune gruplarının bekleme süresi ve ortama göre korozyona uğrama eğilimlerinin beraber değerlendirilmesi	76

Şekil**Sayfa**

- Şekil 4.13. Çeşitli betonarme numunelerin tuzlu su ve havada bekletildikten sonra üç elektrotlu sistemde -1.3 V ile +0,2 V arasında 3mV/sn tarama hızı ile elde edilen katodik anodik polarizasyon eğrilerinin oluşturduğu potansiyel duvarı grafiği (a1): Katodik düşük polarizasyon bölgesi ,(b1): Katodik aşırı polarizasyon bölgesi (a2): Anodik düşük polarizasyon bölgesi ,(b2): Anodik aşırı polarizasyon bölgesi.....78
- Şekil 4.14. Betonsuz çeliklerde potansiyel gürültü genliklerinin ortamdaki SD miktarına bağlı değişimi80
- Şekil 4.15. Betonsuz çeliklerde akım gürültü genliklerinin silis dumanı miktarına bağlı değişimi.....81
- Şekil 4.16. Çeşitli süspansiyon çözeltilerinin -1,3 V ile +0,2 V arasında 3 mV/sn tarama hızı ile elde edilen katodik anodik polarizasyon eğrilerinin oluşturduğu potansiyel duvarı grafiği.....82

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Betonarme çeliğinde korozyon	1
Resim 3.1. Betonarme numune üretimi için hazırlanan kalıp düzeneği	58
Resim 3.2. Üretilen betonarme numuneler	58
Resim 3.3. Betonarme çeliği korozyonunu belirlemek için kullanılan üç elektrotlu sistem	60
Resim 3.4. Referans elektrot	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

μ	Mikron
μA	Mikroamper
μV	Mikrovolt
A	Amper
$^{\circ}C$	Sıcaklık, santigrad derece
E_{cor}	Korozyon potansiyeli
F	Kırılma anında ulaşılan en büyük yük
f_c	Basınç dayanımı (Mpa)
i_{cor}	Korozyon akımı
kV	Kilo volt
mA	Miliamper
mm	Milimetre
MPa	Mega paskal
mV	Milivolt
N	Newton, kg.m/s ²
Pa	Paskal
Rp	Polarizasyon direnci
sn	Saniye
V	Volt

Kısaltmalar

Açıklama

ADP	Açık Devre Potansiyeli
PÇ	Portland Çimentosu
PKÇ	Portland Kompoze Çimento

Kısaltmalar**Açıklama****SA**

Süper Akışkanlaştırıcı

SCE

Standart Kalomel Elektrot

SD

Silis Dumanı

TS

Türk Standardı

1. GİRİŞ

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin uygun oranlarda karıştırılması ile başlangıçta plastik kıvamlı olup zamanla çimentonun hidratasyonu sonucu katılaşp sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir [1]. Bu yapı malzemesini oluşturan temel malzemelerin bileşimlerinin çok karmaşık olması, betonun özelliklerini yakından ilgilendirmekte düzenli ve sürekli araştırmaların yapılmasını gerektirmektedir [2].

Betonun çekme ve eğilme gerilmeleri karşısında çatlayıp kırılmasını önleyebilmek için, çekme gerilmelerine maruz kalacak bölgelerine (örneğin, beton kirişlerin tabanına yakın bir konuma) çelik çubuklar yerleştirilmektedir. Çelik ve beton arasında iyi bir aderans olduğu takdirde, bu iki malzeme tek bir malzeme gibi davranış göstermektedir. Çekme dayanımı yüksek olan çelik çubuklar, çekme dayanımı düşük olan betonu takviye etmektedir [3].

Yapılarda yaygın olarak kullanılan ve çok önemli görevi olan çelik donatı, zamanla paslanma da denilen korozyon olayı ile karşı karşıya kalabilmektedir [3].

Korozyon, metallerin değişik etkenler sonucu çevreleriyle girdiği kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu doğal durumlarına geri dönme eğilimiyle metalik özelliklerini kaybetme süreci olarak açıklanabilir [4-7]. (Resim 1.1)



Resim 2.1. Betonarme çeliğinde korozyon

Ülkemizde endüstriyel atıklardan silis dumanı (SD), uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve diğer doğal puzolanlar mineral katkı maddesi olarak bilinirler. Harç ve beton üretiminde genellikle ikincil bağlayıcı madde olarak Portland çimentosunun ağırlıkça yüzdesi oranında, çimentonun bir kısmı yerine veya ilaveli olarak bazen de çimentoya önceden karıştırılarak katkılı çimento şeklinde kullanılmaktadır [8].

SD'nin beton özellikleri üzerinde sağladığı olumlu katkı yanında ekonomik ve ekolojik yararları da göz ardı edilemez. Çimentodan yaklaşık 100 kat daha ince olan SD çimento hamurundaki mikro boşlukları ve agrega-çimento ara yüzeyini doldurarak bir taraftan fiziksel ve mekanik özellikleri iyileştirerek betonun mukavemetini ve geçirimsizliğini artırırken, diğer taraftan içerdiği aktif silis sayesinde hidrasyon üzerinde kalsiyum hidroksiti bağlayarak betonun kimyasal dayanıklılığını artırmaktadır. Kimyasal dayanıklılıktaki artış, SD'nin puzolanik reaksiyonu sonucu kalsiyum silikat jeli (CSH-jeli) halinde suda çözünmez bir yapıya dönüşmesine bağlanır [9-11].

Atmosfer etkisinde kalan demir yüzeyinde oluşan korozyon ürününün hacmi, içerdiği demirin 1-6 katı kadardır. Bu hacim artışı betonarme elemanda donatıda meydana gelirse, gevrek bir malzeme olan beton örtüde çeliğe paralel çatlaklar oluşur. Parça atmalara kadar varan hasarlar sonucunda açığa çıkan donatılardaki korozyon, atmosfer etkileri ile hızlanır. Betonun donatıyı korozyona karşı koruyan bir malzeme olduğu bilinmesine karşın, yüksek performanslı beton üretiminde dünyada yaygın olarak kullanılan ve ülkemizde de kullanımı son yıllarda yaygınlaşan SD katkılı betonun donatı korozyonuna etkileri açıkça ortaya konmamıştır. Ayrıca, donatı korozyonuna etki eden önemli parametrelerden biri olan Cl iyonlarının da SD ile birlikte donatı korozyonuna etkisi açık değildir [12].

Bu çalışmanın amacı; yüksek performanslı beton üretiminde belirli oranlarda kullanılması literatürce de uygun görülmüş SD katkısının, betonarme çeliği korozyonuna etkisini sulu ve değişken ortamlarda incelemek ve betonarme çeliğinin korozyon özelliklerini belirlemek için yeni yöntemler önermektir.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Beton, kum, çakıl veya kırma taş ve çimentonun bir araya gelmesi ile meydana gelen bir yapı malzemesidir. Çimento, kum ve iri agrega tanelerini birbirine bağlar. Kum ise iri agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun kompazitesini artırır [13].

2.1. Agrega

Betonun ana iskeletini oluşturan, toplam hacmin yaklaşık % 60-80 oranlarında yer işgal eden mineral kökenli, taneli malzeme, agrega olarak isimlendirilir. Agregalar elde edilmesine göre doğal ve yapay agrega olarak ikiye ayrılır. Betonda kullanılacak agregaların bazı özelliklere sahip olması gereklidir. Agrega; suyun etkisi altında yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentonun bileşenleri ile birlikte zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir [13].

Agregalar, yeryüzünde oluşturduğu kütlelerin özelliklerini taşırlar. Bu da bazı sorunlar meydana getirir. Bu sorunları:

- ✓ Yeterli mekanik dayanıma sahip olmamak, dağılabilir olması nedeniyle don etkisine dayanıksızlık,
- ✓ Su karşısında kararsız oluşları nedeniyle şişip hacim genişlemesine yol açmak,
- ✓ Sülfat etkisine neden olmak,
- ✓ Bazı kimyasal reaksiyonlarda betona hasar verme eğilimi göstermek şeklinde sıralanabilir.

Agregaların kalitesi, yüksek dayanımlı betonu (YDB) direkt olarak etkilediği için çimento kalitesi kadar önemlidir. Araştırmalar, agregaların standartlarda konmuş kriterlere uymasının yeterli olmayabileceğini vurgulayarak YDB' de şu amaçlara yönelik özellik aranmasını tavsiye etmektedirler [13].

- ✓ mümkün olan en düşük s/ç oranı,
- ✓ yeterli yerleştirme kolaylığı,
- ✓ aderans gerilmelerini alabilecek yeterli yüzey alanı.

Özet olarak agregada şilt ve kil kirliliği olmaması, maksimum tane çapının SA kullanılmadığında 10-16 mm, SA kullanıldığında 25 mm alınması, iyi bir aderans için kırma taş agregası kullanılması, şekli bozuk tanelerin % 5'i geçmemesi, düşük s/ç oranlı karışımlarda bir miktar su emen agregası seçilmesi, kaba agregası mekanik özelliklerinin yeterli düzeyde olması, ince agregası olarak düşük s/ç oranları için kaba kum, yüksek dozda SA kullanılacaksa ince bir kum kullanabileceği belirtilmiştir. Diğer taraftan agregası tane çapının (D_{mak}) büyük olması, genel olarak betonda iri tanelerin fazla bulunduğunu gösterir. Bu durum agregası için gerekli su miktarının azalmasına neden olur. Şu halde tane çapı büyük olan agregalar kullanılarak üretilen betonların kompazitesi büyük olacak ve ayrıca bunlar az miktarda suya ihtiyaç gösterecektir. Böylece bunlardan dolayı agregası tane çapı büyük olan betonların mukavemetinde önemli bir artış sağlanacaktır. Yalnız mukavemetin yüksek olmasını sağlamak için agregası çapının artırılması yönünde fazla ilerlemek, bu karakteristiğin işlenebilirlik özelliğini azaltması bakımından elverişli değildir. Bir betonda aranan işlenebilirlik özelliği ise yapı koşullarına bağlı bulunmamaktadır. Bu durumda betonun maksimum agregası çapı, yapı durumunun izin verdiği en büyük değer olmalıdır Çizelge 2.1'de yapı cinsine göre en büyük agregası tane çapları görülmektedir [13].

Çizelge 2.1. Agregası tane çapının en büyük değerleri [13].

Yapının cinsi	D_{mak} (mm)
Betonarme	16-32
Yol ve hava meydanları inşaatı	63-90
Barajlar	90-250

Mak. tane çapı 1" ya da 32 mm olan betonlarda 1/2" veya 16 mm'den büyük agregası miktarı, toplam agregasının % 15-20'si arasında sınırlandırılır. Yapılan uygulamalarda

kaliteli kırma taş çakıllı betonlar, doğal çakıl kullanılarak yapılan betonlardan daha iyi sonuçlar vermiştir [13].

2.1.1. Agregaların özellikleri

İyi bir beton üretimi için agregalarda bulunması gereken koşullar şunlardır:

- ✓ Sağlam olmalı, aşınmamalı, suyun etkisiyle yumuşamamalı, dağılmamalı,
- ✓ Çimento bileşenleriyle zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemeli,
- ✓ Tanelerin biçimi, dokusu iyi olmalı,
- ✓ Tanelerin büyüklük bakımından dağılımı, amaca ve standartlara uygun olmalı,
- ✓ Agregada içinde zararlı maddeler bulunmamalıdır [13].

2.1.2. Agregaların fiziksel özellikleri

Agregaların fiziksel özellikleri denildiğinde başlıca şu özellikler ön plana çıkar; birim ağırlığı, özgül ağırlığı, kompasitesi, boşluk oranı, agreganın su emme kapasitesi ve mevcut rutubet durumu, donma-çözülme ve diğer fiziksel etkilere karşı dayanıklılık. Agreganın fiziki sağlamlığı, agreganın kökeni, boyutları, taneler içerisindeki boşlukları toplam hacmi ve bu boşlukların sürekliliği ile ilgilidir [13].

2.1.3. Agregaların mekanik özellikleri

Agregalarda aranılan en önemli özelliklerden biri, mekanik mukavemetlerinin bunların içinde özellikle basınç mukavemetinin yüksek olmasıdır.

Basınç Mukavemeti: Basınç mukavemetinin, malzemenin porozitesi ile yakın ilişkisi vardır. Porozitenin küçük olması, agreganın mukavemetini artırır. Agreganın jeolojik bakımdan durumu bize mekanik mukavemeti ile ilgili kuvvetli fikirler verir. Betonda kullanılacak agreganın basınç dayanımının en az 600 kgf/cm² olması istenir [13].

Aşınma dayanımı: Yol ve hava meydanlarındaki beton, çarpma ve aşınma etkisi altındadır. Betonun bu etkilere dayanabilmesi için, yapımında kullanılan iri agreganın aşınmaya ve çarpmaya karşı yüksek mukavemete sahip olması gerekir.

Çarpmaya dayanıklılığı: Betonun çarpmaya dayanıklı olmasında, kullanılan agreganın önemli etkisi vardır. Bu nedenle kullanılmadan önce kontrol edilmelidir [13].

2.1.4. Agregaların kompasitesi

Agreganın kompasitesi ile birim hacimdeki agregada tanelerin işgal ettiği hacmin toplamı anlaşılmaktadır. Agreganın kompasitesi, özgül ve birim ağırlıkları kullanılarak hesaplanabilir.

Agregaların kompasitesinin küçük olması, şu zararları meydana getirir;

- ✓ Üretilen betonun kompasitesi ve mukavemeti düşük olur,
- ✓ Kullanılan çimento miktarı artar,
- ✓ Betonun maliyeti yükselir,
- ✓ Kusurlu malzeme miktarı artar. Bu da işlenebilme özelliğine etki yaparak mukavemetin düşmesine neden olur,
- ✓ Dış etkilere karşı dayanıklılık azalır [13].

2.2. Çimento

Beton oluşumunda en büyük rolü üstlenen elemanlardan birisi de çimentodur. Çimentonun mineralojik yapısı, betonun bileşimin üzerinde etkilidir. Çimentonun üretimi sırasında asit ve bazik öğeler birbirleriyle birleşerek portland çimentolarının dört ana bileşenini oluştururlar. Bunlar;

2 CaO. SiO ₂	Dikalsiyum Silikat (C ₂ S)
3 CaO.SiO ₂	Trikalsiyum Silikat (C ₃ S)
3 CaO.Al ₂ O ₃	Trikalsiyum Alüminat (C ₃ A)
4 CaO.Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	Tetrakalsiyum Alümino-Ferit (C ₄ AF)

Silikatlar, çimentonun dayanımını sağlayan esas bileşenlerini oluşturarak hidrasyon sonunda kalsiyum silikat hidrat (CSH) ile sönmüş kireç Ca (OH)₂ meydana getirirler. Ca (OH)₂'in varlığı istenmez çünkü, su içinde çözülerek yerinin boş kalmasına neden olur, beton dayanımını ve dayanıklılığını azaltır. Diğer bileşenler C₃A ve C₄AF' de benzer davranış gösterirler. Ancak C₃A'nın etkileri daha belirgindir. Özellikle çimentonun kimyasal etkilere karşı dayanıklılığını bu bileşen yönlendirir. Çimentoda prize ilk başlayan bileşen, C₃A' dır. Süratle priz yapar ve hidrasyon ısısının yükselmesine neden olur [13].

Çimentonun prize başlama süresi, 1 saatten az 10 saatten fazla olmamalıdır. Çimento dozajı, agreganın granülometri bileşimi ile yakından ilgilidir. Genel olarak agrega karışımında ince tanelerin miktarı fazla ise çimento miktarı büyük olmalıdır [13].

Çimento miktarının minimum değeri, agrega içindeki bütün boşlukları doldurmaya olanak sağlamalıdır. Çimento dozajı belirli bir değeri geçtikten sonra çekme mukavemetinin çimento dozajı ile birlikte artması ya çok azalmakta veya tamamen ortadan kalkmaktadır. Beton içindeki çimento miktarının gereğinden fazla veya az olması, bazı teknik olumsuzlukları meydana getirir. Beton içindeki gereğinden fazla olan çimento, rötre, sünmeye, yüzeysel ve kılcal çatlamlara neden olmaktadır. Beton içindeki çimento miktarı öyle ayarlanmalıdır ki, agrega taneleri arasında birbiriyle bağıntılı boşluk en az düzeyde olmalıdır. Çimento tanesi ne kadar ince ise mukavemeti ve su geçirmezliği o kadar yüksektir. Betonda kullanılacak çimento hamuru, su kusmayacak veya terlemeyecek özellikte olmalıdır. Harç ve betonda su geçirmezliği sağlaması ve dayanım yönünden istenilen özelliklerindendir [13].

Çimentoda kullanılan puzolanik katkı miktarı, sadece çimentonun maliyetini düşürmekle kalmayıp bazı teknik özellikler de kazandırır. Genellikle puzolanik

katkılı çimentolar, kanal kaplamalarında, su altı inşaatlarında, sanayi ve evsel atık suların olduğu yerlerde yapılan betonlarda, geçirimsizlik sağlaması, hidrasyon ısısını düşürmesi, alkali agrega reaktivitesini azaltması, betonun ileri yaştaki dayanımlarında artış sağlaması gibi sebeplerle betonda kullanılmaktadır [13].

2.2.1. Çimento çeşitleri

Genel olarak çimentolar, ana malzemelerine göre isim almaktadırlar. Çimentolardan istenilen düzeyde yararlanabilmek için kullanılacak yerlerin özelliğine göre çimento seçmek gerekir. Sülfatlı zeminle veya su ile temas eden inşaatlarda sülfata dayanıklı çimento kullanılması, kütle betonlarda ise hidrasyon ısısı düşük çimento seçmek gerekir [13].

2.2.2. Portland çimentosu (PÇ)

PÇ, çimentolar içinde en yaygın olarak bilinen çimento türüdür. Günümüzde üretimi çok az veya özel istek üzerine yapılmaktadır. Bunun nedeni, diğer çimentolara göre pahalı olmasıdır. Diğer çimento türlerinin bir çoğunun bileşimlerinde yer almaktadır.

PÇ' nin kimyasal bileşimi yaklaşık olarak % 65 CaO, % 20 SiO₂, % 6 Al₂O₃, % 3 Fe₂O₃, % 3 MgO ve % 3 S₀₄'tür. Çimentoda, reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamı, en az kütlece % 50 olmalıdır [13].

PÇ' nin üstünlükleri

- ✓ Kirecin, asitli ve CO₂'li suların etkisiyle erimesini önler ve kimyasal mukavemeti artırır. Su içinde yapılan yapılarda kullanılır.
- ✓ Hidrasyon ısısı ve bu ısının çıkış hızı düşüktür. Kütle beton üretimi ve sıcak havada beton dökümü için uygundur,
- ✓ Geçirimliliği az ve dona dayanımı daha fazladır [13].

PC' nin sakıncaları

- ✓ Mukavemeti yavaş kazandırır.
- ✓ Hidratasyon ısılarının düşük olmasından dolayı soğuk iklimler için uygun değildir [13].

2.2.3. Çimento dayanım sınıfları

Çimento dayanım sınıfları, 32,5, 32,5 R, 42,5, 42,5R, 52,5 ve 52,5R olmak üzere altıya ayrılmıştır. Bu sınıflandırmada, 28 günlük minimum basınç dayanımı değerinin yanında belirtilmiş olan "R" harfi, erken dayanım koşulu getirmektedir. Çizelge 2.2'de ENV 197-1 standardındaki dayanım sınıfları ve basınç dayanımı sınırları verilmiştir [13].

Çizelge 2.2. Çimento dayanım sınıfları

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanım Sınırları (N/mm ²)		
	2 Gün	7 Gün	28 Gün
32,5	-	≥16	≥32,5, ≥52,5
32,5R	≥10	-	≥32,5, ≥52,5
42,5	≥10	-	≥42,5, ≥62,5
42,5R	≥20	-	≥42,5, ≥62,5
52,5	≥20	-	≥52,5
52,5R	≥30	-	≥52,5

ENV 197-1 standardında 32,5 ve 42,5 dayanım sınıfı çimentolar için ilk priz süresi en az 60 dakika, 52,5 dayanım sınıfı çimentoların ise en az 45 dakika olarak belirlenmiştir [13].

2.3. Su

Kural olarak içilebilen bütün sular, beton üretiminde endişe duyulmadan kullanılabilirler. Ancak her zaman bu özellikte su bulmak mümkün olmayabilir. Beton karma suyu asidik olmamalıdır. Yani, pH derecesi 7 ve 7'nin üzerinde olmamalıdır. Doğada bulunan sulardan, priz geciktirmeleri açısından ağır metal tuzları ve asitlerinden, organik maddelerden kaçınmak gerekir. Suların zararlılık dereceleri, Çizelge 2.3'e göre değerlendirilebilir [13].

Çizelge 2.3'te belirtilen madde ve özelliklerden biri zararlı etki düzeyine ulaşıyor ise, suyun zararlı etkinlik derecesinin tayininde bu düzeye ait değer esas alınır. İncelenen özelliklerden iki veya daha fazlasının söz konusu olması halinde, aralarında en yüksek zararlı etkinlik derecesine karşılık gelen değer esas alınarak zararlı etkinlik derecesi tayin edilir. Suyun zararlı etkinlik derecesinin tayininde esas alınan değer, o derece için Çizelge 2.3'te belirtilen sınır değerleri aralığının üst dörtte birine yani $3/4$ 'üne ulaşıyorsa, zararlı etkinlik bir üst dereceye yükseltilir [13].

Çizelge 2.3. Suların zararlılık dereceleri için sınır değerleri [13].

Sıra No	İncelenen Özellikler	Zararlı Etkinlik Derecesi		
		Zayıf	Kuvvetli	Çok Kuvvetli
1	PH Değeri	6,5-5,5	5,5-4,5	4,5'dan küçük
2	Kireç Çözücü (CO_2 mg/L) {Heyer Mermer Deneyi ile}	15-30	30-60	60'dan büyük
3	Amonyum (NH_4) mg/L	15-30	30-60	60'dan büyük
4	Magnezyum (Mg^{2+}) mg/L	100-300	300-1500	1500'den büyük
5	Sülfat (SO_4^{2-}) mg/L	200-600	600-3000	3000'den büyük

Beton üretiminde kullanılan karma suyu;

- ✓ Bağlayıcı maddenin hidratasyonunu sağlar,
- ✓ İnce ve iri agrega tanelerini ıslatır,

- ✓ Betonun işlenebilme özelliğinin istenilen düzeyde olmasına yardım eder.
- ✓ Belirli miktarda çimento, kum ve iri agregâ kullanarak beton üretimi istendiğinde en uygun gelen bir optimum su miktarı vardır ki, bu miktar suyun kullanılmasıyla mukavemeti maksimum olan beton elde edilir [13].

Optimum miktardan daha az su kullanılması halinde;

- ✓ Yeter miktarda su bulunmamasından dolayı çimento hidratasyonunu tam bir şekilde yapamayacaktır,
- ✓ Agregâ tanelerinin yüzeyleri tamamen ıslanmayacak dolayısıyla agregâ ile çimento arasındaki aderans zayıflayacaktır,
- ✓ Betonun işlenebilme özelliği yeterli düzeyde bulunmayacaktır.
- ✓ Bütün bu gelişmelerin sonunda hidratasyonunu tamamlamış olarak elde edilen betonun mukavemeti düşük olacaktır.

Betona konulan suyun optimum miktardan büyük olması halinde ise;

- ✓ Çimento hamurunun mukavemeti azalacak,
- ✓ Fazla su, betonun sıkışmasına engel olarak boşluk azalmasına yol açacaktır [13].

Betonda gereğinden % 10 eksik su kullanımı, basınç dayanımında % 10 azaltmaya neden olduğu gibi geçirgenliğe ve dış faktörlere karşı dayanımı da olumsuz yönde etkiler. Karışım suyunun % 20'den fazla olması ise, basınç dayanımında % 30 azalmaya neden olduğu gibi diğer özellikleri de olumsuz yönde etkilemektedir.

Beton karışımında, çimento ağırlığının % 36-42'si arasında karma suyu kullanılması çimentonun hidratasyonu için yeterlidir. Bundan fazla su, betonun işlenebilme özelliği için gereklidir. Karışım suyu miktarı, çimentonun inceliği ve agregadaki çok ince malzeme ile doğru orantılıdır. Kimyasal olarak bağlanamayan su, betonda büzülmelere ve istenmeyen boşluklara neden olur [13].

2.4. Katkılar

2.4.1. Kimyasal katkılar

Genel olarak katkı maddeleri, harç ve betonun taze veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştiren, çimento dozajının % 5'ini aşmayacak şekilde betona, çimentoya veya harca katılan organik ve inorganik kökenli maddeler olarak tanımlanmaktadır A ve SA katkı maddeleri, etki açısından pratik olarak aynı görünmekle beraber, özellikle SA' ların normal akışkanlaştırıcı katkı maddelerine oranla daha az hava sürüklediği bilinmektedir [13].

Katkı maddeleri, kullanım amaçlarına göre,

1. Beton üretiminde kullanılan çimento miktarından azaltmaya gitmeden veya dayanımdan ödün vermeden elde edilen betonun akıcı ve kolay yerleşebilir olmasını sağlamak için,
2. s/ç oranını düşürerek YDB üretmek amacıyla işlenebilirliği sağlamak için,
3. s/ç oranı sabit kalmak kaydıyla, hem su hem de çimento miktarı azaltılarak tasarruf yapılması durumunda işlenebilirliği ilk seviyesinde tutabilmek amacıyla kullanırlar [13].

SA bir katkının, s/ç oranı sabit ve s/ç azaltılan betonlara etkisinin incelendiği bir araştırmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- ✓ s/ç oranı sabit betonların çökme değerleri, kontrol betonuna göre 2-3 kat artmıştır.
- ✓ s/ç oranı azaltılan betonların çökme değerleri, s/ç oranı sabit olan kontrol betonuna göre daha yüksektir.
- ✓ Basınç dayanımı göz önüne alındığında, s/ç oranı sabit betonlar için % 1.0'den yüksek katkı kullanımının sakıncalı olduğu söylenebilir.
- ✓ s/ç oranı azaltılırken katkı oranı artırılan betonların basınç dayanımları devamlı olarak yükselmektedir.

✓ Yarmada çekme dayanımları, s/ç oranı azaltılan betonlarda % 1,0 katkıya kadar azalmış, % 1,5 ve % 2,0 katkılı betonlarda ise artmıştır.

Kimyasal katkı maddeleri, sertleşmiş -kütle betonuna da önemli faydalar sağlamaktadır. Bunlar; sertleşme sürecinde hidrasyon ısını kontrol etmesi, dayanımı artırması, çimento dozajını düşürmesi, dayanıklılığı artırması, geçirgenliği azaltması ve aşınma/kavitasyon dayanımını artırması olarak sıralanabilir [13].

2.4.2. Mineral katkılar (puzolanlar)

Mineral katkılar, kendi başına bağlayıcı özellik taşımayan, ince öğütüldüğünde ve önemli ortamda çimento hidrasyonu sonucu açığa çıkan kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir. Puzolanlar, doğal ve yapay olmak, üzere iki gruba ayrılırlar. Tras, diatomit, volkanik kül vb. doğal, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb. yapay puzolanlar arasında yer alır [12, 14, 15].

2.5. Silis Dumanı

SD, yüksek saflıktaki kuvarsitin silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının, elektrik ark fırınlarında taş kömürü ile indirgenmesi sonucu bir yan ürün olarak elde edilmektedir. SiO_2 gazı, fırının düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf silis olarak yoğunlaşıp, SD bileşiğinin tamamını oluşturur. Yüksek oranda amorf silikon dioksit içeren ve çok düzgün küresel partiküllerden meydana gelen, 0,1 μm (mikron) civarında ölçülen ortalama çapları ile çimento tanelerinden 100 kere daha küçüktürler. Silisyum fırınlarından elde edilen tozlarda SD olarak nitelenmekle beraber, kimyasal bileşimleri biraz farklı, silis oranları biraz düşük olabilmektedir [14].

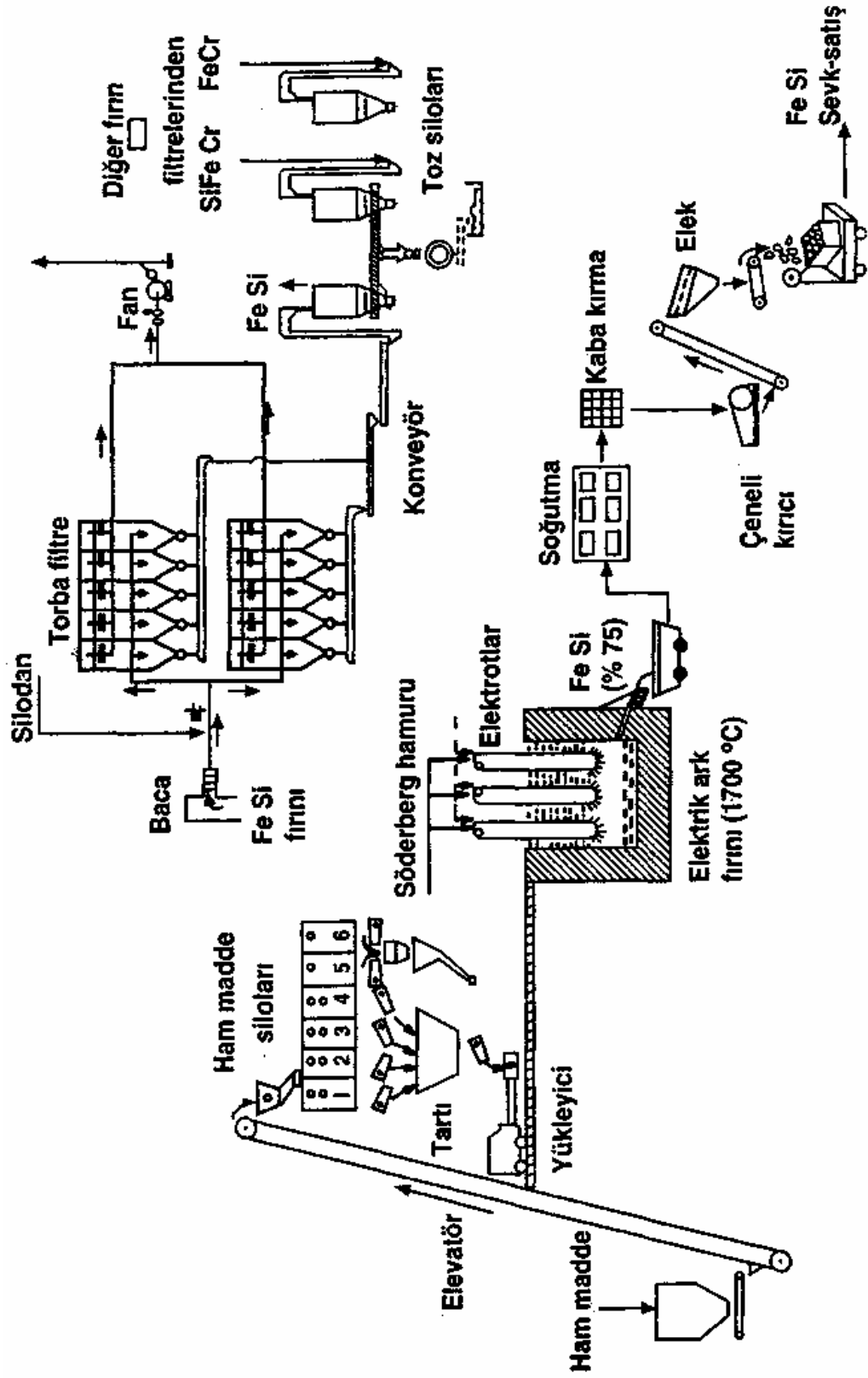
Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak SD'deki SiO_2 miktarı da artar. Bu miktar silisyum metalinde % 98'e ulaşır [16].

<u>Alaşım türü</u>	<u>Silis dumanındaki SiO₂ (%)</u>
% 50 Ferrosilisyum	61-84
% 75 Ferrosilisyum	84-91
Metal silisyum	87-98

Araştırmalarda ve pratikte kullanılan SD genellikle % 75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmiştir, daha düşük oranlı SD'lerin kullanımı konusunda fazla bilgi yoktur [16].

 rnek olarak tipik bir ferrosilisyum üretim şeması şekil 2.1'de gösterilmiştir. Üretim sürecinde % 95 civarında SiO₂ içeren kuvarsit, demir- elik hurdası veya demir cevheri ile metalürjik koktan oluşan hammaddeler belirli oranlarda tartılıp karıştırıldıktan sonra 600 kVA gücündeki elektrik ark-direnç fırınına sevk edilirler. Bu fırınlarda elektrot malzemesi olarak antrasit ve ziftten oluşan söderberg hamuru kullanılır. Demir ve silisyum oksitler karbon ile indirgenerek ferrosilisyum alaşımı oluştururlar. Fırın tabanında biriken alaşım uygun aralıklarla oluklardan alınarak kalıplarda soğutulur, kırılıp ufak parçalar halinde piyasaya sunulur [16].

şekil 2.1'deki şemanın üst kısmında görüldüğü gibi fırın bacasından çıkan ve torba filtrelerde toplanan baca tozu (silis dumanı) silolarda birikir. SD olarak nitelendirilebilen diğer bir baca tozu da silikoferrokrom (SiFeCr)  retimi sonucu elde edilmektedir. Tipik  retim şeması şekil 2.2'de ferrokrom (FeCr) alaşımı üretimi ile birlikte gösterilmiştir. Kromsit, kuvarsit, eritici olarak kullanılan kireç ile boksit katkısı ve metalürjik kok ile birlikte elektrik ark fırınına beslenir. Fırında oksitlerin indirgenmesi sonucu SiFeCr alaşımı tabanda birikirken yüzeyde de sıvı bir c r f tabakası oluşur. Metal alaşım ve c r f uygun aralıklarla oluklardan alınarak birbirlerinden ayrılır [16].



Şekil 2.1. Ferrosilisyum üretim şeması ve baca tozlarının toplanması

Silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen, endüstriyel bir atık olan SD'nin değerlendirilmesi konusundaki ilk çalışmalar çevre koruma amacı ile 1950'li yıllarda Norveç' te başlamıştır [16].

Günümüzde SD, harç ve beton üretiminde bağlayıcı madde olarak Portland çimentosunun ağırlık yüzdesi oranında çimentonun bir kısmı yerine veya çimentoya daha önceden karıştırılarak katkılı çimento şeklinde kullanılmaktadır [16].

Türkiye'de SD Antalya'da Etibank Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilmektedir. Ferrosilisyum ve silikoferrokrom baca tozları olarak yıllık üretim miktarları toplam 1000-2000 ton arasında değişmektedir. Burada elde edilen SD 1980'li yılların sonlarından itibaren özellikle üniversitelerimizde çimento ve betonda katkı maddesi olarak çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır [16].

Ülkemizin yeraltı zenginliklerini değerlendirmek amacıyla Türk - Fransız ortaklığı olarak 1958'de kurulmuş olan Antalya, ETİ Elektrometalurji A.Ş. (Diğer adıyla Ferrokrom Fabrikası), Antalya ili Kepezaltı mevkiinde bulunmaktadır. Kepez elektrik santralinin de burada bulunması yer seçiminde önemli rol oynamıştır [17].

İşletmede, düşük karbonlu ferrokrom, ferrosilisyum (% 75 Si), karpit, söderberg hamuru ve sönmemiş kireç üretimi yapılmaktadır [17].

Ferrosilisyum Tesisi [17]

Tesisin

Kuruluş tarihi	: 1978 - 1981
Kuruluş kapasitesi	: 5 000 ton/yıl
Kullanım kapasitesi	: 5 000 ton/yıl

Kullanılan Hammaddeler [17]

Kuarsit	: 9 000 ton/yıl
Demir (Cevher+Hurda)	: 900 ton/yıl
Metalürjik Kok	: 4 300 ton/yıl

Ürünün

Özgül Ağırlığı	: 3,5 gr/cm ³
Ergime Noktası	: 1330 °C

Üretim Metodu

İşletmede % 75 Si ihtiva eden Ferrosilisyum üretimi 6 000 KVA gücündeki ark-direnç fırınına kuarsit (% 95 SiO₂), demir çelik hurdası veya demir cevheri ile metalürjik kok belirli oranlarda tartılarak karıştırıldıktan sonra fırına gönderilir. Ferrosilisyum fırınında hammadde nakli ve tartımı bilgisayar otomasyonu ile tamamen otomatik olarak yapılmaktadır. Demir-oksitler ve SiO₂ karbon ile indirgenerek ferrosilisyum alaşımını oluşturur. Alaşım fırın tabanında birikir. Biriken bu alaşım, mal alma oluklarının uygun zaman aralıklarında açılmasıyla demir kalıplara alınır. Soğuyan bloklar kırılıp net 500 kg'lık sandık ve azami 25 kg'lık parçalarla dökme olarak ayrıca 10-100 mm ebatlarda özel kırma yapılarak satışa sunulur. Biriken stoklar nedeniyle 1999 yılı Ocak ayından beri üretim durdurulmuştur [17].

Kullanıldığı Yerler

Demir-çelik sanayisinde oksit giderici, çeliğin korozyon direncini ve mukavemetini arttırmak için alaşım elemanı olarak, transformatör, dinamo ve jeneratör imalinde kullanılan silisyumlu saçların imalinde, yay çeliklerinin imalinde kullanılır [17].

2.5.1. Silis dumanının fiziksel özellikleri

Renk

SD'nin rengi, açık sarı ve koyu gri arasında değişmektedir. Kullanılan SD'nin çoğu gri renklidir. Renkteki koyuluk karbon miktarı ile orantılıdır [14].

Özgöl ağırlık

Normal bir Portland çimentosunun $3,10 \text{ t/m}^3$ olan değeri ile kıyaslandığında, tipik bir SD'nin özgül ağırlığı $2,20 \text{ t/m}^3$ dür. Bazı durumlarda $2,50 \text{ t/m}^3$ e kadar yükselebilir [14].

Birim ağırlık

SD'nin birim ağırlığı, normal Portland çimentosu için verilen 1200 kg/m^3 ile kıyaslandığında $250\text{-}300 \text{ kg/m}^3$ tür. Yani çimento tankeri ile SD nakledilirse 1/4 oranında SD taşınacak demektir. Malzemenin hafifliği, etrafa kolayca yayılması önemli bir taşıma sorunudur. Bu yönde yöntemler geliştirilmiştir: $80\text{x}80\text{x}140 \text{ cm}$ boyutlarında torbalama (500 kg/m^3) veya bulamaç haline getirme (1300 kg/m^3) gibi. Bulamacın yarısı sudur. Tankerler içinde gereksiz yere su da taşınmış olacaktır. Bulamacın ayrıca şantiyede depolanması için özel tanklar düşünülmelidir [14].

Özgöl alan

Çoğunlukla küresel olan SD taneleri, $0,1 \mu\text{m}$ civarında ölçülen ortalama çapları ile çimento tanelerinden yaklaşık 100 kere daha küçüktürler. Yüksek silis oranı SD'yi etkin bir puzolan yapmaktadır. Ancak çok fazla olan incelik belirli bir kıvam için gerekli su miktarını artırmaktadır. SD'nin özgül alanı klasik Blaine aleti ile ölçülemez. Ölçüm için nitrojen absorpsiyonundan yararlanılan B.E.T. yöntemi kullanılır. $20\ 000 \text{ m}^2/\text{kg}$ veya $2000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ yüzey alanına sahip ince partiküllerden

oluşur. SD' nin son derece ince olduğu en iyi diğer materyaller ile karşılaştırıldığında görülür. Çizelge 2.4'te bu karşılaştırma gösterilmiştir [14].

Çizelge 2.4. SD' nin karşılaştırıldığı materyaller

Materyaller	Özgül Alan	Ölçüm Yöntemi
SD	20 000 m ² /kg	Nitrojen (Azot) absorblama
Uçucu Kül	400-700 m ² /kg	Blaine
Portland Çimentosu	300-400 m ² /kg	Blaine
Yüksek Fırın Cürufu	350-600 m ² /kg	Blaine

Tane şekilleri

Gözlenmiş SD taneleri mükemmel küreler şeklindedir. Elektron mikroskobu altında taneler bir araya gelerek küre yığınları halinde gözükürler. Hidratasyondan sonra ise tamamen amorf bir görünüme sahip olurlar [14].

Puzolanik reaksiyonlar

SD çok ince oluşu ve yüksek silika içeriğiyle oldukça etkili bir puzolanik materyaldir. Çimentolu ortamda bulunduğu en önemli rolü; C₂S ve C₃S hidratasyonları sonucu oluşan Ca(OH)₂' i bağlamak ve yeni bir kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli meydana getirmektir. Bu jel çimento hamurunda normal olarak oluşan CSH jelinden biraz farklı olup, yoğunluğu daha az ancak geçirimsizliği daha fazla olmaktadır. Bu durum SD tanelerinin büyük kristaller yerine çok sayıda daha küçük ve daha sağlam Ca(OH)₂ kristallerinin oluşmasına yardımcı olmaları şeklinde düşünülebilir. Küçük kürecikler halindeki SD taneleri, uygun ölçüde akışkanlaştırıcı katkı kullanılması halinde, çimento taneleri arasındaki boşluklardaki suyun yerini alarak daha yoğun bir çimento hamuru meydana getirebilmektedirler. SD katılmış çimento hamurlarının akma sınırı ve viskozitelerinde artış gözlenmektedir. Benzer şekilde normal betonlarda artış gözlenmektedir. Diğer taraftan zayıf bölge olarak bilinen iri agrega - hamur ara yüzeyleri civarı SD katılması halinde büyük Ca(OH)₂ kristalleri ile porozitenin azalması sonucu ilave dayanım kazanabilmektedir [14].

Silis dumanı üretimi

SD, ferrosilikon ve silikon alaşım endüstrisinde üretilir. Ticari olarak uygulanabilir miktarlarda ve daha yaygın kullanım alanı sağlayabilmek için SD'yi toplama metotları ile ilgili projeler geliştirilmiş ve 1970'lerin başında bir filtre sistemi dizayn edilmiştir.

SD, 200 kg/m^3 yoğunluğa sahip aşırı derecede küçük parçacıklar ihtiva eder. Bu parçacıklar çimentodan tipik olarak 100 kere daha incedir ve nakliyesi zordur. Taşınma ve kullanımı kolaylaştırmak için özel yöntemler kullanılmış olup, değişik formlarda üretilmektedir. Belli başlı formları şunlardır [14] :

Yoğunlaşmamış formu : $200\text{-}350 \text{ kg/m}^3$ yoğunluktadır. Filtrelerde toplandığında ince toz şeklinde olup hafiftir ve torbalanan materyal harç formülasyonlarında kullanılmaktadır [14].

Yoğunlaşmış formu : Serbest çökelmiş partiküllerin yoğunluğu $500\text{-}600 \text{ kg/m}^3$ 'e kadar artırılmış olup, yoğunlaşmamış formdaki gibi toz halde değildir ve ince taneli görünümündedir. Precast (ön üretim) ve hazır beton formülasyonlarında kullanılmaktadır [14].

Tanelenmiş (küreselleştirilmiş) formu : Kütle yoğunluğu yaklaşık 1000 kg/m^3 olup, katı bir çökelti vermesi için az su ile işleme tabi tutulmuştur. Çimento klinkeri ile öğütme işleminde kullanılabilmektedir.

Sıvılaştırılmış formu: Yoğunlaştırılmamış SD' nin su içindeki süspansiyon formudur. Karışım oranı %50' dir. Yoğunluğu 1400 kg/m^3 tür. Taşınabilirliği toz haline göre daha kolaydır [14].

İnceliğinden dolayı SD'nin bir yerden başka bir yere nakli sorun çıkarmaktadır. Bu malzemenin sulu bulamaç şeklinde kullanılması, nakledilmesi ve hava ile sıkıştırılmış halde kullanılması yoluyla bu sorun bir dereceye kadar çözümlenebilmektedir [18].

2.5.2 Silis dumanı ile ilgili standartlar

SD konusundaki standartların çoğunluğu bu katkının daha ziyade harç ve beton üretimi sırasında kullanılacağı varsayımı ile hazırlanmıştır. Aranılan özelliklerin SD'nin çimento katkısı olarak kullanılması halinde de büyük ölçüde geçerli olacağı ve bir bölümünün çimento özellikleri ile birlikte ele alınacağı düşünülmektedir.

Örneğin TS EN 197-1 Portland silis dumanlı çimento üretiminde kullanılacak SD'nin bileşimi konusunda aşağıdaki sınırları getirmektedir [19].

Amorf SiO ₂	= en az % 85
Kızdırma kaybı	= en fazla % 4
Özgül yüzey (BET)	= en az 15 m ² /g

Standartta çimentoların kimyasal özellikleri ile ilgili olarak SO₃ miktarının %3,5-%4,0'ü, klorür miktarının % 0,1'i geçmemesi gerektiğini belirtmekte ve dolaylı olarak kullanılacak silis dumanı (veya mineral katkı) bileşimi de kontrol altına alınmaktadır. Ayrıca puzolanik katkıların hazırlanması ve homojenliği konularında genel hususlara değinilmektedir [19].

Harç ve betona katılacak, SD konusundaki bazı standartlardaki bilgiler, Çizelge 2.5'te gösterilmiştir [16].

Çizelge 2.5. Harç ve betonda kullanılacak SD konusunda bazı standartlar

Bileşim ve özellikleri	ASTM C 1240	AASHTO M 307	CSA
SiO ₂ (% , en az)	85	85	85
Kızdırma kaybı (% , en fazla)	6,0	7,0	6,0
SO ₃ (% , en fazla)	-	3,0	1
Rutubet (% , en fazla)	3,0	3,0 ^(*)	3,0 ^(*)
Na ₂ O eşdeğer alkali (% , en fazla)	1,5 ^(*)	1,5 ^(*)	-
Elekte kalan (% , en fazla)	10 (45 µm)	0 (30 µm)	10 (45µm)
Özgül yüzey BET (m ² /g, en az)	15-30 ^(*)	-	-
Puzolanik aktivite, Portland çimentosu ile, (% kontrol, en az)	7 günde (85)	7 ve 28 günde (100)	7 günde (85)
Hacim sabitliği (otoklav, % en fazla)	-	0,8	0,2
Rötre, 28 günde (% kontrol, en fazla)	0,10 ^(*)	0,03 ^(*)	0,03 ^(*)
Alkali reaktivite, 14 günde (% genleşme azalması, en az)	80 ^(*)	80 ^(*)	80 ^(*)

2.6. Betonarme Çelik Çubukları

Beton çelik çubuğu, betonarme yapılarda beton teçhizatı olarak kullanılan, dairesel kesitli, düz yüzeyli veya yüzeyi nervürlü veya profilli olan çelik çubuklardır [20].

Betonarme yapılarda donatı çubuğu olarak kullanılan çelikler, kendi aralarında bazı gruplara ayrılırlar. Bunlar;

İmalat Metoduna Göre

- ✓ Sıcak haddeleme işlemi ile üretilen,

- ✓ Sıcak haddeleme esnasında ısıtım işlem uygulanarak imal edilen,
- ✓ Soğuk mekanik işlem (soğuk haddeleme, burma) uygulanarak imal edilen olmak üzere üç sınıftır [20].

En Küçük Akma Sınır Gerilmelerine Göre

- ✓ En küçük akma sınırı 220N/mm^2 , (2200 kgf / cm^2) (I)
- ✓ En küçük akma sınırı 420 N/mm^2 , (4200 kgf/ cm^2) (III)
- ✓ En küçük akma sınırı 500 N/mm^2 , (5000 kgf/ cm^2) (IV) olmak üzere üç sınıfa ayrılır [20].

Yüzey Özelliklerine Göre

- ✓ Düz yüzeyli (D)
- ✓ Nervürlü (N)
- ✓ Yüzeyi profilili (P) olmak üzere üç tiptir [20].

Nervür, çubuğun betonla aderansını arttırmak amacıyla, çubuğun yüzeyinde oluşturulmuş, çubuk eksenine belirli bir açıyla (β) veya açılarla yer alan ve çubuk boyunca devam eden çıkıntılardır [20].

2.7. Çeliğin Korozyonu

Korozyon, çevrenin elektro-kimyasal etkisi ile oluşan ve özellikle metallerde önemli hale gelen malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Korozyon, metallerin elektron kaybederek oksitlenmeleri ve metalin metal iyonuna dönüşmesi olarak da bilinir. Sulu bir çözeltiye daldırılan metalin bu çözelti ile temas eden yüzeyinde elektriksel yük dengesizliği söz konusudur. Metal yüzeyindeki yük dengesizliğini karşılamak için, çözelti içindeki yüklü iyonların dağılımı değişir. Metal-çözelti ara yüzündeki yük dengesizliği, yüksek bir potansiyel gradyentinin oluşumuna sebep olur. Ara yüzdeki küçük bir potansiyel değişimi ise elektronların, metale veya metalden

çözeltiyeye geçişini kolaylaştırır. Elektron alışverişi şeklinde gelişen bu reaksiyonlara elektro-kimyasal reaksiyonlar denir [12].

Elektrokimyasal süreç birbirinden ayrı şekilde fakat aynı zamanda meydana gelen oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarından oluşur. Anot reaksiyonu adı verilen oksidasyon, sulu ortamda metalin elektron kaybederek katyona dönüşmesidir. Eş. 2.1 reaksiyonunda gösterildiği gibi elektron kaybeden metal elemana anot adı verilir. Katot reaksiyonu adı verilen redüksiyon ise ortaya çıkan elektronların Eş. 2.2 ve 2.3 reaksiyonlarında olduğu gibi sarf edilmesidir [12].



Elektro-kimyasal korozyonun sürekliliği için anot reaksiyonunun mutlak surette katot reaksiyonu ile tamamlanması gerekir. Anot reaksiyonunda meydana gelen metal iyonu, bulunduğu sulu ortam içinde çözülür, dağılır ve/veya çökelen bir korozyon ürünü meydana getirir. Böylece anot olan metalde, bir malzeme kaybı, yani bir hasar oluşur. Korozyonun sürekliliği için bir diğer koşul ise katot ve anodun elektriksel akım geçişini sağlayan bir iletkenle bağlı olmaları ve anotta açığa çıkan elektronların katoda iletilmesidir [12].

Mühendislik alanında en yaygın biçimde kullanılan metal bilindiği gibi çeliktir. Mekanik özellikleri çok üstün olan bu metalin en önemli kusuru korozyona dayanıklılığının çok düşük olmasıdır. Çelik, rutubetli ve oksijen içeren ortamlarda korozyona uğrar. Çeliğin korozyona uğraması için her zaman başka bir metale de ihtiyaç yoktur; aynı çelik çubuk üzerinde elektro-kimyasal hücre kendiliğinden oluşabilir. Atmosferik ortamda havanın nemi demir yüzeyinde yoğunlaşarak elektrolitik ortamı, çeliğin kendisi de elektriği ileten elektronik iletkeni oluştururlar [12].

2.8. Beton İçindeki Çeliğin Korozyonu

Beton, alkalinitesi yüksek bir ortamdır ve içindeki çelik yüzeyinde kararlı, koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına yardımcı olur. Bu olaya alkali pasivasyon adı verilir. Ancak beton, klorür iyonlarının donatıya kadar nüfuz etmesine neden olacak kadar geçirimli ise, ortamda su ve oksijen varsa ve karbonatlaşma nedeni ile ortamın pH'ı 11'in altına düşerse donatı yüzeyindeki pasiv demiroksit tabakası tahrip olur ve korozyon süreklilik kazanır [12].

Beton içindeki çeliğin korozyonu elektrokimyasal süreç ile açıklanabilir. Çelik yüzeyinde oluşan farklı elektrokimyasal potansiyele sahip anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin oluşturduğu elektrolit ile birleşir, donatının kendisi de elektronları ileten elektronik iletkeni teşkil eder. Dış kaynaklı akımın olmadığı durumda elektrokimyasal reaksiyon için, elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyon ve korozyonun sürekliliği için açığa çıkan elektronların tüketildiği katodik reaksiyonun olması gerekir. Beton içinde bulunan donatı için önemli anodik reaksiyonlar Eş. 2.4 - Eş. 2.7, katodik reaksiyonlar ise Eş. 2.8 ve Eş. 2.9 ile gösterilmiştir. Eş. 2.8 ve Eş. 2.9 ile gösterilen olası katodik reaksiyonlar, donatı yüzeyinin etrafındaki pH'a ve O₂'nin varlığına bağlıdır [12].

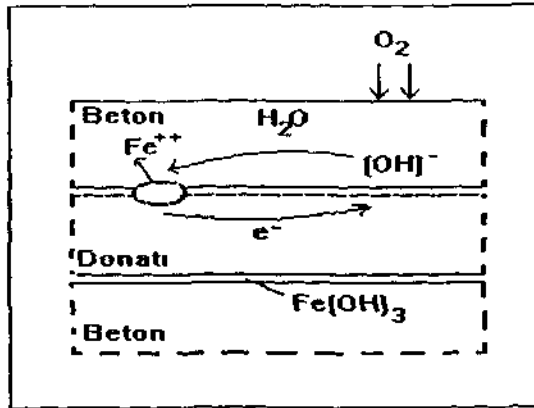
Anot reaksiyonları,



Katot reaksiyonları,



Katotta açığa çıkan hidroksil, anotta açığa çıkan demir iyonları ile birleşerek Eş. 2.10 reaksiyonu ile gösterilen ferrohidroksite, sonra daha kararlı haldeki ferrihidroksite Eş. 2.11'e dönüşür.



Şekil 2.3. Beton içindeki donatının korozyonu ve passivasyon tabakasının oluşumu

Passivasyonu sağlayan ve donatıyı kaplayan pas tabakası da Şekil 2.3'te görüldüğü gibi $Fe(OH)_3$ 'tür.

Hava ile irtibat halinde olan bir betonarme yapıda, beton içindeki su ve oksijen miktarı, korozyonun oluşmasına neden olabilecek seviyededir. Yeterli yoğunlukta ve yeterli pas payına sahip betonarme elemanında betondaki su miktarı fazla olsa bile oksijen difüzyonu azaldığı için korozyon tehlikeli sınırlara ulaşmayacaktır. Ancak $Ca(OH)_2$ 'nin betonda karbonatlaşması veya ortamda belirli sınırı aşmış serbest Cl^-

'nin varlığı donatı korozyonuna yol açacaktır. Sonuç olarak betonarmede donatının korozyonunu beton özellikleri belirleyecektir [12].

2.9. Korozyon ve Çeşitleri

Çeşitli ortamlarda değişik etkilerle ve mekanizmalarla oluşan korozyon olayları birbirinden farklıdır. Pratik olarak birbirinden ayırt edilebilen 15 ayrı korozyon çeşidi vardır. Bu korozyon çeşitlerinin oluş nedenleri ve karakteristik özellikleri şu şekilde açıklanabilir [21].

2.9.1. Genel korozyon

Geniş bir yüzey yada bütün yüzeyin her yanında kimyasal yada elektrokimyasal tepkimenin aynı biçimde yürümesi ile metal yüzeyinde her tarafta eşdeğer ölçüde oluşan korozyon çeşididir. Korozyon sonucu metal kalınlığı her noktada aynı miktarda azalır. Atmosferde bırakılan metal genellikle uniform olarak korozyona uğrar. Mekanik açıdan en az zararlı olan korozyon çeşididir. Çünkü metal delinmeden ve kırılmadan uzun süre işletmede kalabilir. Genel korozyonu önlemek amacıyla aşağıdaki işlemler uygulanır [21]

- ✓ Boyama,
- ✓ İnhibitör
- ✓ Katodik koruma,
- ✓ Kaplama

2.9.2. Galvanik korozyon

Korozif yada iletken bir ortama birbirine benzemeyen iki metal daldırılırsa aralarında bir potansiyel farkı oluşur. Bu iki metal birbirlerine bir iletkenle bağlandıklarında yada birbirilerine temas ettirildiklerinde oluşan potansiyel farkı dolayısıyla elektronlar birinden diğerine doğru akar. Korozyon hızı, anot ve katot bölgeleri arasındaki potansiyel farkına ve devrenin toplam direncine bağlıdır [21].

Galvanik korozyonun pratikte etkili olması aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

Çevrenin Koroziflik Derecesi: Metallerin içinde bulunduğu çevre ne derece korozif özellikte ise galvanik etki daha şiddetle kendini gösterir. Bu durum atmosferik korozyonda daha belirgindir. Deniz atmosferinde galvanik etki daha hızlı bir korozyona neden olur. Eğer kuru bir atmosfer söz konusu ise galvanik korozyon olmaz [21].

Metaller Arası Mesafe: Galvanik korozyon, iki metalin birbirine bağlandığı noktada en şiddetli olarak kendini gösterir. Mesafenin etkisi çözeltinin iletkenliğine bağlıdır. Elektrolit direnci fazla ise korozyon olayı hemen bağlantı yakınında oyuk şeklinde kendini gösterir. Eğer çözelti iletkenliği yüksek ise korozyon olayı daha geniş bir alana dağılacaktır [21].

Katot /Anot Yüzey Oranı: Büyük bir katot ile küçük bir anottan oluşan bir galvanik hücrede anot kısa sürede yıpranır, katot /anot oranının büyük oluşu anot akım yoğunluğunun büyümesine ve küçük bir bölgeden fazla miktarda madde kaybına neden olmaktadır. Örneğin bakır plakaları çelik perçin ile tutturulmasında, çelik perçinler kısa sürede parçalanır. Kaplama yapılmış bir malzemede, kaplamanın ufak bir hasar görmesi durumunda büyük katot- küçük anot etkisi görülür ve kaplamanın hasar gördüğü yerde malzeme delinmeye kadar gidebilir [21].

Galvanik korozyonla savaşmak yada korozyonu azaltmak için çeşitli yollar izlenir yada uygulamalar yapılır. Bu uygulamaları şu şekilde sıralayabiliriz [21]:

- ✓ Galvanik dizide birbirine yakın metaller seçilir.
- ✓ Küçük anot – büyük katot etkisinden kaçınılmalıdır.
- ✓ Ortamın korozifliğini azaltmak için ortama inhibitör eklenebilir.
- ✓ Her iki metale karşı anodik davranan üçüncü bir metal kullanılabilir (katodik koruma).
- ✓ Anodik parçalar kolay değiştirilebilecek biçimde tasarlanır yada daha uzun dayanması için daha kalın yapılır

Bu uygulamalardan bazen bir tanesi yeterli olurken bazen birkaç tanesini uygulamak gerekebilir [21].

2.9.3. Aralık korozyonu

Korozif ortamda metal yüzeyindeki yarıklar, aralıklar içinde yada metal yüzeyindeki örtülmüş yerlerde şiddetli yerel korozyon olur. Özellikle korozyona karşı dayancı oksit katmanı yada pasif katmana bağlı olan metaller yada alaşımlar aralık korozyonuna daha fazla duyarlıdır. Aralık korozyonuna neden olan birikintiler kum, kir, korozyon ürünleri ve diğer birikintiler olabilir. Birikinti yüzeyi kapatıcı olarak etkir ve altında durgun ortam oluşturur. Metal ve metalik olmayan yüzeylerin değme yerlerinde aralık korozyonu olabilir. Conta, ağaç, plastik, cam, beton, asbest, vaks, tekstil gibi maddeler aralık korozyonuna sebebiyet verebilir [21].

Bir aralığın korozyona neden olabilmesi için sıvının içine girebileceği kadar geniş, ama, durgun bir bölge sağlayabilecek kadar da dar olmalıdır. Bu nedenle aralık korozyonu, genellikle santimetrenin binde biri genişliğindeki aralık yada daha küçük delikçiklerde olur [21].

Yakın zamana kadar aralık korozyonun, aralık içinde ve onun ortamı arasında metal iyonu yada oksijen derişiminin farkından kaynaklandığı sanılıyordu. Ancak yapılan çalışmalar bunun asıl neden olmadığını göstermiştir. Aralık korozyonunun mekanizmasını aydınlatmak için, hava içeren deniz suyu içine daldırılmış perçinlenmiş iki levha düşünölsün .Çözeltinin temas ettiği yüzeylerde çözelti içinde bulunan oksijen derişimine bağlı olarak, belirli bir hızda oksijen indirgenmesi gerçekleşir [21].



İki plakanın birbirine bağlı olduğu bölgede de başlangıçta çözelti içinde bulunan oksijen kullanılarak oksijen indirgenmesi olur. Buna karşılık bir metal elektronlarını vererek iyonlaşır [21].



Bu olay aralık içindeki oksijen bitinceye kadar devam eder. Bu dar bölge içine dışardan oksijen difüzyonu oldukça güçtür. Çatlağın hemen dışında oksijen indirgenmesi devam ederken çatlakta yalnızca metal yükseltgenmesi olur. Bu reaksiyonlar sonucu çatlak içinde metal iyonları derişimi gittikçe artar. Bu pozitif yüklü iyonlar çatlak içine dışardan klorür iyonlarının difüzlenmesine neden olur. Çatlak içinde oluşan metal klorür bileşigi de aşağıdaki reaksiyonla hidroliz olarak pas oluşturur.



Böylece çatlak içinde klorür derişimi artarken aynı zamanda pH değerinde düşme görülür. Bu durum çatlak içindeki korozyon hızının daha da artmasına neden olur. Çatlak dışındaki çözeltinin oksijen derişimi ne kadar fazla ise, çatlak içindeki korozyon hızı o derece yüksek olur [21].

Metal yüzeyinde bulunan çatlak, aralık veya cep gibi çözeltinin durgun halde kaldığı bölgelere oksijen transferi güçleşir. Bunun sonucu olarak bu bölgeler anot, çatlağın çevresindeki bölgeler ise katot olur. Korozyonun en etkili olduğu bölge, çatlağın katot bölgesine yakın olan ağız kısmıdır. Milimetrenin binde biri kadar küçük bir çatlak bile korozyonun başlaması için yeterlidir [21].

Aralık korozyonunu önlemek için yada korozyonunu azaltmak için aşağıdaki yöntemler uygulanır yada işlemler yapılır [21]:

- ✓ Perçin ve cıvata ile birleştirmeler yerine lehim kullanılır.
- ✓ Kaplar, tam boşaltma sağlayabilecek bir tasarımda yapılmalıdır. Keskin köşelerden ve durgun bölgelerden kaçınılmalıdır. Tam boşaltma yıkama ve temizlemeyi kolaylaştırır ve kabın dibinde çökelmeleri önler.
- ✓ Donanımlar sık sık denetlenmeli ve çökelekler sık sık uzaklaştırılmalıdır.

- ✓ Mümkin ise, proses sırasında asılı tanecikler (süspansiyonlar) uzaklaştırılmalıdır.
- ✓ Boru hatlarında, ortamın her yerde aynı olmasına dikkat edilmelidir.
- ✓ Mümkin olduğu kadar teflon gibi absorblayıcı olmayan katı contalar kullanılmalıdır [21].

2.9.4. Çukur korozyonu

Metal yüzeyinde bazı noktalarda, çeşitli noktalarda başlayan korozyon olayının o noktalarda mikro çukurlar haline dönüşmesi ve gittikçe büyümesi olayıdır. Bu tip korozyon olayında anot ve katot bölgeleri birbirinden kesin şekilde ayrılmıştır. Anot metal yüzeyinde açılan çukurun içindeki dar bir bölge, katot ise çukurun çevresindeki çok geniş alandır. Korozyon sonucu çukur gittikçe derinleşerek metalin o noktada kısa sürede delinmesine neden olur. Bu nedenle çukur korozyonu çok tehlikeli bir korozyon türüdür [21].

Çukur korozyonu, metal yüzeyinin herhangi bir noktasında oluşan bir anodik reaksiyon ile başlar ve otokatalitik reaksiyonlar hızlı bir şekilde gelişir. Çukur korozyonu sadece durgun çözeltiler içinde meydana gelebilir. Genellikle borularda, tank tabanlarında, akış hızının azaldığı bölgelerde kendini gösterir. Çukur korozyonuna etki eden başlıca etmenler şunlardır [21].

Metalürjik farklılık: Bazı metaller özellikle pasifleşebilen metaller çukur korozyonuna dayanıksızdır. Örneğin paslanmaz çelikler, normal çeliklere göre çukur korozyonuna daha az dayanıklıdır.

Çözelti içinde klorür iyonu bulunması: Klorür iyonu, oksitle kaplanmış metal yüzeyinde adsorplanarak yüzeyde bulunan metal oksitlerini metal klorür halinde çözeltiye çeker. Böylece klorür iyonları çukur korozyonunu hızlandırır.

Çözelti hızının azalması: Çukur korozyonu genelde durgun bölgelerde etkili olur. Eğer çözelti hızı fazla ise çukur korozyonu gelişme ortamı bulamaz.

Çukur korozyonunu önlemede, aralık korozyonu için önerilen yöntemler uygulanır. Çukur korozyonuna uğramış yada uğrama eğilimli olan malzemeler kesinlikle fabrika yada donanım için kullanılmamalıdır [21].

2.9.5. Kabuk altı korozyon

Metal yüzeyinde korozyon ürünlerinin oluşturduğu veya başka bir nedenle oluşan bir kabuk altında meydana gelen korozyona kabuk altı korozyonu denir. Bu korozyon türü kabuk altının rutubetli olması ve kabuk altının yeterince oksijen almadığı durumlarda gerçekleşir. Kabuk altında sıvı hareketi olmadığından çatlak korozyonuna benzer bir ortam oluşturulmuş olur. Kabuğun altı anot olarak korozyona uğrarken, kabuk çevresi katot olarak korunur [21].

2.9.6. Filiform korozyon

Metal yüzeyinde bulunan boya veya kaplama tabakası altında yürüyen bir korozyon olayıdır. Filiform korozyonu, çatlak korozyonunun bir türü olarak kabul edilebilir. Bu korozyon türüne kabuk altı korozyonu da denilmektedir. Korozyon olayı kabuk altında bir solucan hareketine benzer şekilde hareket eder. Bir filiform diğer bir filiformu kesmez. Kesişme halinde yansıma yaparak yoluna devam eder [21].

Filiform korozyonu, mekanizması çatlak korozyonun oluşum mekanizması gibidir. Korozyon kaplamanın zayıf bir noktasından başlar. Bu noktada kabuk altına atmosferden oksijen ve su girişi olur. Kaplama su geçirmediği takdirde korozyon olayı olmaz. Korozyonun başladığı noktada oksijen konsantrasyonu maksimumdur ve korozyonun yürüdüğü yönde gittikçe azalır. Korozyon sonucu metal hidroksiti ve hidrojen iyonları oluşur. Böylece uç kısımda korozyonun devamı için uygun bir ortam (düşük oksijen konsantrasyonu ve düşük pH) sağlanmış olur. Bu nedenle korozyon olayı uç noktadan ileriye doğru hareket eder [21].

Emaye ve lak kaplamalar içine korozyon inhibitörlerin katılması filiform korozyonların doğası ve yayılması üzerine bağlı olarak az etkimektedir.

2.9.7. Seçimli korozyon

Bir alaşım içinde bulunan elementlerden birinin korozyona uğrayarak uzaklaşması sonucu oluşan korozyon olayıdır. Bu tür korozyona en iyi örnek pirinç alaşımıdır. Çinko bakırdan önce yükseltgenerek korozyona uğrar ve uzaklaşır. Bu seçimli korozyona özel olarak dezinfikasyon denir. Benzer olay diğer alaşımlarda da gözlenir. Alaşımlardan seçimli olarak alüminyum, demir, kobalt, krom yada diğer elementler uzaklaşır [21].

Pirinç, yaklaşık % 70 bakır ve % 30 çinkodan oluşan bir alaşımdır. Başlangıçta sarı renkli olan bu alaşım, çinkonun korozyonundan sonra gittikçe bakır kırmızısı rengini alır. Alaşım poröz bir yapı kazanarak mukavemetini kaybeder. Alaşım içinde çinko oranı arttıkça alaşımın seçimli korozyona dayanıklılığı azalır. Çözeltinin durgun olduğu bölgeler dezinfikasyona daha elverişlidir [21].

Dezinfikasyon olayı eskiden yalnızca çinkonun çözünerek uzaklaşması ve alaşımın içinde bulunan bakırın iskelet halinde kalması şeklinde açıklanmaktaydı. Son zamanlarda dezinfikasyon korozyonunun mekanizması şu şekilde açıklanmaktadır. Alaşım yüzeyinde çinko ve bakırın her ikisi de çözünerek korozyona uğrar. Çinko çözeltide iyonları halinde kalırken, bakır katodik indirgenme ile yeniden metal haline geçer. Bu olay çözelti içinde oksijen olmadan da yürüyebilir. Bakır iyonları çinkonun korozyonunu hızlandırır. Böylece korozyon olayı sadece yüzeyde kalmaz. poröz yapı oluşturacak şekilde derinlere doğru ilerler [21].

Dezinfikasyon korozyonunu önlemek için en uygun yol, alaşım içindeki çinko yüzdesini % 15'in altında tutmaktır. Eğer pirinç içine % 1 oranında kalay katılacak olursa korozyon direnci artar. Az miktarda arsenik, antimon veya fosfor katkısı inhibitör etkisi yapar [21].

Sık rastlanan diğer bir seçimli korozyon olayı da, grafitizasyon denilen gri dökme demirde oluşan korozyondur. Gri dökme demir içinde % 2-4 oranında karbon bulunur. Dökme demir içinde grafit katot ve demir anot olur. Böylece bir galvanik

korozyon olayı gerçekleşir. Demir çözünür ve grafit iskelet halinde kalır. Beyaz dökme demir içinde karbon serbest halde bulunmaz. Bu nedenle beyaz dökme demirde grafitizasyon olayı meydana gelmez [21].

2.9.8. Taneler arası korozyon

Bir metalin kristal yapısında tanelerin sınır çizgisi boyunca meydana gelen korozyona taneler arası korozyon denir. Eritilmiş bir metalin katılaşması veya katı halde bulunan herhangi bir ısıtılma işlemi tabi tutulması sırasında metal atomu kristallerinin sınır bölgelerinde korozyon açısından zayıf bazı bozukluklar meydana gelebilir. Metal korozyon bir ortama girdiğinde taneler arası korozyon olayı meydana gelir. Bunun en tipik örneği paslanmaz çeliktir. Bu çelikler yüksek sıcaklıkta ısıtılma işlemi tabi tutulursa veya kaynak yapılırsa, çelik içindeki karbon ile krom reaksiyona girerek krom karbür bileşiğini (Cr_23C_6) oluşturur. Bu bileşik taneler arasındaki sınırlarda birikerek bu bölgeleri korozyon açısından dayanıksız hale getirir [21].

Taneler arası korozyon, taneler arasında bulunan herhangi bir safsızlıktan, örneğin bir alaşım elementinin daha fazla bulunması nedeniyle de oluşabilir. Örneğin alüminyum içinde bulunan az miktarda demir, taneler arası korozyona neden olabilir. Çünkü alüminyum içinde çelik çok az çözünür, bu nedenle taneler arasında birikir. Yine buna benzer olarak, paslanmaz çeliklerde taneler arası sınır bölgelerinde krom miktarı çok azdır. Bu bölgeler krom azlığından taneler arası korozyona dayanıksızdır [21].

Taneler arası korozyon bakımından paslanmaz çelik çok özel bir durum gösterir. Bu çelik normal hallerde korozyona çok dayanıklı olduğu halde, 500-800 °C'de ısıtıldığında korozyona duyarlı hale gelir. En şiddetli sıcaklık etkisi 650 °C'ta bir saat bekletildiğinde gösterilir. Bunun nedeni bu sıcaklıkta kromun son derece azalmasıdır. Paslanmaz çeliklerde en az % 12 oranında krom bulunmalıdır [21].

Taneler arası korozyon olayına daha çok kaynak yapılan bölgenin sınır çizgilerinde rastlanır. Bu olaya kaynak çürümesi denir. Kaynak yapılan bölgede sıcaklık yükselir ve taneler arasında krom karbür çökeltisi oluşur. Sıcaklığın etkili olduğu bölgeler korozyon bakımından duyarlı hale gelir. Kaynak sırasında yalnız sıcaklığın yüksekliği değil, sıcaklığın etkime süresi de önemlidir. Bu süre kaynak yapılan malzemenin kalınlığına da bağlıdır. Örneğin ince levhalar kısa sürede kaynak edilip kısa sürede sıcaklığını kaybeder. Bu süre krom karbür bileşiğinin oluşması ve taneler arasında birikmesi için yeterli olmaz. Dolayısıyla bu durumda kaynak çürümesi olayı da meydana gelmez. Bu açıdan paslanmaz çeliklerin elektrikle kaynak edilmeleri daha uygun olur [21].

2.9.9. Erozyonlu korozyon

Bir metal ile koroziv ortam arasındaki bağıl hareket nedeniyle metalin aşınması olayına erozyon korozyonu denir. Koroziv çözeltilerin metal yüzeyinden hızla akması halinde, korozyon olayı yanında erozyon da meydana gelir. Bu durum korozyon hızının da artmasına neden olur. Bunun nedeni oluşan korozyon ürünlerinin akışkan tarafından sürüklenerek götürülmesidir. Erozyonlu korozyonun tipik bir görünüşü vardır. Akış yönünde gözle görülen oyuklar ve dalga biçiminde yuvarlak oluklar oluşur [21].

Erozyonlu korozyon bir çok metalde görünmekle birlikte, bu korozyona en duyarlı metal bakır ve bakır alaşımlarıdır. Erozyon korozyonunda yüzey temiz halde olup hiçbir korozyon ürünü görünmez. Kural olarak erozyon korozyonu etkisi, boruların bükülen yerlerinde, akış rejiminin bozulduğu bölgelerde görülür. Isı değiştiricilerinde akışkanın borulara giriş bölgelerinde, pompalarda sıvı hızının arttığı yerlerde, valflerde erozyon korozyonu sıkça görülür. Eğer sıvı katı partikül taşıyorsa veya hava kabarcıkları varsa erozyon korozyonu şiddeti artar [21].

Pasifleşme özelliği olan metaller erozyonlu korozyon olayına çok duyarlıdır. Örneğin alüminyum, kurşun ve paslanmaz çelik böyledir. Bu metallerin yüzeyinde erozyon

etkisinde kalan bölgelerde pasifleşme tabakası oluşmaz ve metal korumasız kalan bölgelerde şiddetli korozyona uğrar.

Erozyon korozyonu ile ilgili hasarları en aza indirmek yada önlemek için aşağıdaki işlemler uygulanır [21]:

- ✓ Erozyon korozyonuna daha dayanıklı malzemeler kullanmak
- ✓ Tasarımı iyi yapmak
- ✓ Koroziyon ortamının değiştirilmesi
- ✓ Malzemeyi kaplamak
- ✓ Katodik koruma uygulamak

2.9.10. Kaviteasyon (oyuk hasarları)

Oyuk hasarları (kaviteasyon), erozyonlu korozyonun özel bir şeklidir. Akışkan içinde bir gaz veya buhar kabarcığının bulunması halinde, bu basınçlı gaz metal yüzeyi üzerinde bulunan herhangi bir engel nedeniyle patlayarak o bölgede yıpranmaya neden olabilir. Bu olay genelde hidrolik türbinlerde, gemi pervanelerinde ve pompa paletlerinde ortaya çıkar. Oyuk hasarları (kaviteasyon) olayının mekanizması şu şekilde açıklanabilir: Normal hızdaki akışlardan çok yüksek olan akış hızlarında bazı bölgelerde vakum oluşabilir. Bunun sonucu olarak sıvı buharlaşabilir veya sıvı içinde bulunan çözünmüş gazlar ayrışır. Böylece sıvı içinde düşük basınçlı gaz kabarcıkları meydana gelir. Bu kabarcıklar akış hızının azaldığı bölgelerde genellikle metal yüzeyine yakın bir yerde sönerler. Bu olay metal yüzeyinde kuvvetli bir emiş yaparak metali oyulmasına neden olurlar [21].

Genel olarak oyuk hasarlarından (kaviteasyon), erozyonlu korozyonu önlemek için uygulanan işlemleri uygulayarak korunabilir [21].

2.9.11. Gerilmeli korozyon çatlaması (stres korozyon)

Korozif ortamda bulunan bir metal aynı zamanda statik bir gerilme altında ise, metalin çatlayarak kırılması çabuklaşır. Metal yüzeyinde bulunan herhangi bir çukur veya çatlak gerilim altında duyarlı hale gelerek korozyonun başlaması için uygun bir ortam yaratır. Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, stres altında iken kabuk oluşturamaz. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına neden olur [21].

Bu tip korozyona saf metallerden çok alaşımlar duyarlıdır. Burada önemli olan yalnızca çekme gerilmesidir. Basınç gerilmesinin korozyonu artırıcı etkisi yoktur. Korozif ortam stres korozyonun oluşmasına yardımcı olur. Örneğin amonyaklı ortamda bakır ve bakır alaşımları, klorürlü ortamlarda paslanmaz çelikler, nitrat çözeltileri içinde karbon çeliğinin stres korozyonu daha şiddetli şekilde yürür. Stres korozyonu taneler arası yapıda olabileceği gibi taneler üstü yapıda da olabilir [21].

Stres korozyonunu önlemek için, ya stres korozyonuna dayanıklı malzeme kullanılmalı ya da korozif ortam etkisiz hale getirilmelidir. Stres korozyonunun en çok bilinen şekli, kazanlarda rastlanan kostik kırılmalıdır. Buhar kazanlarında kazan besleme sularının korozif etkinliğini azaltmak amacıyla suların alkali karakterde olması istenir. Bazı perçin boşluklarında kostiğin buharlaşması sonucu konsantrasyon artışı meydana gelir, bu bölgelerde çatlak oluşabilir [21].

2.9.12. Yorulmalı korozyon

Periyodik olarak yükleme – boşaltma şeklinde etkiyen dinamik bir stres altında bulunan bir metal zamanla yorulur. Yorulmuş halde bulunan metal, normalden daha küçük gerilmelerin etkisi ile çatlayabilir. Yorulma ve korozyonun birlikte etkisi metalin kısa sürede çatlamasına neden olur [21].

Korozyon olayı yorulma etkisi ile birlikte yürürse, parçalanma olayı yalnız başına yorulma, veya yalnız başına korozyon nedeniyle meydana gelen parçalanmadan daha kısa sürede gerçekleşir [21].

Korozyon söz konusu olmadan, yalnızca yorulma etkisi ile bir çok çeliğin çekme dayanımı normal dayanım değerinin yarısına kadar düşebilir. En büyük düşüş, tatlı su, tuzlu su ve rutubetli hava etkilerinin görülmesi halinde görülür. Düşük alaşımlı birçok süper kalite çelikler adi karbon çeliğinden yorulmalı korozyona daha az dayanıklıdır [21].

Yorulmalı korozyonun önlenmesinde ya korozyona daha dayanıklı malzeme kullanılmalı yada ortam koşulları iyileştirilmelidir. Bu amaçla inhibitörler veya katodik koruma düşünülebilir. Yorulmalı korozyonun etkisinin azaltılmasında tasarım aşaması da önemlidir [21].

2.9.13. Hidrojen kırılganlığı

Bir korozyon reaksiyonu sonucu veya katodik koruma uygulamasında metal yüzeyinde hidrojen atomları oluşur. Bunlar metal yüzeyinde adsorbe edilir. Yüzeyde toplanan atomların bir kısmı $H+H \rightarrow H_2$ şeklinde birleşerek hidrojen molekülü oluşturarak ortamdan uzaklaşır. Hidrojen atomların bir kısmı da metal bünyesine girerek metal içindeki boşluklara yerleşir. Daha sonra da bu hidrojen atomları hidrojen molekülü oluşturarak büyük bir hacim artışına neden olur. Hidrojen molekülünün metal içinden difüzlenme imkanı olmadığından metal boşluklarında büyük bir basınç yaparak metalin çatlamasına neden olur. Hidrojen atomu yalnız aşırı katodik koruma uygulamasında değil çeşitli olaylarla da meydana gelebilir. Örneğin, elektroliz veya ıslak elektrotlarla yapılan kaynaklarda oluşabilir [21].

2.9.14. Kaçak akım korozyonu

Bu tür korozyon olayına yeraltı ve sualtı yapılarında sıkça rastlanır. Herhangi bir doğru akım kaynağından yeraltına kaçan akımlar çevrede bulunan metalik yapılara

girerek korozyona neden olurlar. Örneğin bir yeraltı treni veya bir kaynak makinesi çevrede bulunan metalik yapılar üzerinde korozyona neden olabilir. Boru hattı zeminden daha iletken olduğu için kaçak akımlar boru hattına girmeyi tercih ederler. Akımın boru hattına girdiği bölgeler katot, akımın borudan çıktığı bölgeler anot olur ve korozyona uğrar. Kaçak akım korozyonunu önlemek için, öncelikle kaçak akımların yapıya girmesinin önlenmesi gerekir. Kaçak akım etkisi altında kalan bölgelere direnç konularak, kaçak akımların bu metal yoluyla taşınması sağlanır. Özellikle raylı taşıt araçlarından çevreye kaçan akımların çevredeki boru hatları üzerindeki korozyonunu önlemek için, boru hattı ile ray arasına ayarlanabilen bir direnç konularak kaçak akımların kontrollü bir şekilde bu metalik bağ üzerinden geçmesi sağlanabilir. Bu yolla hem korozyon önlenmiş, hem de gereksiz akım sarfiyatı azaltılmış olur [21].

2.9.15. Mikrobiyolojik korozyon

Mikrobiyolojik korozyon, bazı mikroorganizmaların korozyon hızını artırması ile olur. Mikroorganizmanın gelişmesi sürecinde asitler ve sülfürler oluşur. Bu bileşenler korozyon hızını artırır. Bazı hallerde mikroorganizmanın kendisi elektrokimyasal reaksiyona katılır. Sülfür bileşikler bakteriler tarafından elementsel kükürt veya sülfata kadar oksitlenebilir. Bazıları da bunun tersi reaksiyonu gerçekleştirir. Thiobacillus thio oxidans gibi bazı aerobik bakteriler, her çeşit sülfür bileşimini ve elementsel kükürdü sülfata oksitler. Reaksiyon sonucu sülfürik asit oluşur [21].



Anaerobik bakterilerden olan desulfovibrio bakterisi sülfatı indirger. Bu tür bakteriler hidrojeni kullanarak sülfat iyonlarını sülfür haline indirger.



Oluşan sülfür iyonları H_2S haline dönüşerek korozyon hızını artırıcı etki yapar. Bu nedenle mikrobiyolojik korozyon ürünlerinde daima sülfür bileşiklerine rastlanır. Normal de korozyon olayının rastlanmadığı yerlerde mikrobiyolojik korozyona çok ender rastlanır [21].

Mikrobiyolojik korozyonu önlemek için, pH derecesinin değiştirilmesi, aralıklı olarak dezenfeksiyon yapılması veya organo metalik metal bileşikleri kullanarak mikro canlıların öldürülmesi yoluna gidilir. Ancak bir çok mikroorganizma bu zehirleyicilere çok kısa zamanda adapte olabilir [21].

2.10. Korozyon Ölçüm Yöntemleri

2.10.1. Tafel ekstrapolasyon yöntemi

Korozyon, metal ile çözelti arasında karşılıklı iki elektrokimyasal reaksiyonun dengeye gelmesi sonucu oluşur. Reaksiyonlarından biri metalin çözünmesiyle oluşan anodik reaksiyon, diğeri ise çözelti ortamında bulunan O_2 veya H^+ ın indirgenmesi ile oluşan katodik reaksiyondur. Anodik reaksiyon sonucu açığa çıkan elektronlar katodik reaksiyonda indirgenmede kullanılır. Hem anodik hemde katodik tafel eşitlikleri Stern-Geary eşitliği ile birleştirildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir [21].

$$\dot{I} = i_{kor} \{ \exp[2.303(E - E_{kor})] - \exp[2.303(E - E_{kor})] \} \quad (2.17)$$

Burada:

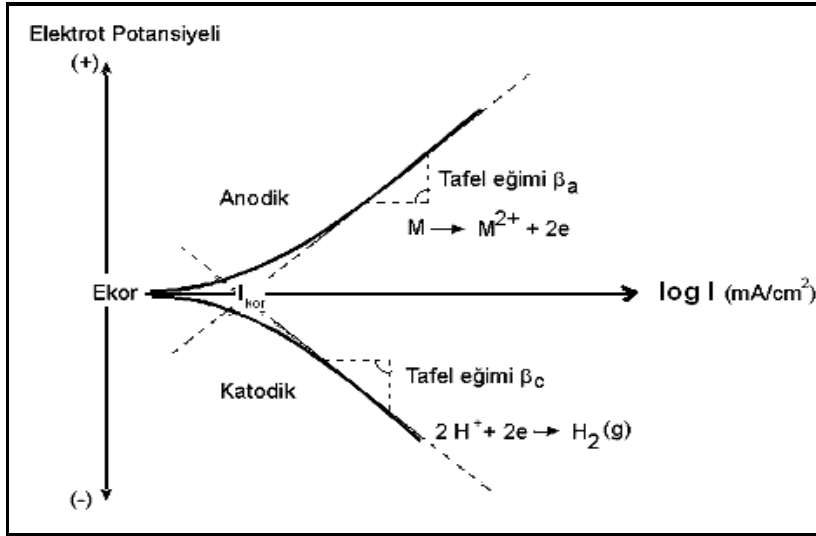
$\dot{I}$: Ölçülen hücre akımı, amper.

$\dot{I}_{kor}$: Korozyon akımı, korozyon hızının bir ölçüsü, amper.

E_{kor} : Korozyon potansiyeli, volt.

E : Elektroda uygulanan gerilim, volt.

β_a, β_c : Anodik ve katodik tafel katsayıları.



Şekil 2.4. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri

Şekil 2.4'te elektrokimyasal olarak elde edilen bir tafel polarizasyon diyagramı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi; E-logi polarizasyon eğrilerinde, uygulanan dış akım belirli bir değere eriştikten sonra polarizasyon eğrileri lineer hale gelmektedir. Aşırı gerilim ile uygulanan dış akımın logaritmasının lineer olarak değiştiği bu bölgelere tafel bölgesi denir. Bu bölgede tafel doğrusunun eğimi deneysel olarak elde edilerek korozyon hızının belirlenmesinde kullanılır. Korozyona uğrayan bir elektrotta anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda yürürler. Bu durumda elektrot potansiyeli bir karma potansiyel değerine (E_{kor} , korozyon potansiyeli) erişir. Bu potansiyele karşı gelen akıma da korozyon akımı (i_{kor}) denir [21].

Tafel ekstrapolasyonu yönteminde korozyona uğrayan metal için anodik ve katodik Tafel eğrileri elde edilir ve bunların çizgisel olan kısımları uzatılarak kesim noktalarından o sistem için korozyon hızı i_{kor} ve korozyon potansiyeli E_{kor} bulunur [21].

2.10.2. Çizgisel polarizasyon (polarizasyon direnci) yöntemi

Stern ve Geary aktivasyon polarizasyonu tarafından denetlenen bir sistemde, korozyon potansiyelinden uygulanan ΔE ($\pm 20\text{mV}$) potansiyel fark ile buna karşın devreden geçen ΔI akımı arasında şu eşitliği vermişlerdir [21].

$$\Delta E/\Delta I = \beta_a \beta_c / [2.303(\beta_a + \beta_c)] \quad (2.18)$$

Buradan $\dot{I}_{\text{cor}}$ çekilirse,

$$\dot{I}_{\text{cor}} = 1/R_p \{ [\beta_a \beta_c] / [2.303(\beta_a + \beta_c)] \} \quad (2.19)$$

Burada:

R_p : Polarizasyon direnci, $(dE/dt)_{i \rightarrow 0}$ polarizasyon eğrisinin eğimi

β_a : Anodik Tafel eğimi, $\beta_a = 2.303RT/\alpha_a ZF$

β_c : Katodik Tafel eğimi, $\beta_c = 2.303RT/\alpha_c ZF$

R gaz sabiti, T mutlak sıcaklık, α_a ve α_c anodik ve katodik transfer katsayılarıdır.

Transfer katsayıları, verilen elektrokimyasal kinetik bağıntıların deneysel olarak elde edilen akım- potansiyel eğrilerine uygunluklarını sağlamak için bağıntıya eklenen katsayılardır. Büyükleri genellikle 0,5 dir. Z, ilgili elektrot tepkimesi için elektron sayısını, F ise faradayı (96500 kulon) göstermektedir. E ile I arasındaki bağıntı gerçekte üstel bir bağıntıdır. Ancak, bazı ihmaller yapılarak şu denklem elde edilmiştir:

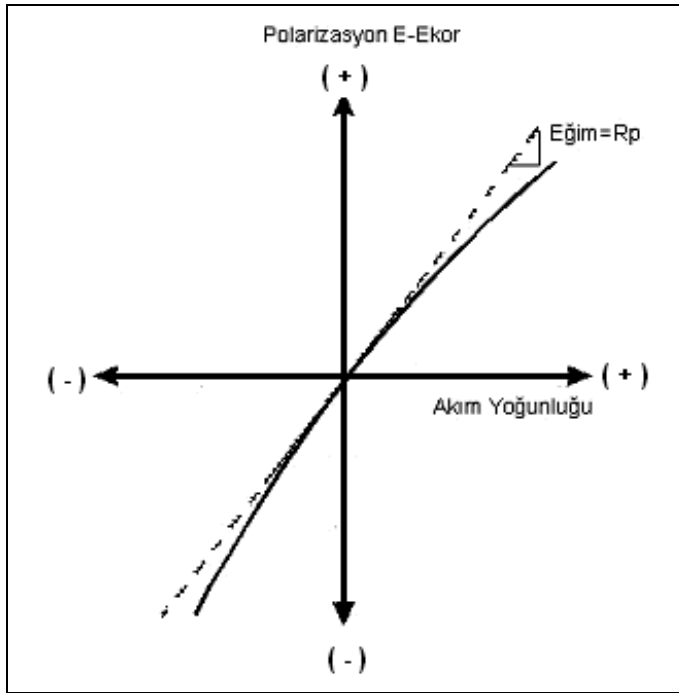
$$\Delta E/\Delta I = \beta_a \beta_c / [2.303(\beta_a + \beta_c)] \quad (2.20)$$

$\beta_a \beta_c / [2.303(\beta_a + \beta_c)]$ yerine B yazılarak denklem;

$$\dot{I}_{\text{cor}} = B \Delta I / \Delta E \text{ elde edilir.} \quad (2.21)$$

Çizgisel polarizasyon metoduyla elde edilen eğrinin korozyon akımı; uygun değerlerin denkleminde yerlerine konulması ile hesaplanabilir. Metodun kullanılmasında çok fazla yaklaştırma yapılır. Çok duyarlı sonuç istenmediği durumlarda β_a ve β_c değerleri 0,12 V alınarak B değeri 0,026 V kabul edilebilir. Daha duyarlı sonuçlar için β_a ve β_c polarizasyon eğrilerinden bulunmalıdır. Metot hem doğru akım hem de alternatif akım tekniğine göre uygulanabilir. Alternatif akım tekniğinde $\Delta E/\Delta I = R_p$ (hücre direnci veya empedansı) alınarak Eş. 2.21'de yerine konulursa $I_{cor} = B/ R_p$ 'den I_{cor} bulunur. Buradaki R_p (akım altındaki hücre direnci) Wheatstone köprüsüne benzer bir devreyle ölçülür [21].

Güç kaynağından değişken bir direnç yardımıyla çalışma elektrotu ile karşı elektrot arasında belirli potansiyeller uygulanarak bunlara karşılık gelen akım değerleri ölçülür. Bu şekilde çizilen $\Delta E-\Delta I$ eğrileri elde edilir (Şekil 2.5). Bu metotta uygulanan potansiyel değişme hızı 0,1-10 mV arasında olmalıdır. Potansiyel değişme hızı ne kadar yavaş olursa o kadar doğru sonuç elde edilir [21].



Şekil 2.5. Polarizasyon direnç yöntemiyle korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi

Eş. 2.21 ile bulunan korozyon akım yoğunluğu ile ağırlık azalması arasındaki bağıntı şu şekilde verilebilir.

$$I_{cor} = \Delta_m \cdot F \cdot n / \Delta t \cdot M_k \quad (2.22)$$

Burada Δ_m ağırlık azalması, F faraday, n korozyonu söz konusu olan metalin çözeltiye geçme değeri, M_k metalin atom gramının kütlesi, Δt zaman aralığı “ Eş. 2.21 ve Eş. 2.22 bağıntıları birleştirilerek

$$\Delta_m = B \cdot \Delta I \cdot \Delta t \cdot M_k / \Delta E \cdot F \cdot n \quad (2.23)$$

eşitliği elde edilir [21].

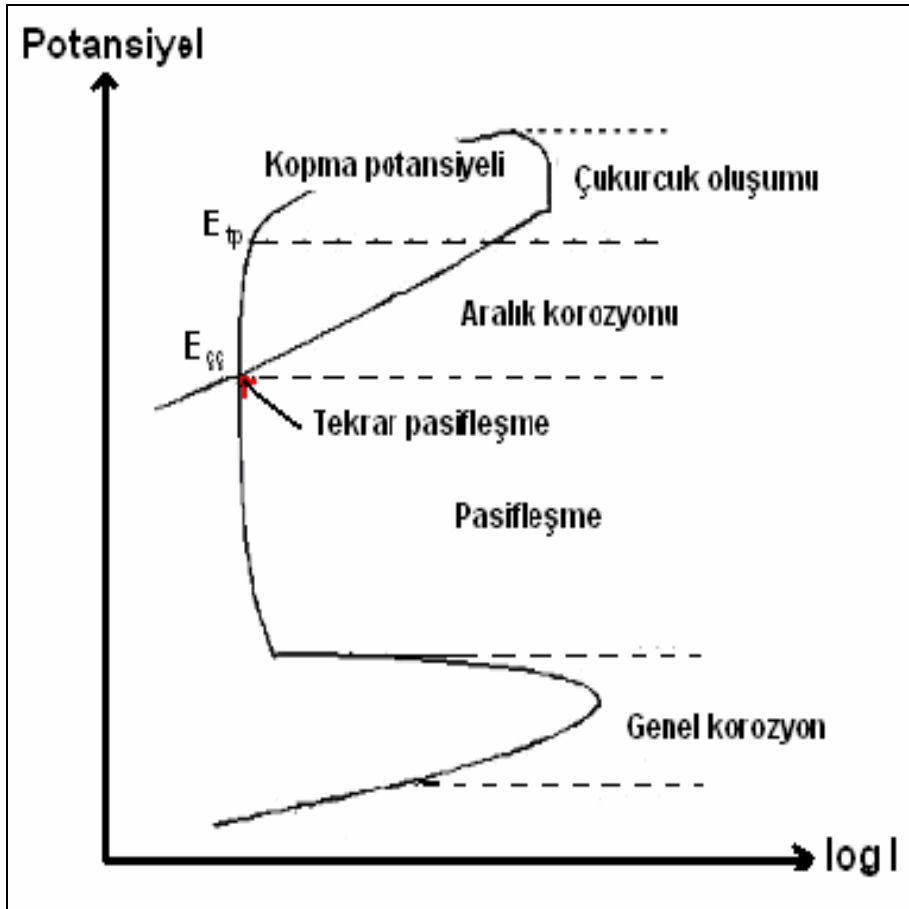
2.10.3. Potansiyodinamik metodu

Potansiyodinamik metod, elektrokimyasal bir sistemde metal ve alaşımların pasiflik davranışlarını incelemeye kullanılır. Potansiyodinamik tarama süresince metal yüzeyinde farklı birkaç kimyasal reaksiyon meydana gelebilir. Genelde anodik polarizasyonda; aktif, pasif, transpasif ve yeniden pasifleşme bölgeleri oluşur. Buradan metal veya alaşımlar için korozyon akımı, korozyon potansiyeli, pasifleşme kararlılığı hakkında genel anlamda fikir sahibi olunabilmektedir. Metalin pasif durumda veya polarize ederek pasifleştirilebileceği konusunda da fikir sahibi olunabilir. Pasif bölge akımı ve transpasif bölge potansiyeli belirlenerek pasifleşme ölçüsü ve pasif filmin kararlılığı hakkında bir kanıya varılabilmektedir. Kararlı hal için potansiyodinamik tarama hızı yeterince düşük olmalıdır [21].

2.10.4. Dönüşümlü polarizasyon

Dönüşümlü polarizasyonun çalışma prensibi dönüşümlü voltametri ile aynıdır. Dönüşümlü polarizasyon tekniği, korozif çözelti ortamında metal örneğinin çukurcuk korozyonu eğiliminin ölçüsünü nitel olarak belirlemek amacıyla kullanılır. Potansiyel

taraması korozyon potansiyelinden başlayarak anodik yönde yapılır. Ölçülen akımın ani artış gösterdiği veya belirli potansiyele ulaştığı potansiyelden katodik yönde geri tarama yapılır. İleri yöndeki taramada akımın ani artış gösterdiği potansiyele çukurcuk potansiyeli denir. Geri yöndeki tarama ile ileri yöndeki taramanın kesiştiği potansiyele koruma potansiyeli denir. Metal yüzeyinde çukurcuk oluşumu çukurlaşma potansiyelinin üzerinde başlar. Çukurcuk potansiyeli ile koruma potansiyeli arasındaki potansiyellerde yeni çukurcuklar oluşmaz ancak, daha önce oluşan çukurcuklar büyür. İleri yöndeki tarama eğrisi ile geri yöndeki eğri arasındaki farkın büyüklüğü çukurcuk oluşumunun eğilimini belirler. Fark ne kadar büyükse, çukurcuk oluşum eğilimi o kadar büyüktür. Aradaki fark ne kadar küçükse, oluşum eğilimi o kadar küçüktür. Koruma potansiyelinin çukurcuk oluşum potansiyelinden büyük olması durumunda çukurcuk eğilimi olmaz (Şekil 2.6) [21].



Şekil 2.6. Geri dönüşümlü polarizasyon eğrisi

2.10.5. Galvanik eşleşme

Galvanik korozyon tekniği bir metalin korozyona uğrayıp uğramayacağını kalitatif olarak anlamak için kullanılır. Korozyon ya da iletken bir ortama birbirine benzemeyen iki metal daldırıldığı takdirde aralarında genellikle bir potansiyel fark oluşur. Böyle iki metal birbirine bir iletkenle bağlandığında bu potansiyel farkından dolayı elektronlar birinden diğerine akar. Korozyona dayancı az olan metal anot, diğeri ise katot olur ve galvanik korozyon oluşur. Galvanik korozyonun ölçümünde kullanılan cihaz sıfır dirençli ampermetredir. Cihaz aynı anda iki elektrot arasında geçen akımı ve elektrot potansiyelini ölçer. Çalışma elektrotu ile karşı elektrot arasındaki akım veya akım yoğunluğunun ölçüsü galvanik korozyonun derecesini verir ve bu zamana karşı kaydedilir. Potansiyostat, karşı elektrot ile referans elektrotun birleştirilmesi sıfır dirençli ampermetreye dönüştürülebilir. Hem anot hem de katodun polarizasyon davranışından dolayı zamanla iki metal arasında farklı akımlar kaydedilecektir. Zamana karşı elde edilen akım grafiklerin yorumlanmasıyla galvanik korozyonun olup olmadığı hakkında kalitatif bilgi edinilebilir [21].

2.10.6. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi (eis)

Alternatif akım elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), özellikle kaplama yapılmış elektrokimyasal korozyon sistemlerinin kinetiğini aydınlatmada kullanılan bir araçtır. Korozyon kinetiği, korozyon mekanizması ve önemli fiziksel parametrelerin belirlenmesinde birçok yöntem uygulanmaktadır. EIS metal ile elektrolit ara fazının karakterizasyonunda kullanılır. EIS elektrokimyasal sistem içerisinde gerçekleşen kaplamanın aydınlatılmasında yardımcı olur. Potansiyostat, elektrolit içerisindeki örneğe hem dc potansiyel hem de buna ek olarak ac potansiyel uygular [21].

EIS kaplamanın değerlendirilmesinde, elektrokimyasal sistem içerisindeki yük taşınım unsurlarının aydınlatılmasında, korozyon mekanizması ve korozyon hızının belirlenmesinde faydalanılır [21].

2.11. Kaynak Araştırması

Sivaslı, korozyon riski olan bölgelerde puzolanlı çimento kullanmanın gerektiğini, çünkü puzolanlı çimento kliniklerin hidrolojisi sonucu oluşan kalsiyum hidroksit ile birleşerek betonarmenin boşluklarında kristalleşme meydana getirir ve betonun permeabilitesini azaltır. Puzolanlı çimento beton bünyesinde O_2 ve Cl iyonu difüzyonunu engellediğini ve korozyonu önlediğini söylemiştir [22].

Hızlandırılmış deneylerde % 10-20 oranlarında katılan SD ile korozyon başlangıcının önemli ölçüde geciktirildiğini gözlemlemiştir [23].

SD katkısı sodyum klorür çözeltilerine karşı çelik donatı korozyonu üzerinde olumlu etki yapmaktadır. Ancak, karışımda tuz çözeltisi bulunması durumunda veya magnezyum klorür çözeltilerine karşı olumlu etkiden söz etmek zordur [24, 25].

Yüzer, SD'nin klorür difüzyonuna maruz betonarme elemanların performansını artırdığını, klorür iyonlarının betona üretim aşamasında karışması durumunda ise donatı korozyonunu hızlandırdığını tespit etmiştir. Donatı korozyonu hızlandırılan numunelerin aderans dayanımında önemli kayıplar olduğunu belirlemiştir [12].

Hoşhan, çeliğin beton içindeki korozyon hızını üç elektrot yöntemini kullanarak ölçmüştür. Klorsuz normal beton örnekleri üzerinde yapılan deneylerle çeliğin 1 gün, 7 gün, 28, 60 ve 90 gün sonundaki korozyon hızları tafel ekstrapolasyon ve lineer polarizasyon yöntemleriyle belirlemiştir. Ayrıca her beton numunesinin korozyon potansiyel değerleri ölçülerek bunun zamana göre değişimini incelemiştir. 90 gün sonunda lineer polarizasyon yöntemiyle normal beton örnekleri içindeki çeliğin korozyon hızını $0,07 \mu A / cm^2$ (0,033 mil/yıl) olarak bulmuştur. Bileşiminde $6 kg / m^3$ klorür içeren beton örnekleri içindeki çeliğin korozyon hızını ise $0,94 \mu A / cm^2$ (0,44 mil/yıl) olarak ölçmüştür. Bu değer normal betona göre 13 kat daha büyük olduğunu belirtmiştir [26].

Aköz ve Yüzer çalışmalarında, SD'nin betonun klorür geçirimliliğini azalttığını, elektriksel direncini ve elemanın dayanıklılığını artırdığını tespit etmişlerdir. Klorür difüzyonuna maruz betonlarda, beton içinden geçen akım miktarı daha yüksek değerler almış, SD katkılı betonlar, yaklaşık kuru betonun gösterdiği direnci göstermiştir. Klorür geçirimliliği son derece düşük ve elektriksel direnci çok yüksek olan silis dumanı katkılı betonlar, donatıda makro ve/veya mikro korozyon hücrelerinin oluşmasını önleyerek elemanın dayanıklılığına olumlu etki yaptığını bulmuşlardır [27].

Güvercin, % 10 SD katkılı çimentonun basınç dayanımını artırdığını gözlemiştir. 3 günlük basınç dayanım kontrol numunesinden düşük olan SD'nin 7 günlük basınç dayanımı % 0,90, 28 günlük basınç dayanımı %1,35, 90 günlük basınç dayanımı % 3,2 oranlarında artış olmuştur. % 20 ve % 30 oranlarında katkılı çimentoların basınç dayanımının düştüğünü belirtmiştir [28].

Güvercin, SD'nin çimentoda % 10 oranında kullanılmasının çimentonun sıklığını artırdığını yaptığı ultrason ölçümleri sonucunda gözlemlemiştir [28].

Beton içindeki çeliğin statik potansiyel değeri (Açık devre yarı hücre potansiyeli) ile korozyon hızı arasında bir bağıntı olduğunu ileri sürerek betonarme demirleri pasifleştikçe, potansiyel değerlerinin pozitif yöne doğru kaymakta olduğunu ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar ağırlık kaybı yöntemi ile yapmış oldukları deneylerde, su/çimento oranı azaldıkça ve çimento/kum oranı arttıkça betonarme demirlerinin korozyon hızının azalmakta olduğunu belirlemişlerdir [29].

Erdoğan ve diğ., SD kullanılan katkılı çimento ile üretilen betonun basınç dayanımına etkisi Portland çimentosu ile üretilen betonun basınç dayanımı ile karşılaştırmalı olarak incelemiştir. PÇ 42,5 ve KÇ 32,5 olmak üzere iki tip çimento kullanılmıştır. Sıı-bağlayıcı oranı 0,60, toplam bağlayıcı 300, 350, 400 kg/m³ olacak şekilde çimento miktarının % 9 ve % 18 oranında SD ilave ederek betonlar üretmiş ve 7 ile 28 günlük basınç dayanımlarını incelemiştir. SD'nin % 9 oranında kullanımı

ile 7 günlük basınç dayanımları % 50, 28 günlüklerde ise % 18 oranında SD kullanımı ile % 60 dayanım artışları olmuştur [30].

Çelik ve Değirmenci çalışmalarında SD ile hazırlanmış harç numunelerinde SD oranı arttığında; su emme değerinin azaldığını, basınç, eğilme ve yapışma dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir [31].

Papadakis yaptığı çalışmada, beton içerisinde SD aktivitesini belirlemeye çalışmış. kum veya çimento yerine SD belli oranda katılarak ve SD'siz kontrol numuneler üretilmiştir. SD katılmasıyla dayanımlarda artmıştır. Porozite ve bağlanmış su içeriği aynı kalmıştır. Ara dönemlerde CH ve SD taneleri reaksiyonları nedeniyle düşük bağlayıcı su içeriği ve daha yüksek porozite gözlenmiştir. Deney sonuçları kullanılarak SD'li betonun davranışını veren sayısal model geliştirilmiştir. Bu model SD içeren çimentonun kimyasal ve hacimsel kompozisyonunun tahmini sayısal ifadeleri kapsar. Bu karakteristikleri (CSH, CH, H içeriği, porozite) bilmek dolaylı yoldan betonun dayanım ve dayanıklılığını bulmayı sağlar [32].

Duval ve Kadri yaptıkları çalışmada, yüksek performanslı betonun işlenebilirliği ve basınç dayanımına SD'nin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla çimento yerine % 30'a kadar SD ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. % 10 SD katılması işlenebilirliği azaltmamaktadır. Düşük su-çimento oranı için çökme kaybı SD'ye bağlı olarak artar. Su-çimento oranı arttıkça çökme kaybı SD içeriğine bağlı olarak azalır. SD katılmasıyla basınç dayanımının arttığı fakat bu artışın kontrol betonlarına göre % 15'i geçmediği görülmüştür [33].

Cohen ve Bentur yaptıkları çalışmada, Portland çimentosu ve SD karışımlarının magnezyum sülfat ve sodyum sülfat dayanıklılığı incelenmiştir. SD ilavesi ile geçirgenliğin azalması, puzolanik aktivite nedeniyle sertleşmiş çimento hamurunun sodyum sülfat tesirine dayanıklılığı artmakta magnezyum sülfat tesirine karşı dayanıklılığı değişmemektedir [34].

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Çalışmada materyal olarak agrega, çimento, silis dumanı ve betonarme çeliği kullanılmıştır. Tüm materyaller ilgili TS’de verilen özelliklere uygun seçilmiştir. Araştırmada kullanılan materyallerin özellikleri hakkında gerekli açıklamalar veya açıklamaların bulunduğu kaynaklar aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Beton karışımlarında Ankara’da Set Çimento fabrikasından temin edilen CEM I PÇ 42,5 ve CEM II PKÇ 32,5 çimentoları kullanılmıştır. TS EN 197-1 [19]. Çizelge 3.1’de çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri görülmektedir

3.1.2. Agregalar

Numunelerin üretilmesinde kullanılan 0/4 ve 4/16 tane sınıfı doğal kırmataş agregalar, Set Beton firmasından temin edilmiştir. Agregalar, TS 3530 EN 933-1 tane dağılımı [35], TS 3529 birim ağırlık [36], TS 3526 özgül ağırlık ve su emme oranı [37], TS 3523 yüzey nemi oranı [38], TS 3527 ince madde oranı [39], TS 3528 hafif madde oranı [40] deneylerine tabi tutularak kullanılmıştır (Çizelge 3.2).

Kullanılan agreganın tane dağılımı Çizelge 3.3’te, tane dağılımı eğrisi ise Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

3.1.3. Karışım suyu

Beton karışım suyu olarak Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Ayrıca elektrokimyasal korozyon ölçümleri için, hazırlanan numunelerin karışım suyuna % 3,5 oranında kaya tuzu katılmıştır.

Çizelge 3.1. Çimentoların fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

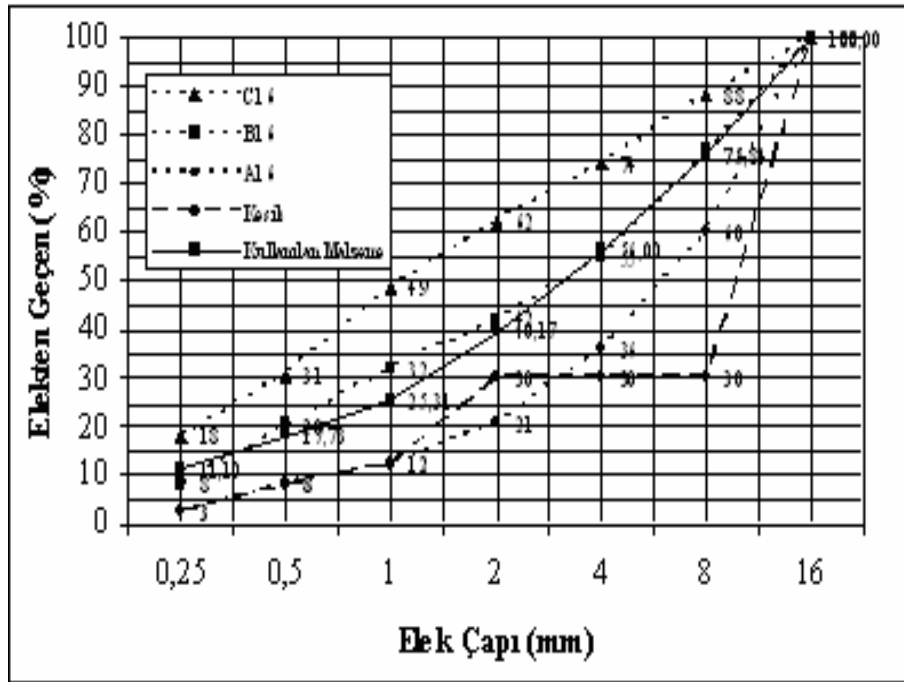
Kimyasal Analizler				
Oksit (%)	PÇ 42,5		PKÇ 32,5	
CaO	63.73		47,31	
SiO ₂	20.18		31,37	
Al ₂ O ₃	5.35		8,07	
Fe ₂ O ₃	3.41		3,49	
MgO	1.56		1,58	
SO ₃	2.59		2,36	
K ₂ O	0.78		1,16	
Na ₂ O	0.80		0,99	
Fiziksel Özellikler				
	PÇ 42,5		PKÇ 32,5	
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,11		2,95	
Blaine (incelik) modülü (cm ² /gr)	3977		4290	
Su içeriği (%)	27,6		28,4	
Priz başlama süresi (saat)	1,15		2,35	
Priz sona erme süresi (saat)	2,25		3,50	
Mekanik Özellikler				
Çimentonun Basınç Dayanımları (MPa)				
	1 gün	2 gün	7 gün	28 gün
PKÇ 32,5 R	10,9	19,7	29,5	36,7
PÇ 42,5	17,9	28,4	38,8	48,4
Çimentonun Eğilme Dayanımları (MPa)				
	1 gün	2 gün	7 gün	28 gün
PKÇ 32,5 R	2,7	3,9	5,0	6,3
PÇ 42,5	4,5	5,3	6,6	7,8

Çizelge 3.2. Agregaların fiziksel özellikleri

Deney Adı		0-4 mm	4-16 mm	Standart
Birim Ağırlık (kg/dm³)	Gevşek	1,786	1,473	TS 3529
	Sıkışık	1,999	1,606	
Özgül Ağırlık (kg/dm³)		2,600	2,400	TS 3526
Su Emme Oranı (%)		2,3	1,0	TS 3526
Yüzey Nemi Oranı (%)		1,3	0,7	TS 3523
İnce Madde Oranı (%)		1,655	0,485	TS 3527
Organik Madde Oranı (%)		Yok	-	TS.EN 1744-1
Hafif Madde Oranı (%)		0,15	-	TS 3528

Çizelge 3.3. Kullanılan agreganın tane dağılımı (TS 3530 EN 933 – 1)

Standart Elekler (mm)	Elekten geçen miktar (%)
16	100
8	75,84
4	56
2	40,17
1	25,31
0,5	17,73
0,25	11,1
Pan	-
Toplam	-



Şekil 3.1. Kullanılan agreganın tane dağılımı eğrisi

3.1.4. Silis Dumanı

Beton karışımına katılacak olan SD, Antalya'da Etibank Elektrometalurji A.Ş. tesislerinden temin edilmiştir. SD'nin kimyasal bileşimi Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. SD'nin kimyasal bileşimi

Oksit	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Kızdırma Kaybı
(%)	94,98	1,24	0,21	0,00	0,16	0,72	0,35	0,10	1,22

TS EN 197 - 1 Portland silis dumanlı çimento üretiminde kullanılacak SD'nin bileşimi konusunda aşağıdaki sınırları getirmektedir.

Amorf SiO₂ = en az % 85
Kızdırma Kaybı = en fazla % 4

✓ Standartta belirtilen sınır değerlerini dikkate aldığımızda, temin edilen SD'nin beton yapımına uygun olduğu görülmüştür [16, 41].

3.1.5. Betonarme çelik (çalışma elektrotu)

Korozyon ölçümleri için kullanılacak olan TS 708'e uygun BÇ III A, Φ10 nervürlü betonarme çeliği, Samsun Yeşilyurt Demir Çekme San. Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Betonarme çeliği 135 mm uzunluğunda kesilmiştir. Bir ucu çapı 8 mm ve boyu 10 mm olacak şekilde tornalanarak mekanik olarak temizlenmiştir. Tüm çelik çubuklar aynı pürüzlük katsayısında tornalanmıştır. Çeliğin diğer ucunda, 1 mm genişliğinde ve derinliğinde yiv açılmıştır. Korozyon ölçümlerini yapabilmek için açılan bu yive yumuşak bakır tel bağlanmıştır. Daha sonra çelikler, tornalanan kısım boyanmayacak şekilde önce antipas boya daha sonra epoksi boya ile boyanmıştır. Tornalanan kısım ile boyanan kısmın birleştiği yerde kabuk altı korozyonu oluşmaması için bu kısma itina gösterilmiştir. Şekil 3.2'de kullanılan betonarme çeliğinin boyutları görülmektedir. Kimyasal bileşimi ise Çizelge 3.5'te verilmiştir.

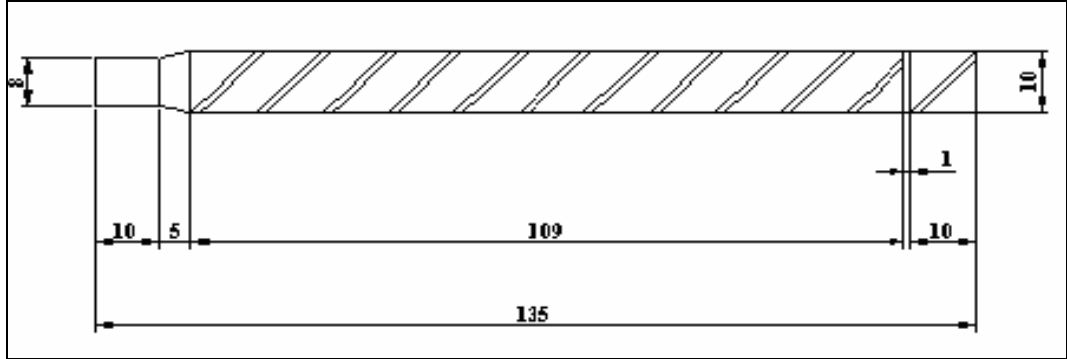
Boyama işi bittikten sonra açık olan kısmın alanı:

$$A = \pi r^2 + 2\pi r h$$

$$A = 3,14(4)^2 + 2(3,14)(4)(10) = 301,44 \text{ mm}^2$$

$A = 3,01 \text{ cm}^2$ olarak hesaplanmıştır.

Elektrokimyasal korozyon hesaplamalarında çalışma elektrotunun alanı $3,01 \text{ cm}^2$ olarak kullanılmıştır



Şekil 3.2. Kullanılan betonarme çeliğin boyutları

Çizelge 3.5. Deneylerde kullanılan betonarme çeliğin kimyasal bileşimi

Oksit	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Cu	% Ni	% N	% Fe
(%)	0,19	0,20	0,80	0,026	0,048	0,07	0,29	0,14	0,010	98,226

3.2. Metot

Bu çalışmada basınç dayanımları için 100 mm lik standart küp beton numuneler, elektrokimyasal korozyon ölçümleri için 50x100 mm lik özel silindir betonarme numuneler üretilmiştir.

SD'nin etkisini belirlemek için PÇ 42,5 çimentosuna ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında SD ikame edilerek SD katkılı betonlar üretilmiştir.

Beton karışım hesapları TS 802 "Beton karışım hesap esasları" Türk standardına göre yapılmıştır [1].

Beton ve betonarme numunelerinin üretiminde beton sınıfı olarak C 25, TS 802 B eğrisi seçilmiştir. Basınç dayanımı numuneleri için agrega tane çapı $D_{max} = 16 \text{ mm}$, elektrokimyasal ölçümler için üretilen numunelerde ise $D_{max} = 8 \text{ mm}$ seçilmiştir.

3.2.1. Basınç dayanımları için numune üretimi

TS 802'ye uygun beton karışım hesabı yapılarak, karışıma giren malzeme miktarları belirlenmiştir (Çizelge 3.6). Standartlara uygun hazırlanan malzemeler ile taze betonlar üretilip 100 mm'lik küp kalıplara iki eşit tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her tabakaya standart şiş çubukla 25 defa kenarlardan ortaya doğru dairesel olarak düşey şişleme yapılmıştır. Şişleme sırasında çubuk birinci tabakada tabana temas etmesine, ikinci tabakada ise bir önceki tabakaya yaklaşık 2,5 cm girmesine çalışılmıştır. Yerleştirme ve şişleme işlemlerinden sonra tokmakla sağlı sollu ve değişik şiddetlerde tokmaktama yapılmıştır. Kalıplarda bir gün süreyle bekleyen numuneler daha sonra kalıplardan çıkarılarak kür havuzunda $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta basınç dayanımı deney gününe kadar kür edilmiştir [42].

Çizelge 3.6. Üretilen betonların malzeme miktarları (1 m^3 için)

Basınç Dayanımı Numuneleri İçin					
Beton Çeşidi	Agrega (kg)		Çimento (kg)	SD (kg)	Su (kg)
	İnce	İri			
PÇ 42,5	1036,20	751,54	315,09	0	167
% 5 SD	1036,20	751,54	299,34	15,75	167
% 10 SD	1036,20	751,54	283,58	31,51	167
% 15 SD	1036,20	751,54	267,83	47,26	167
Elektrokimyasal Korozyon Ölçümü Numuneleri İçin					
Beton Çeşidi	Agrega (kg)		Çimento (kg)	SD (kg)	Su (kg)
	İnce	İri			
PÇ 42,5	1278,94	414,79	358,49	0	190
% 5 SD	1278,94	414,79	340,57	17,92	190
% 10 SD	1278,94	414,79	322,64	35,85	190
% 15 SD	1278,94	414,79	304,72	53,77	190

3.2.2. Basınç dayanımı deneyi

Numune, deney makinesine yerleştirilmeden önce yükleme başlıklarının yüzeyleri silinerek temizlenmiş ve numunenin başlıklarla temas edecek yüzeyleri taneciklerden arındırılmıştır. Gerekğinde deney numunesi ve deney makinesinin yükleme başlığı arasında, aralık ayarlama blokları veya plakalar kullanılmıştır. Küp numuneler, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak konumda yerleştirilmiştir [43].

Beton basınç dayanımlarının belirlenmesinde aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$f_c = F/A_c \quad (3.1)$$

Formülde,

f_c = Basınç dayanımı, MPa

F = Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A_c = Numunenin en kesit alanı, mm²

ifade etmektedir.

3.2.3. Elektrokimyasal ölçümler için numune üretimi

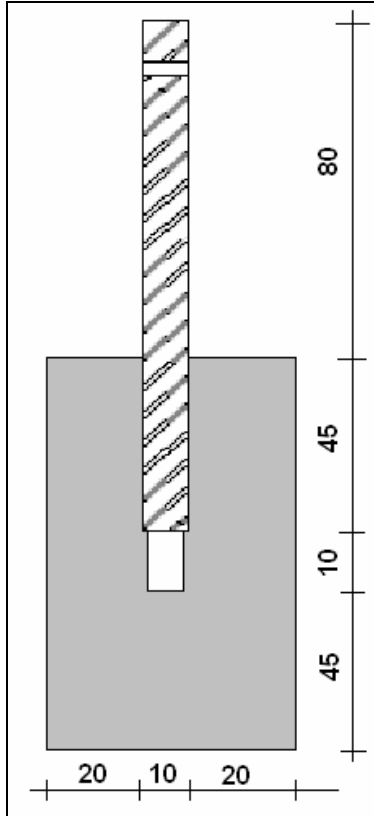
Elektrokimyasal ölçümler için üretilen numuneler 50x100 mm'lik silindir numunelerdir. Beton karışım hesabında, basınç dayanımları için üretilen betonlardan farklı olarak $D_{max} = 8$ mm seçilmiştir. TS 802'ye uygun beton karışım hesabı yapılarak, karışıma giren malzeme miktarları belirlenmiştir (Çizelge 3.6). Standartlara uygun hazırlanan malzemeler ile taze betonlar üretilip 50x100 mm'lik silindir özel kalıplara (Resim 3.1) uygun bir şişleme tekniğiyle yerleştirilmiştir. Kalıbın ortasına Şekil 3.2'de boyutları verilen betonarme çeliği, silindir numunenin tam ekseninde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Betonarme çeliğinin beton içindeki durumu Şekil 3.3'te verilmiştir. Farklı oranlarda SD katılarak üretilen betonarme numuneler Resim 3.2'de görülmektedir.



Resim 3.1. Betonarme numune üretimi için hazırlanan kalıp düzeneği



Resim 3.2. Üretilen betonarme numuneler



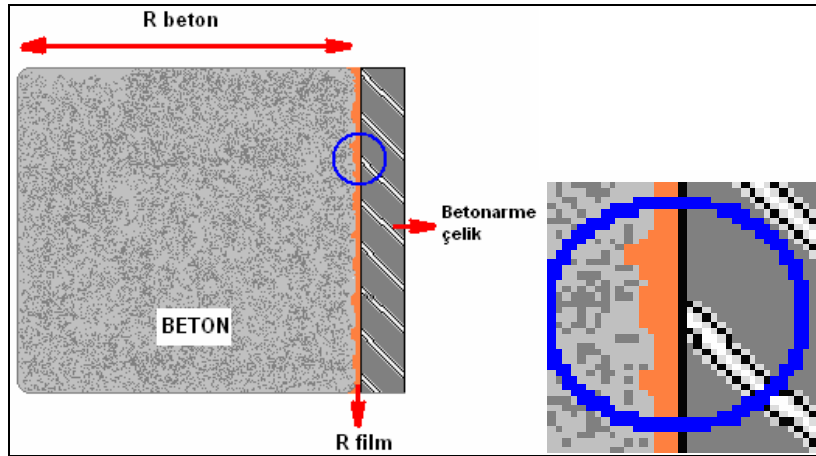
Şekil 3.3. Betonarme çeliğinin beton içindeki durumu

3.2.4. Betonarme çeliğinde elektrokimyasal korozyon belirlemede temel prensip

Betonarme çeliği korozyonunun elektrokimyasal ölçüm parametreleri başlıca R (direnç), E (potansiyel), ve I (akım) değerleridir. Bu değerler ıslak ve kuru betonlar için büyük değişimler gösterir. İletken ve sulu ortamda bulunan bir betonarme çeliğinin korozyon özelliklerini anlamak için I, R ve E değerlerini kapsayan ohm kanunundan yararlanılabilir.

Betonarme çeliği korozyonu aşağıda verilen birçok faktörlere bağlıdır. Bunlar:

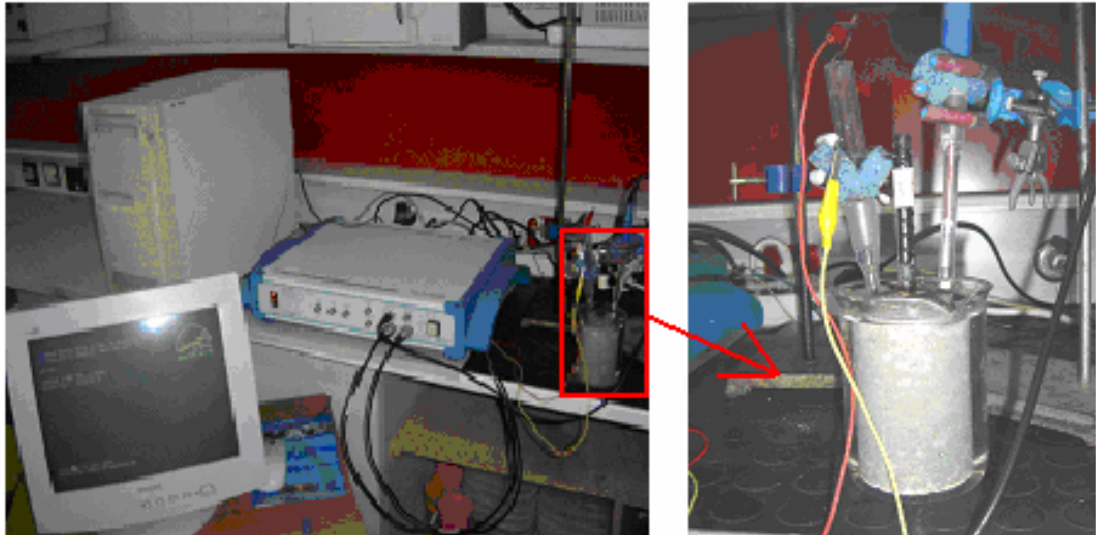
- ✓ Çeliğin alışım özelliği ile genel korozyondan çok lokalize korozyona uğrama eğilimi
- ✓ Çeliğin üzerinde oluşan, zamana ve çevreye göre farklı korozyon dirençleri gösteren farklı çözünürlükteki ince filmler (oksit, oksit klorür, vb.)
- ✓ Çeliğin üzerinde kalın bir tabaka oluşturarak çeliği çevre etkisinden önemli ölçüde koruyan beton tabakası (paspayı)
- ✓ Çevredeki nem ve çeşitli kimyasalların etkisi ile beton ve oksit filminin direncinde büyük değişiklikler olması



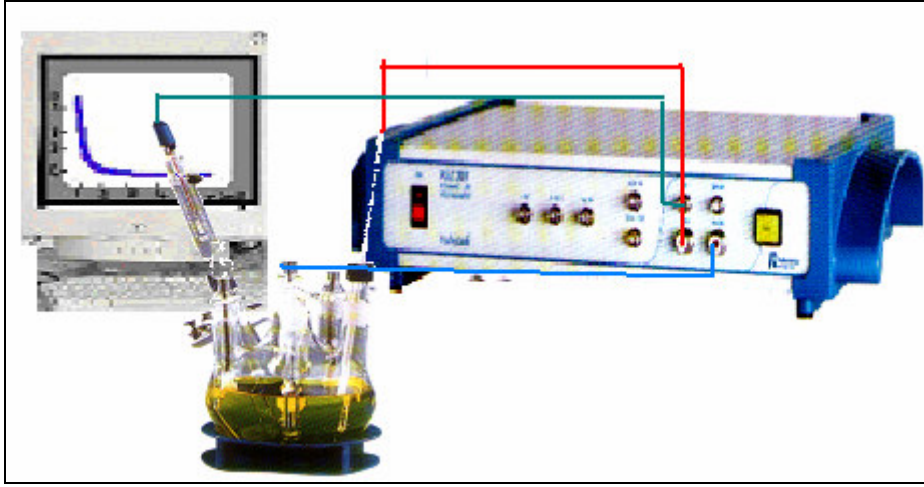
Şekil 3.4. Bir betonarme numunesinde, çeliğin korozyon özelliklerini belirleyen bölgelerin şematik gösterimi

3.2.5. Betonarme çeliğinde elektrokimyasal korozyon parametrelerinin belirlenmesinde üç elektrotlu ölçüm teknikleri (galvanostatik, potansiyostatik, potansiyodinamik yöntemler)

Bu tekniğe göre çalışma elektrotu olarak, korozyonu ölçülecek betonarme çeliği ; karşıt elektrot olarak platin ve karşılaştırma elektrotu olarak ta doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Betonarme çeliği korozyonu ölçüm düzeneği Resim 3.3'te görülmektedir. Bu düzende elde edilen potansiyostatik ve galvanostatik yöntemlerde yarım hücre potansiyelleri (açık devre potansiyelleri) ve bu potansiyellerde yüzeyden geçen akımlar belirlenmiştir. Bu ölçümler tahribatsız elektrokimyasal ölçümler olarak alınmıştır. Potansiyodinamik yöntemde karşıt elektrot ile çalışma elektrodu arasına belirli tarama hızında potansiyel uygulanıp devreden geçen akımlar bilgisayar kontrollü olarak takip edilmiştir (Tahribatlı yöntem). Betonsuz çeliklerin korozyon özelliklerini belirlemek içinde Resim 3.8'deki potansiyostat cihazı kullanılmıştır. Farklı betonarme numune grupları için elde edilen veriler bölüm 4.2'de değerlendirilmiştir.



Resim 3.3. Betonarme çeliği korozyonunu belirlemek için kullanılan üç elektrotlu sistem



Şekil 3.5. Çözeltideki çeliğin korozyon özelliklerinin incelendiği üç elektrotlu sistem

3.2.6. Deney çalışmalarında kullanılan cihaz ve ekipmanlar

Beton basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan deney cihazı

Basınç dayanımı deneyi için maksimum 3 000 kN yükleme kapasiteli, dijital kumanda üniteli ve yükleme hızı ayarlanabilen Ele marka tek eksenli beton basınç test cihazı kullanılmıştır.

Korozyon deneylerinde ise, potansiyostat cihazı, referans elektrot ve karşı elektrot kullanılmıştır.

Potansiyostat cihazı

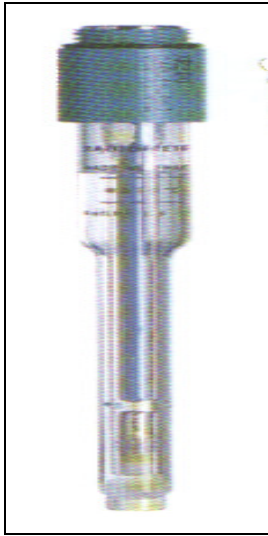
Voltametrik ölçümler, Volta Master 4 programı ile bilgisayar kontrollü Voltalab 40 PGZ 301 model potansiyostat cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Referans Elektrot

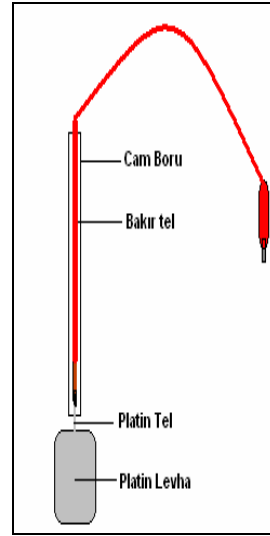
Referans elektrot olarak doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır (Resim 3.4).

Karşı Elektrot

Karşı elektrot olarak $1,8 \text{ cm}^2$ 'lik yüzey alana sahip platin levha kullanılmıştır. Platin levhaya bir platin tel kaynatılarak bakır tele lehimlenmiştir. Platin tel üzerinde cam eritilerek bakır telin çözeltiyle teması kesilmiştir (Şekil 3.6).



Resim 3.4. Referans elektrot



Şekil 3.6. Karşı elektrot

Çalışma elektrodu

Şekil 3.2'de boyutları ve Çizelge 3.5'te kimyasal bileşimi verilen betonarme çeliği kullanılmıştır.

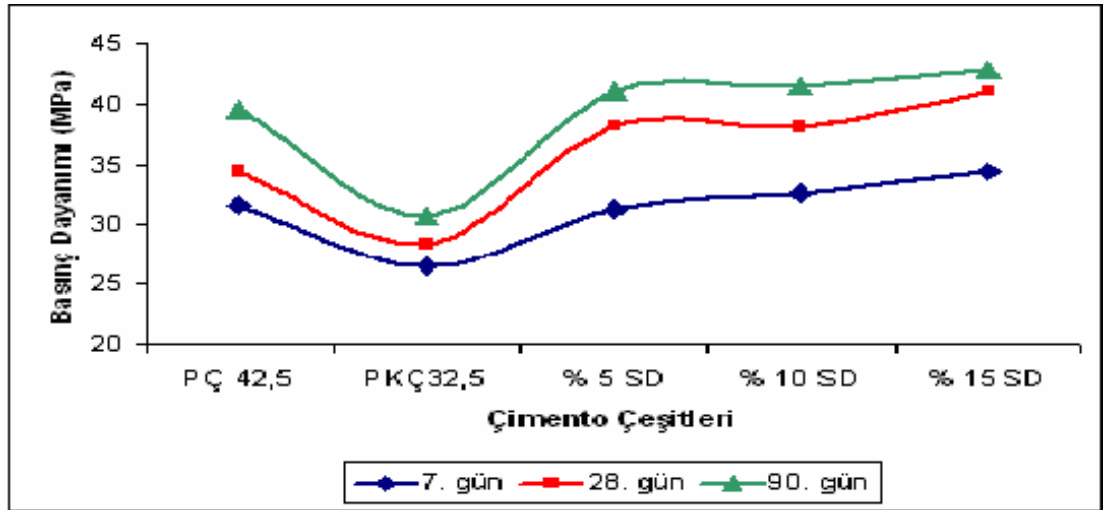
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Basınç Dayanımları

Farklı oranlarda SD katılarak üretilen betonların 7, 28 ve 90. günlerindeki basınç dayanımı deneyi sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Basınç dayanımlarının günlere ve karışım oranlarına göre ilişkisi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Basınç dayanımı deneyi sonuçları

Beton Çeşidi	Basınç Dayanımları (MPa)		
	7 gün	28 gün	90 gün
PÇ 42,5	31,62	34,37	39,52
PKÇ 32,5	26,43	28,44	30,73
%5 SD	31,37	38,30	41,01
%10 SD	32,72	38,15	41,45
%15 SD	34,40	41,05	42,78



Şekil 4.1. Basınç dayanımlarının günlere göre değişimi

Basınç dayanımları sonucunda aşağıdaki verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- ✓ En düşük basınç dayanımı 26,43 MPa sonuçla, 7. günde PKÇ 32,5 çimentosuyla üretilen beton grubunda görülmüştür.
- ✓ En yüksek basınç dayanımı 42,78 MPa sonuçla, 90. günde %15 SD katkılı beton grubunda görülmüştür.
- ✓ SD oranı arttıkça basınç dayanımları genel olarak artmaktadır.
- ✓ 7 günlük basınç dayanımında en yüksek sonucu PÇ 42,5 çimentosu ile üretilen betonlar vermiştir. Diğer günlerde ise en yüksek değeri % 15 SD ile üretilen betonlar vermiştir.
- ✓ PKÇ 32,5 çimentosu ile üretilen beton grubu, tüm günlerde en düşük basınç dayanımı göstermiştir
- ✓ SD ikameli betonlar PKÇ 32,5 dan daha yüksek dayanımlar göstermiştir. Bu durum SD atığı kullanılan betonların performansının PKÇ 32,5 dan daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu sonuç SD'nin hidratasyon sonucunda açığa çıkan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girmesi ile meydana gelen ilave bağlayıcı bileşikler ile açıklanabilir.
- ✓ Elde edilen bu sonuçlar literatürle de uyum göstermektedir.

4.2. Elektrokimyasal Bulgular

Bir metalin korozyon eğilimi ve korozyon türü, o metalin özellikle kimyasal çevresi ile yakından ilişkilidir. Metalin farklı bölgelerinden farklı kimyasal bileşimler içeren mikro çevreler ile teması, korozyon özelliklerinin de farklılaşmasına sebep olur. Korozyonun aynı bir metal üzerindeki farklı bölgelerde farklı hızlarda gelişmesi ise lokalize korozyon olarak ortaya çıkar. Lokalize korozyonun en yaygın türü olan çukur korozyonuna özellikle çeliklerde çok rastlanır.

Kompozit bir malzeme olan beton, betonarme çeliğinin mikro çevrelerinde gösterdikleri farklı yapılanmalara ve boşluk oranına bağlı olarak temas ettikleri küçük bölgelerde elektrokimyasal yoldan lokalize korozyonu başlatırlar. Numunenin iklim ve çevre koşullarına bağlı olarak ortam değiştirmesi (havalı, rutubetli, sulu vb.)

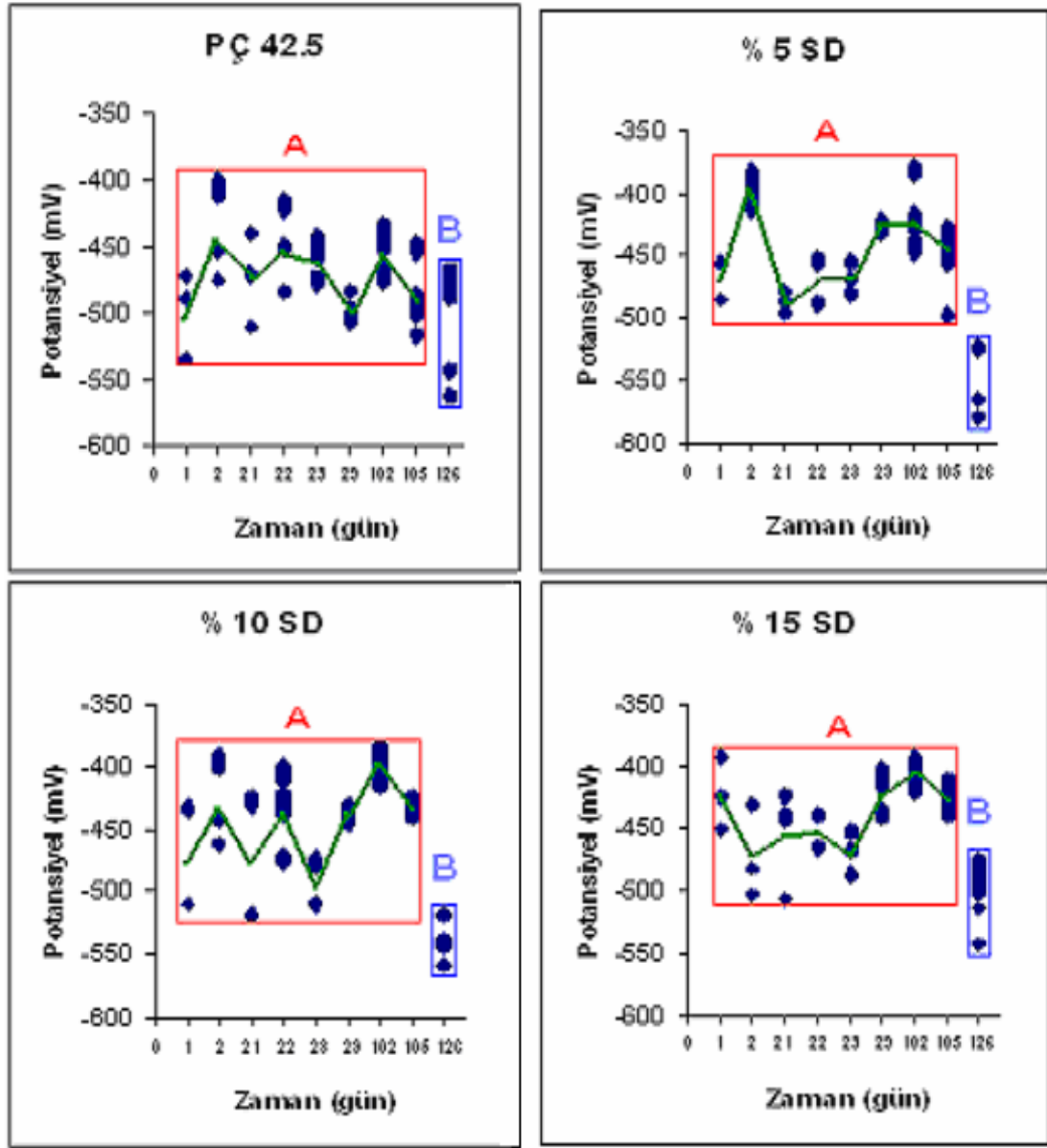
malzemenin kompozit özelliğine bağlı olarak başlayan lokalize korozyonunun hızlanarak devam etmesine ve servis ömrünün kısılmasına yol açar.

4.2.1. SD katkılı betonarme numunelerin sulu ortamdaki korozyonunun tahribatsız elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi

Şekil 4.2’de farklı miktarlarda SD içeren betonarme numunelerin 195 gün %3,5’luk tuzlu suda beklemesi sonucu ölçülen açık devre potansiyellerinin (ADP, yarı hücre potansiyeli) zamana göre dağılımları görülmektedir.

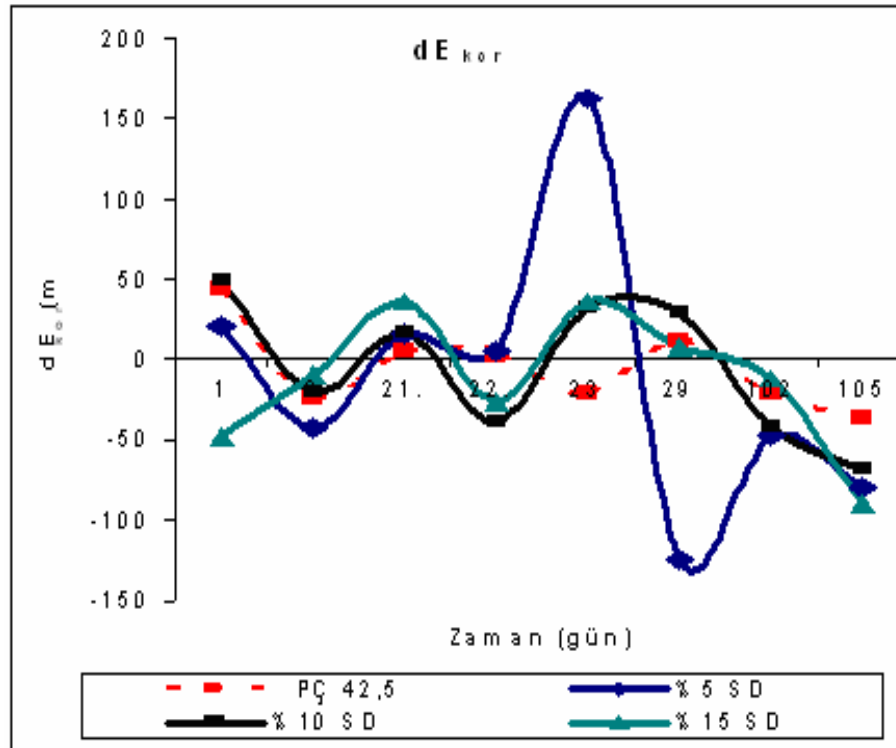
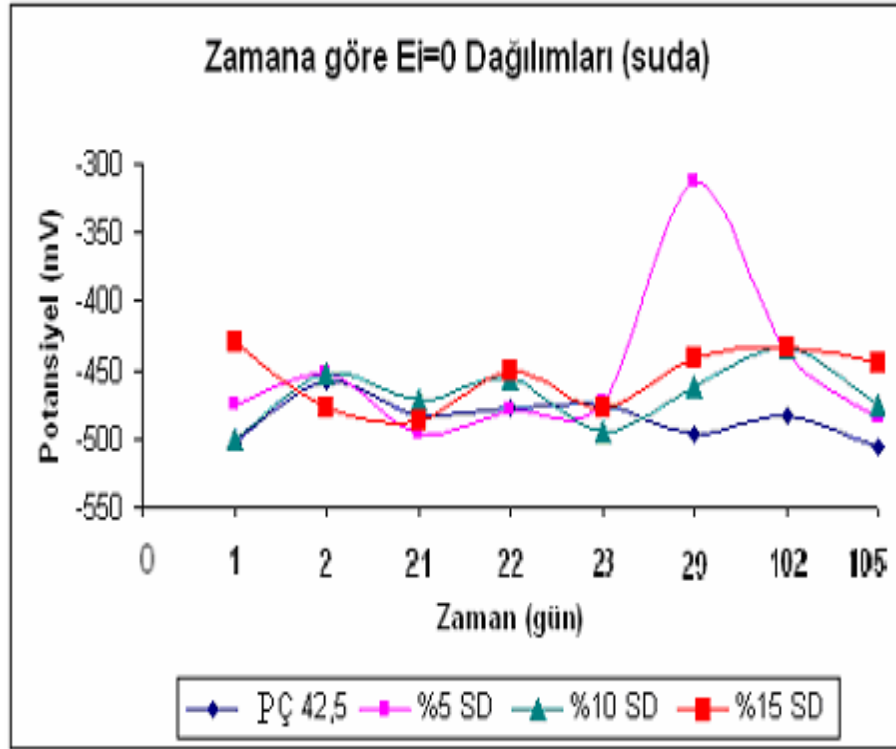
Sudaki potansiyel veri aralığının çalışılan bütün numunelerde yaklaşık 150 mV’a kadar genişlemesi ve günlere göre ölçülen potansiyel değerlerinin sürekli değişmesi bütün numunelerde yaygın lokalize (çukur) korozyonu olduğunu göstermektedir. Bu, betonun kompozit yapısından dolayı beklenen bir durumdur. Numunelerin korozyon eğilimlerindeki farkların belirlenmesi lokalize korozyonu açısından daha ayırt edici sonuçlar verir. Yani betonarme çeliğinde oluşan lokalize korozyon için elektrokimyasal gürültü (electro chemical noise) tekniklerinin uygulanması daha doğru sonuçlara götürecektir.

Bu yöntemde aynı örnekte farklı zamanlarda elde edilen elektrokimyasal bulguların farkları değerlendirilmiştir. Farkların artması lokalize korozyonun arttığını gösterir.



Şekil 4.2. %3,5 NaCl ortamında elektrokimyasal denge sağlandıktan sonra 195 gün suda (A), 10 gün rutubetli hava ortamında (B) bekletilen farklı çimento türleri içeren betonarme numunelerin üç elektrotlu düzenekle (Resim 3.3) ve standart doygun kalomel elektroda (SCE) karşı değişik zamanlarda elde edilen açık devre potansiyellerinin (ADP, Yarım Hücre Potansiyeli) zamana göre dağılımları

Şekil 4.2'deki yarım hücre potansiyel dağılım verileri, tek başına numunelerin korozyon özelliklerini kıyaslamakta yeterli olmamıştır. Bununla beraber potansiyelin zamana göre farklarının en az olduğu PÇ 42.5 ve % 15 SD içeren numunelerde lokalize korozyonun daha az olduğu düşünülmektedir.



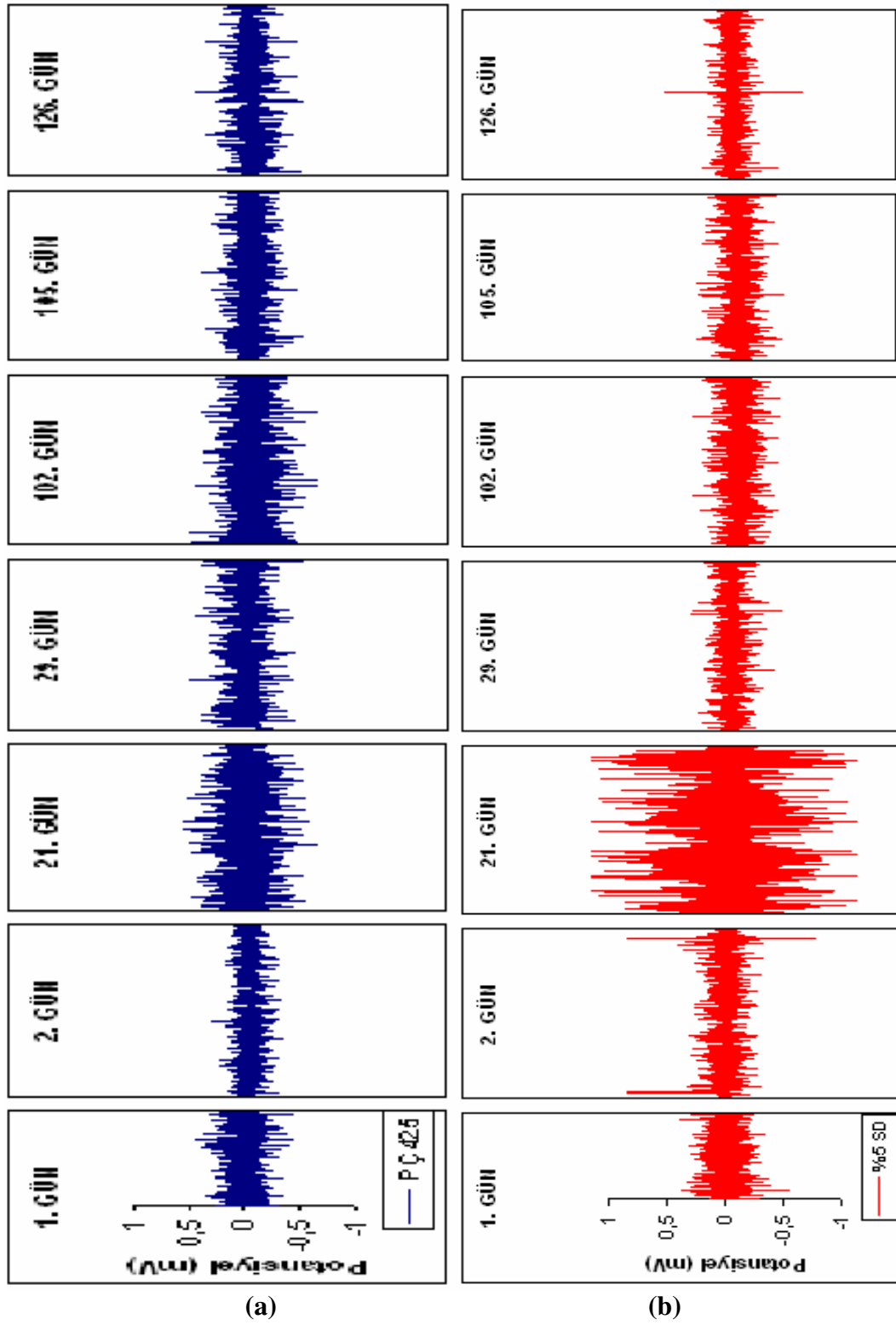
Şekil 4.3. Şekil 4.2 koşullarında tahribatsız elektrokimyasal yöntemle elde edilen korozyon potansiyeli ortalamalarının (a), korozyon potansiyel farklarının (b) günlere göre değişimi

Aynı örneklere ait korozyon potansiyeli ($E_{kor}=E_{i=0}$) ortalamalarının günlere göre değişimi Şekil 4.3.a'da ve korozyon potansiyel farklarının günlere göre değişimi de Şekil 4.3.b'de görülmektedir.

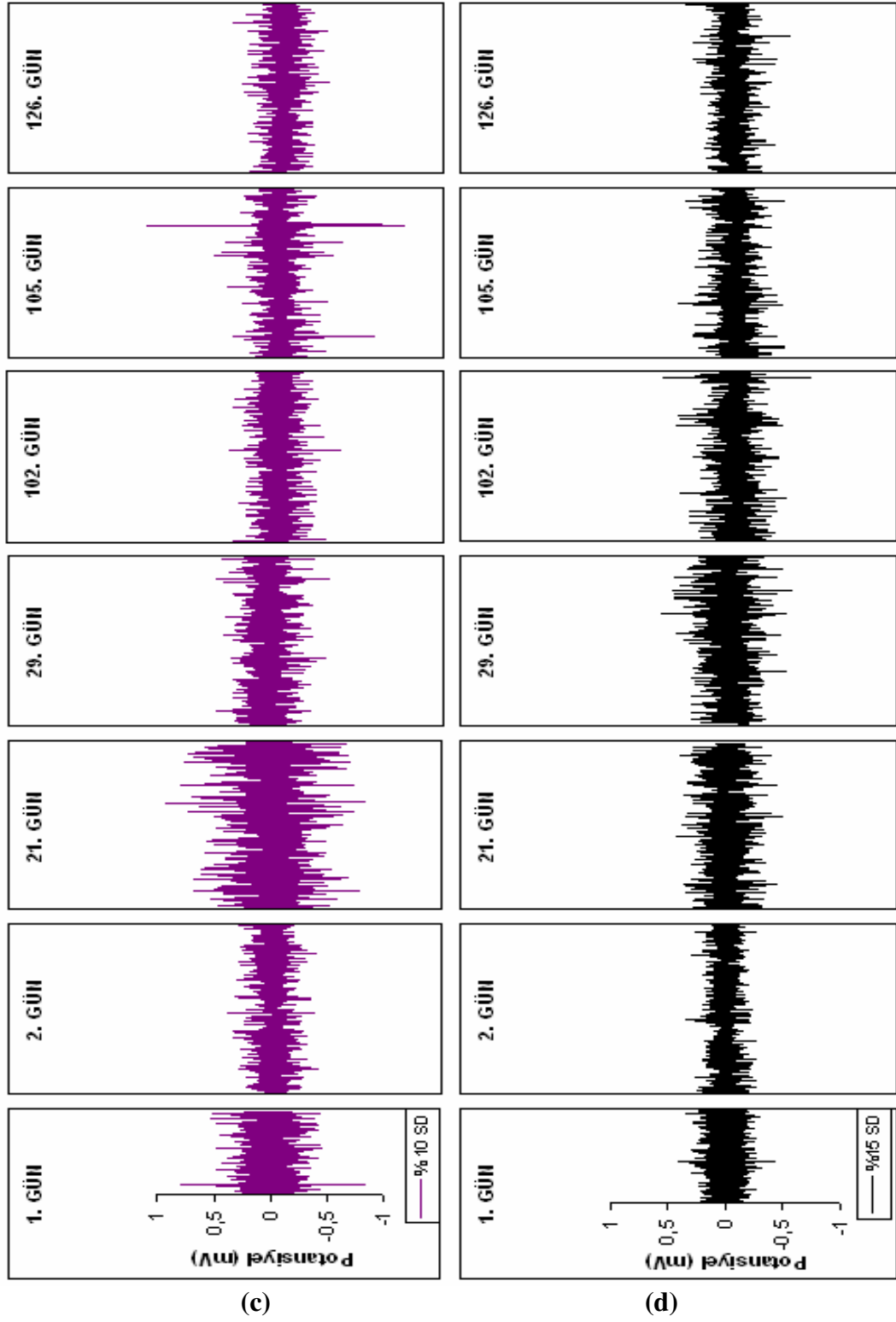
Sudaki korozyon süresi içinde potansiyeldeki değişimi en büyükten küçüğe doğru sıralarsak en fazla lokal korozyon eğiliminin % 5 SD daha sonra % 10 SD içeren numunelerde olduğu tanık ve % 15 SD içeren numunelerde en az korozyonun olduğu görülmüştür (Şekil 4.2, Şekil 4.3).

Şekil 4.4 a-d'de çeşitli numunelerde açık devre potansiyellerinin gürültü ölçüm tekniğine göre değerlendirilmesiyle elde edilen grafikler görülmektedir. Bu grafiklerden her biri, belirli günlerde 0,2 saniye aralıklarla bilgisayar kontrollü olarak elde edilen (1200) potansiyel verisinin ardışık olarak farklarının alınması ile elde edilmiştir. Elde edilen potansiyel titreşimlerinin frekans ve genlikleri yüzey potansiyelinin değişme kapasitesinin yani yüzeyin lokal korozyon eğiliminin bir ölçüsü olarak alınmış bu eğilimin günlere göre değişimlerinin ortalamaları farklı numuneler için kıyaslanmıştır.

Şekil 4.4.a-d'ye göre titreşim genlikleri en küçük olan PÇ 42,5 ve % 15 SD içeren betonarme numunelerin lokalize korozyona yatkınlıklarının daha az olduğu görülmektedir. Bu bulgular, (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3) bulguları ile aynı sonuca işaret etmektedir.

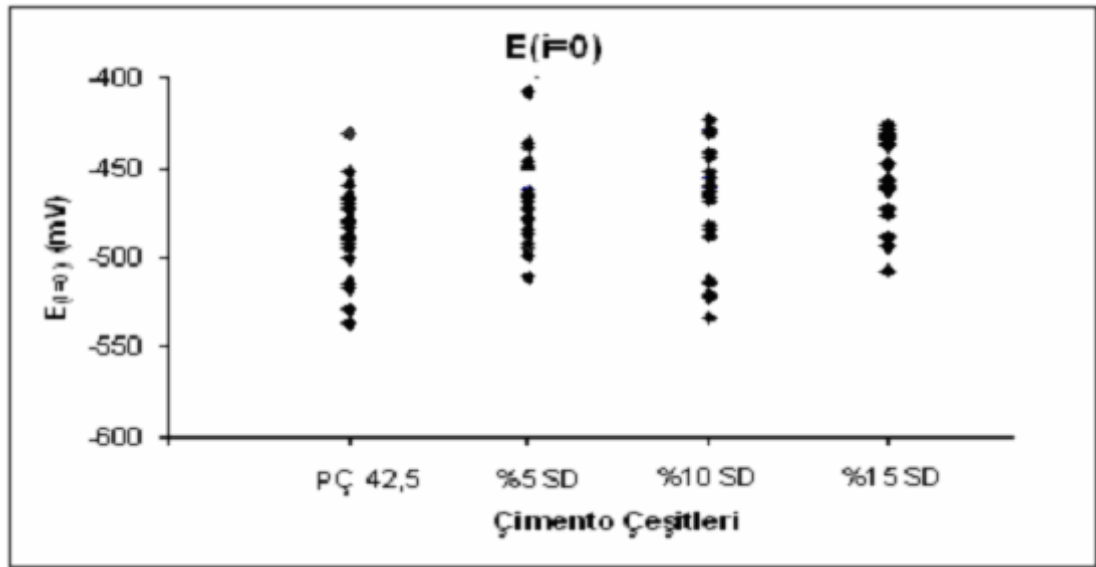


Şekil 4.4. Şekil 4.2'deki potansiyel verilerinin elektrokimyasal gürültü ölçüm tekniğine göre düzenlenmiş hali (a); PÇ 42,5, (b); %5 SD, (c); %10 SD (d); %15 SD



Şekil 4. 4. Şekil 4.2’ deki potansiyel verilerinin elektrokimyasal gürültü ölçüm tekniğine göre düzenlenmiş hali (a); PÇ 42,5, (b); %5 SD, (c); %10 SD (d); %15 SD

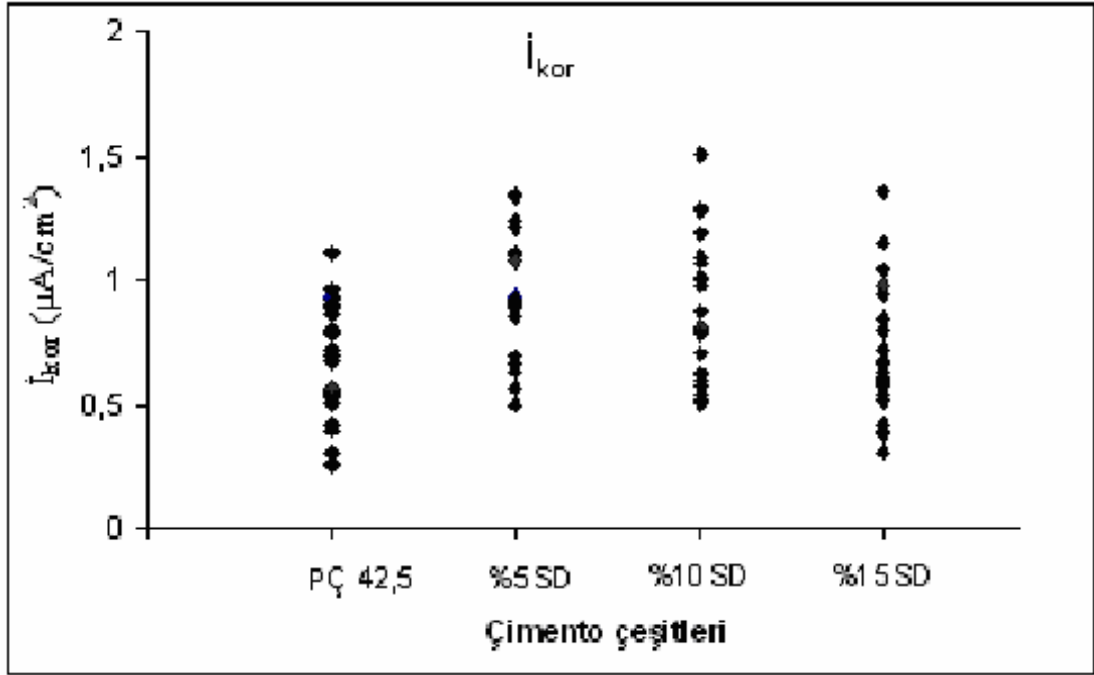
Suda bekleyen numunelerin bekleme süresi boyunca okunan korozyon potansiyelleri Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu değerlerin veri dağılımı ve genişlikleri de beton çeliği yüzeyinde gelişmiş güzel oluşan lokalize korozyon eğilimlerini birbirlerine göre kıyaslamakta kullanılabileceği düşünülmüştür. Grafikteki dikey potansiyel değerleri aynı ortamda bekleyen numunelerin korozyonu sırasında yüzeyde oluşan bütün potansiyel değerlerini içermektedir.



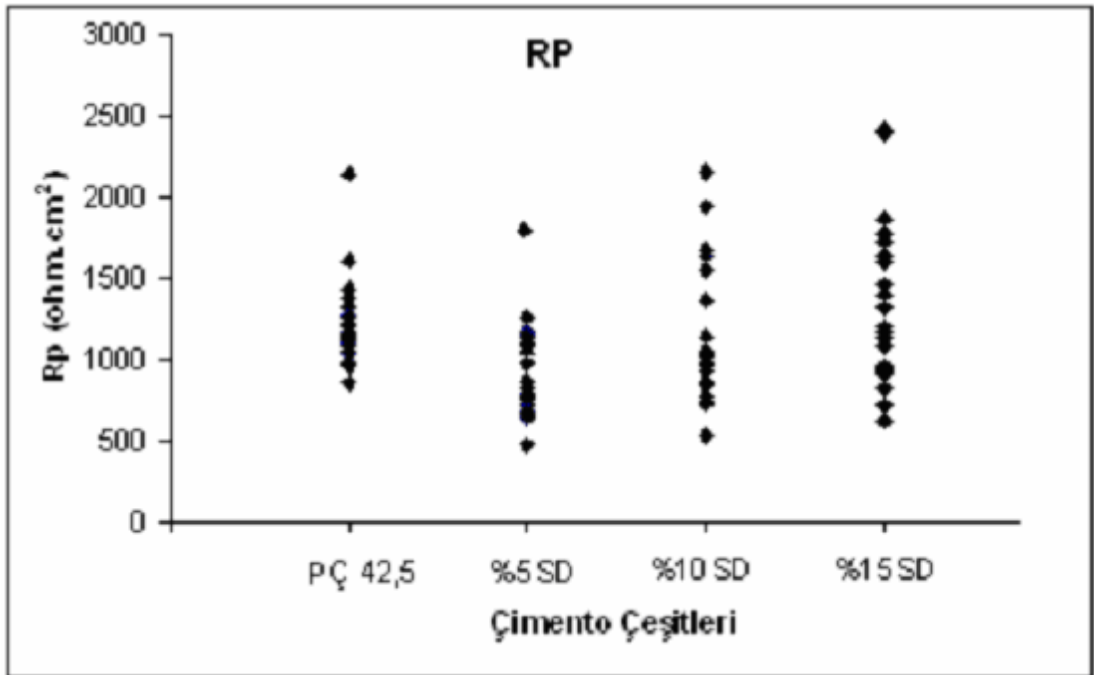
Şekil 4.5. Şekil 4.2'de verilen koşullarda, farklı numunelerin tuzlu suda 195 gün bekleme süresi içinde betonarme çeliklerin gösterdiği tüm korozyon potansiyel değer dağılımının örnek cinsine göre değişimi

Tahribatsız yöntemle elde edilen diğer bulgular da benzer şekilde değerlendirilmiştir. Suda bekleyen numunelerin korozyon akımları Şekil 4.6'da, polarizasyon dirençleri (R_p) Şekil 4.7'de verilmiştir.

Korozyon akımının azalma, korozyon direncinin artış eğilimi gösterdiği tanık ve % 15 SD içeren örneklerin suda nispeten korozyona karşı daha dirençli olduğu görülmektedir. Bununla beraber bütün numunelerde ölçüm sonuçlarının geniş bir dağılım aralığında farklılıklar göstermesi, korozyon hızının her numune için değişken olduğunu göstermektedir. Bu durum lokalize korozyonun karakteristik özelliğidir.



Şekil 4.6. Şekil 4.2’de verilen koşullarda, farklı numunelerin tuzlu suda 195 gün bekleme süresi içinde betonarme çeliklerin gösterdiği tüm korozyon akımı değerleri dağılımının örnek cinsine göre değişimi

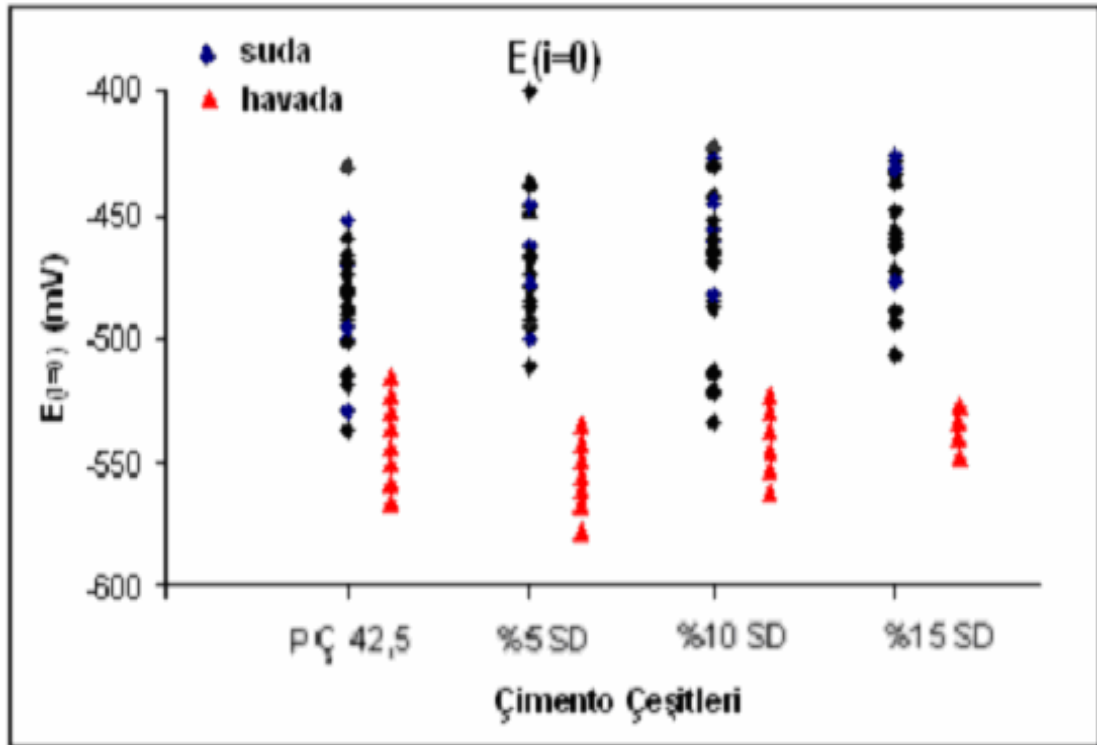


Şekil 4.7. Şekil 4.2’de verilen koşullarda, farklı numunelerin tuzlu suda 195 gün bekleme süresi içinde betonarme çeliklerin gösterdiği tüm polarizasyon dirençleri (korozyon direnci, R_p) dağılımının örnek cinsine göre değişimi

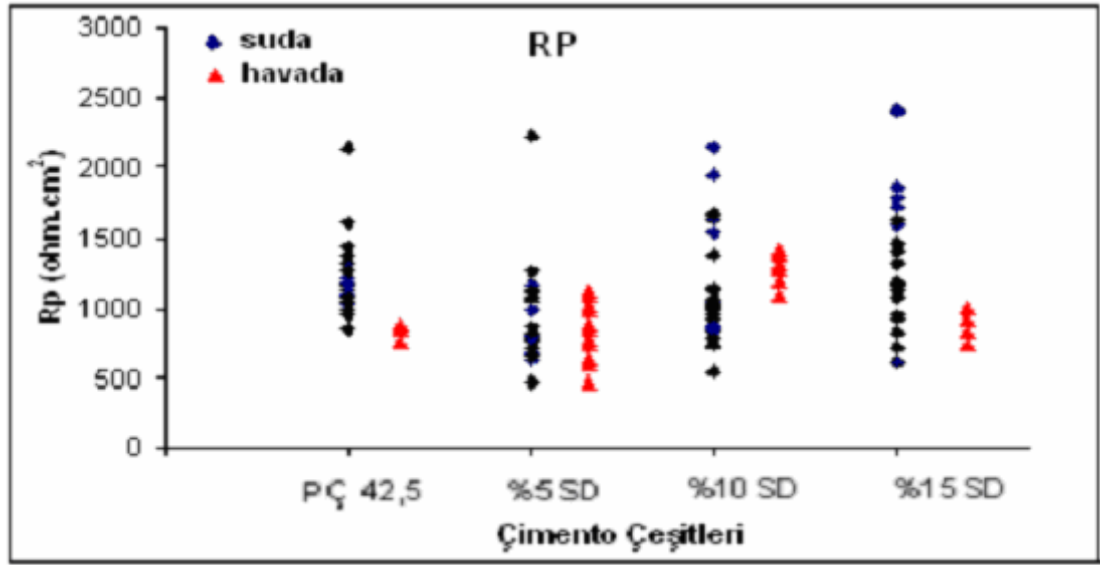
4.2.2. Kimyasal çevresi değişen betonarme numunelerin korozyon özelliklerinin tahribatsız elektrokimyasal yöntemlerle incelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde bir betonarme yapının belirli periyotlarda suyun gel-git etkisi karşısındaki korozyon davranışları modellenmiştir.

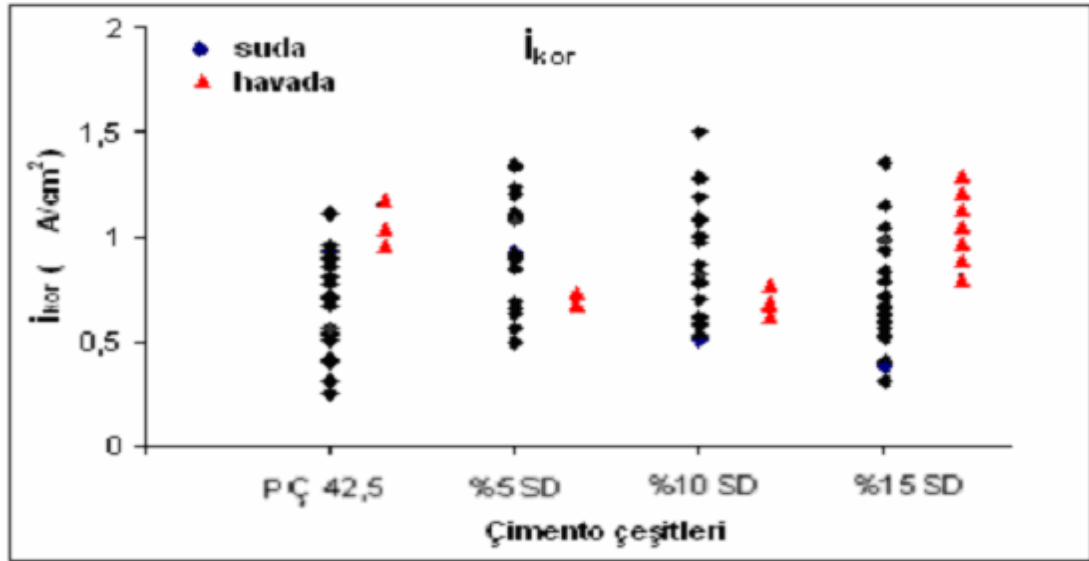
Yapılan ölçümler sonucunda korozyon potansiyellerinin (Şekil 4.8), polarizasyon dirençlerinin (R_p , korozyon direnci) (Şekil 4.9) ve korozyon akımlarının (Şekil 4.10) suda ve havadaki denge değerleri belirlenmiş ve toplu olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. 195 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılarak çevre değiştiren numunelere ait sudaki ve havadaki korozyon potansiyel dağılımlarının toplu olarak gösterilmesi



Şekil 4.9. 195 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılarak çevre değiştiren numunelere ait sudaki ve havadaki polarizasyon dirençlerinin dağılımlarının toplu olarak gösterilmesi



Şekil 4.10. 195 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılarak çevre değiştiren numunelere ait sudaki ve havadaki korozyon akımlarının (korozyon hızı ile doğru orantılı olan) dağılımlarının toplu olarak gösterilmesi

Aynı tür numunelerin farklı ortamlarda beklemesi sonucunda, elektrokimyasal ölçümlerdeki (E_{kor} , I_{kor} , R_p vb.) verilerin saçılması, özellikle tehlikeli lokalize korozyon eğilimlerinin artmasına ve korozyonun hızlanmasını işaret eder.

Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 incelendiğinde sudaki korozyondan sonra havaya çıkarılan %10 SD dışındaki tüm örneklerin korozyon dirençlerinin azaldığı; korozyon akımlarında en çok artışın %15 SD ve tanık numunelerde belirgin olduğu görülmektedir. Bu bulgu ortam değiştiren numunelerde SD'nin, korozyonu belirgin bir şekilde hızlandırdığını göstermektedir.

Ortam değişiminin betonarme çeliği korozyonuna etkisi, Şekil 4.11.a-c ve Şekil 4.12' de daha belirgin olarak görülebilir.

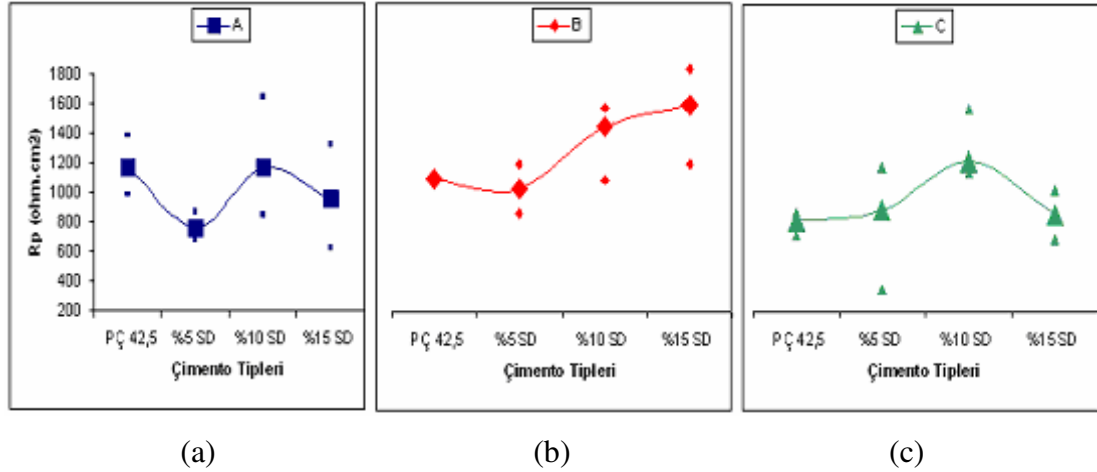
Tuzlu su içinde açık devre potansiyellerinin dengeye geldiği 92. günde, aynı ortamdaki 195. günde ve sudan çıkarılıp 10 gün rutubet etkisine bırakıldıktan sonra ki polarizasyon dirençleri sırası ile Şekil 4.11.a, Şekil 4.11.b ve Şekil 4.11.c'de gösterilmiştir. Şekil 4.12'de ise bu üç grafik toplu olarak değerlendirilmiştir.

Bu bulgulara göre SD miktarındaki artış suda bekleme süresinde Rp değerlerinin artışına ve veri saçılmalarına sebep olmuştur (Şekil 4.11.b). Yani suda bekledikçe SD'li numunelerde çelik üzerinde oluşan dirençli pas miktarı artar. Bununla beraber paslanma, saçılma miktarına bağlı olarak yüzeyde yekpare değil lokal olarak dağılmıştır. Bu ise daha ileri lokalize korozyon açısından çok sakıncalıdır. SD bileşiminde bulunan yüksek değerli demir oksit ve klorürleri (Fe_2O_x Cl_{3-x}), otokatalitik etki yaparak betonarme çeliği korozyonunu hızlandırır.

Çeliğe temas eden betonun her yerinde SD miktarı homojen dağılmayacağına göre, otokatalitik etki yani paslanma da yüzeyin her yerinde aynı oranda olmayacaktır; Böylelikle yüzeyde paslanmanın artıp-azaldığı bölgeler oluşur. Üstelik korozyon sırasında bu bölgeler sürekli olarak değişim gösterir. Buna bağlı olarak pas oluşumu yüzeyin farklı yerlerinde farklı hızlarda seyrederek Bütün bu dinamik değişimler, elektrokimyasal verilerdeki değişim hızının büyümesi ve veri saçılmaları ile kendini gösterir.

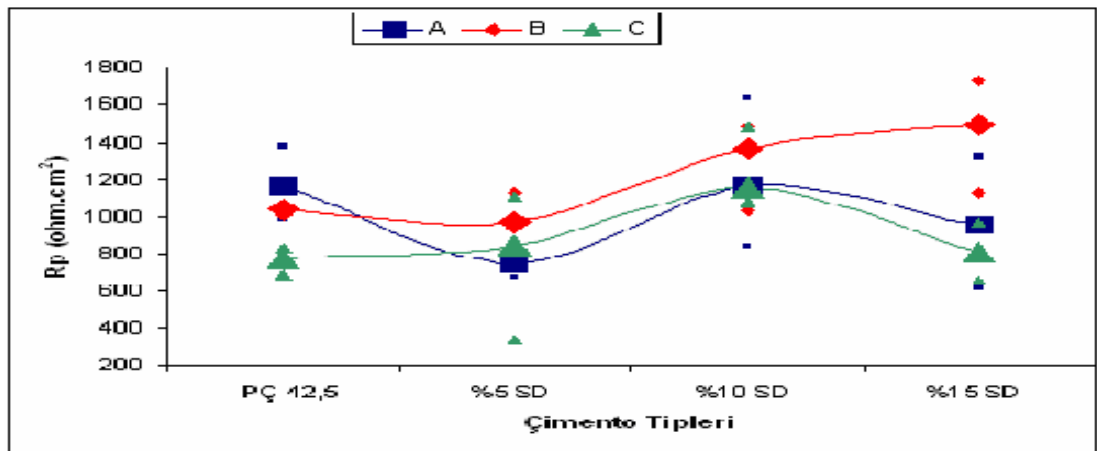
Numuneler çevre değiştirip havaya çıkarıldığında ise veri saçılması SD konsantrasyon artışı ile azalmış, Rp değerleri ise konsantrasyondan bağımsız bir

değişim göstermiştir (Şekil 4.11.b, Şekil 4.11.c). SD miktarındaki artış ile boşluk oranının azalması bu bulguyu bire bir desteklemektedir (Çizelge 4.2).



Şekil 4.11. Aynı numune gruplarının farklı sürelerde ve farklı ortamlarda beklemesi sonucunda elde edilen Rp değerlerinin çimento türüne göre değişim ve dağılımları (a) Sudaki 92. günde; (b) sudaki 195. günde; (c) sudan çıkarıldıktan 10 gün sonra

Numunelerin 4.11. a-c de, Rp değerlerindeki değişimler Şekil 4.12’de toplu olarak gösterilmiştir. Bu değerlendirmeye göre de betondaki SD miktarı arttıkça çevre değişimine maruz kalan aynı numunelerin hem Rp değerleri hemde saçılma aralıkları büyümektedir.



Şekil 4.12. Aynı numune gruplarının bekleme süresi ve ortama göre korozyona uğrama eğilimlerinin beraber değerlendirilmesi

Aynı tip numunelerin farklı ortam ve bekleme süresi içinde farklı korozyon eğilimleri göstermesi, betonarme çeliğinin hızlanarak korozyona uğramasına yol açmıştır. Bu ise elektrokimyasal korozyon parametrelerinde (R_p , E_{adp} , E_{kor} , i_{kor} vb.) saçılma (veri dağılımı genişliği) aralığının büyümesi ile kendini göstermiştir. R_p değerlerindeki bu saçılma, en fazla % 15 SD katkılı numunelerde görülmüştür (Şekil 4.12).

Bu yüzden doğal çevre değişimine uğrayan betonarme yapılar için SD'nin beton gözeneklerini tıkayarak, dış çevrenin korozif etkisini kısıtlamasına rağmen, beton çeliğinin özellikle lokalize korozyonunu doğrudan artıran bir etkileşime sebep olduğu düşünülmektedir.

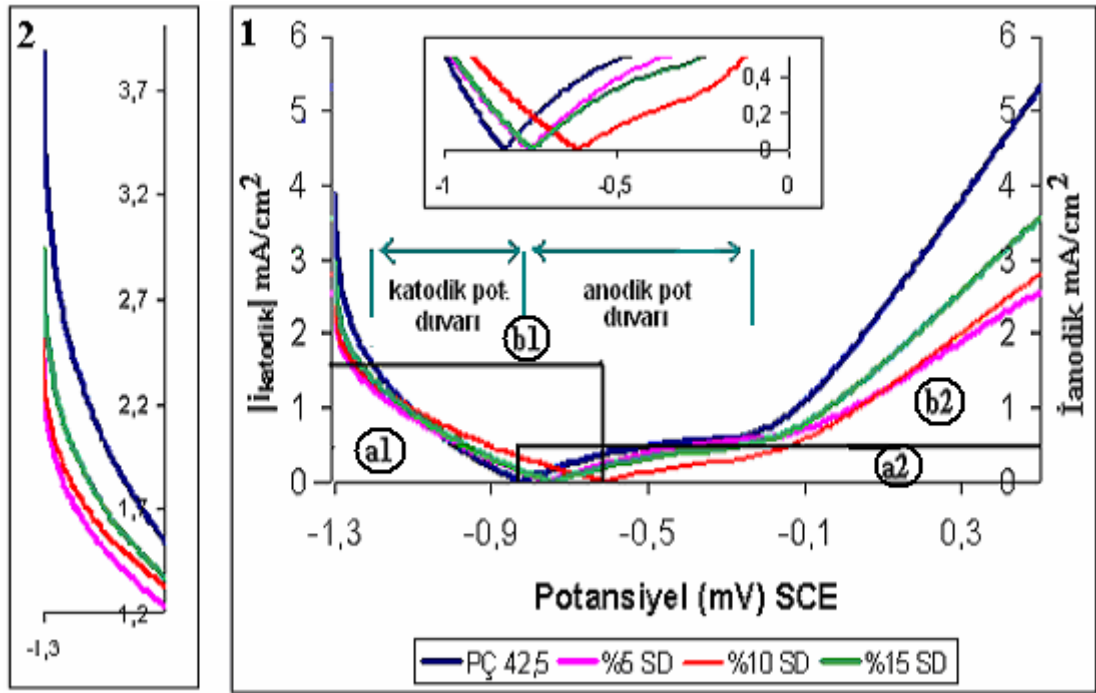
4.2.3. SD'nin betonarme çeliği korozyonuna etkisinin tahribatlı elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi: aşırı polarizasyon etkisi

Bu bölümde suda ve havada serbest korozyona bırakılmış numuneler Resim 3.7'deki düzenek ve üç elektrot tekniği ile katodik ve anodik yönde 3 mV/sn potansiyel tarama hızında ve -1,3 V ve + 0,5 V aralığında polarize edilmiştir (yaşlandırma işlemi). Bu işlemi yapmaktaki amaç, bir süre serbest korozyona uğrayan numuneleri aşırı korozyon ile yaşlandırarak numune cinsine göre korozyondaki farklılaşmaları daha belirgin bir şekilde ortaya çıkarmaktır.

Şekil 4.13, her gruptan üçer tane örnek olmak üzere dört farklı numune grubunun ortalama polarizasyon eğrileri, potansiyel duvarı genişlikleri ve aşırı anodik-katodik akımları kıyaslamak üzere düzenlenmiştir. Bunun sonucunda numune gruplarının birbirlerine göre korozyon dirençleri değerlendirilmiştir.

Şekil 4.13'deki (a) bölgesi korozyon reaksiyonunun çok yavaş yürüdüğü küçük polarizasyon (az yaşlandırma); (b) bölgesi de anodik ve katodik akım geçişinin arttığı aşırı polarizasyon (daha ileri derecede yaşlandırma) koşullarını göstermektedir.

Şekil 4.13 ve Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi, beton içindeki çeliğin düşük polarizasyon şartlarında (a bölgesi) betona SD ilavesi, potansiyel duvarı genişliğini PÇ 42,5 tanık betona göre artırmış ve son oksitlenme (0,5 V) ile son indirgenme (-1,3 V) potansiyellerindeki akımları da buna bağlı olarak azalmıştır. Bununla beraber SD miktarı arttıkça son oksitlenme potansiyellerindeki akımlar giderek artmıştır.



Şekil 4.13. Çeşitli betonarme numunelerin tuzlu su ve havada bekletildikten sonra üç elektrotlu sistemde -1,3 V ile +0,2 V arasında 3mV/sn tarama hızı ile elde edilen katodik anodik polarizasyon eğrilerinin oluşturduğu potansiyel duvarı grafiği (a1): Katodik düşük polarizasyon bölgesi ,(b1): Katodik aşırı polarizasyon bölgesi (a2): Anodik düşük polarizasyon bölgesi ,(b2): Anodik aşırı polarizasyon bölgesi

Şekil 4.13’te potansiyel duvarı genişliği SD artışı ile önce artıp sonra azalmıştır. Bu durum beton içindeki SD’nin çelik korozyonuna iki zıt etki göstermesi şeklinde açıklanabilir. Yani SD beton gözeneklerini tıkayarak korozif maddelerin betona girişini ve korozyon ürünlerinin çelik yüzeyinden uzaklaşmasını kısıtlayıp, bunların sebep olduğu korozyonu yavaşlattığı halde SD’nin kendi korozif etkisi SD miktarının artmasıyla ve ilerleyen zamanlarda ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.13’te indirgenme ve

yükseltgenme akımlarının da porozitesi daha fazla olan tanık numunede büyük olması Çizelge 4.2, Bölüm 4.2.2 ve 4.2.3'teki tüm bulgular ile uyum içindedir.

Çizelge 4,2'de SD ilavesi ile porozitenin giderek azalması ve basınç dayanımının artması, çevreden gelen korozyon etkisinin kısıtlanması açısından iyi bir özelliktir. Bununla beraber SD konsantrasyonundaki artış ile son indirgenme ve yükseltgenme akımlarının artması ve potansiyel duvarının ise önce artıp sonra azalması silis dumanının çelik üzerindeki korozif etkisini göstermektedir.

Çizelge 4.2. %3,5. NaCl ortamında farklı betonarme numunelerine ait çeliklerin polarizasyonları sonucunda oluşan elektrokimyasal ve diğer fiziksel parametrelerin beton cinsine göre değişimleri

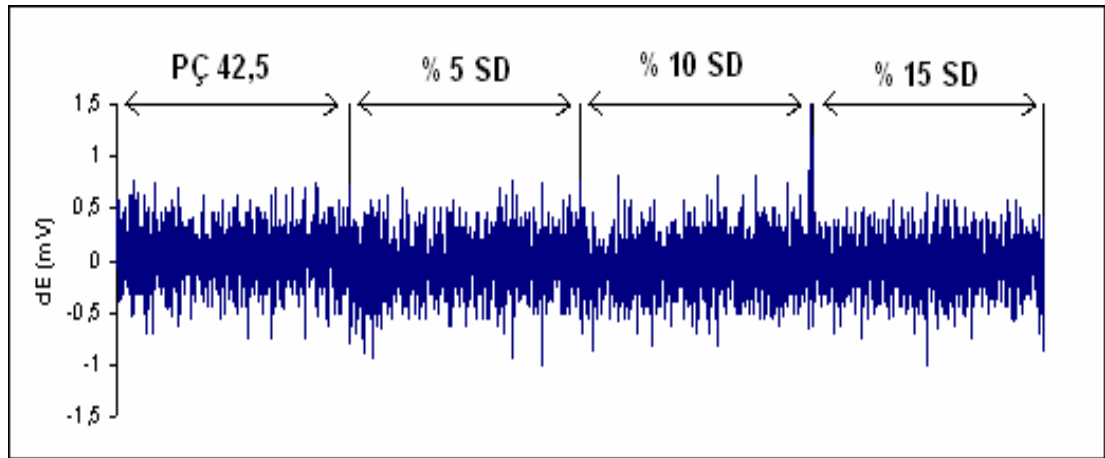
Çimento Çeşitleri	Son oksitlenme pot. geçen (anodik) akımlar (mA/cm ²)	Son indirgenme pot. geçen (anodik) Akımlar (mA/cm ²)	Anodik pot. duvarı genişliği (mV)	Katodik pot. duvarı genişliği (mV)	Potansiyel duvarı (mV)	Boşluk (%)	Basınç dayanım 90. gün (Mpa)
PÇ42,5	5,33	3,88	0,34	0,42	0,76	9.49	39,52
%5 SD	2,55	2,38	0,38	0,54	0,92	6.44	41,01
%10 SD	2,79	2,50	0,47	0,69	1,16	5.82	38,65
%15SD	3,56	2,90	0,49	0,53	1,02	5,57	42,78

Çizelge 4.3. Farklı ortamlarda bekletilen ve polarize edilen betonsuz çeliklerde üç elektrotlu sistem ile gürültü ölçüm tekniği ve polarizasyon eğrilerine göre elde edilen elektrokimyasal parametreler

Çimento Çeşitleri	Son oksitlenme pot. geçen (anodik) akımlar (mA/cm ²)	Son indirgenme pot. geçen (anodik) Akımlar (mA/cm ²)	Anodik Potansiyel duvarı genişliği (mV)	Katodik potansiyel duvarı genişliği (mV)	Potansiyel duvarı (mV)	Elektrokimyasal gürültü genlik büyüklüğü (mV)
PÇ42,5	24,34	11,40	0,69	0,46	1,15	0,34 ± 0,020
%5 SD	37,70	14,14	0,41	0,68	1,09	0,24 ± 0,015
%10 SD	49,90	20,97	0,45	0,54	0,99	0,50 ± 0,120
%15 SD	38,70	20,20	0,45	0,52	0,97	0,42 ± 0,090

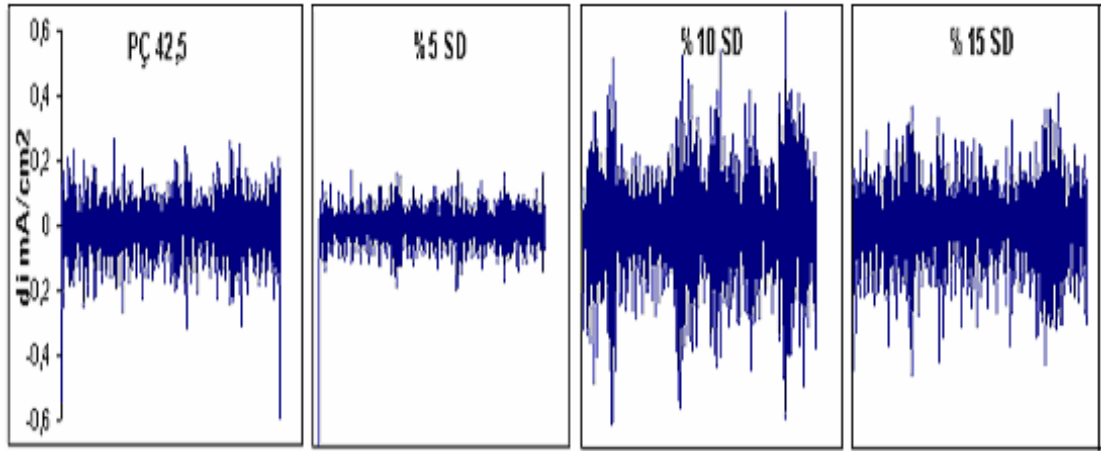
4.2.4. Betonsuz çelik korozyonu üzerine silis dumanının doğrudan etkisi

Çalışmanın bu bölümünde 216 gün korozyon ortamında bırakılan farklı numunelere ait betonlar kırılmış tane çapı 0-1 mm aralığında olacak şekilde eleklerden geçirilip 20 gramlık öğütülmüş beton örneklerden 200 gr'lık süspansiyon karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üçer gün suda bekletilmiş ve her gün karıştırılıp dinlenmeye bırakılmıştır. Numunelere Şekil 3.5'teki düzeneğe üç elektrotlu sistemde elektrokimyasal deneyler yapılmıştır. Bu şekilde çevresinden beton engeli kalkan çelik üzerinde, yalnızca farklı beton süspansiyon çözeltilerinin korozyon etkisi doğrudan belirlenmiştir. Daha sonra farklı numuneler için açık devre potansiyelinde yüzeyden geçen serbest akımlar tahribatsız gürültü ölçüm tekniğine göre belirlenmiş ve Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Tahribatlı polarizasyon eğrileri ise Şekil 4.16'da gösterilmiş ve değerlendirilmiştir.



Şekil 4.14. Betonsuz çeliklerde potansiyel gürültü genliklerinin ortamdaki SD miktarına bağlı değişimi

Şekil 4.14'de potansiyel gürültü genlikleri SD konsantrasyonu ile değişmediği halde akım gürültü genliklerinin (Şekil 4.15) artışı, yüzeyde yaygın bir korozyon olduğunu ve korozyon direncinin azaldığını gösteren diğer bir bulgudur.



Şekil 4.15. Betonsuz çeliklerde akım gürültü genliklerinin silis dumanı miktarına bağlı değişimi

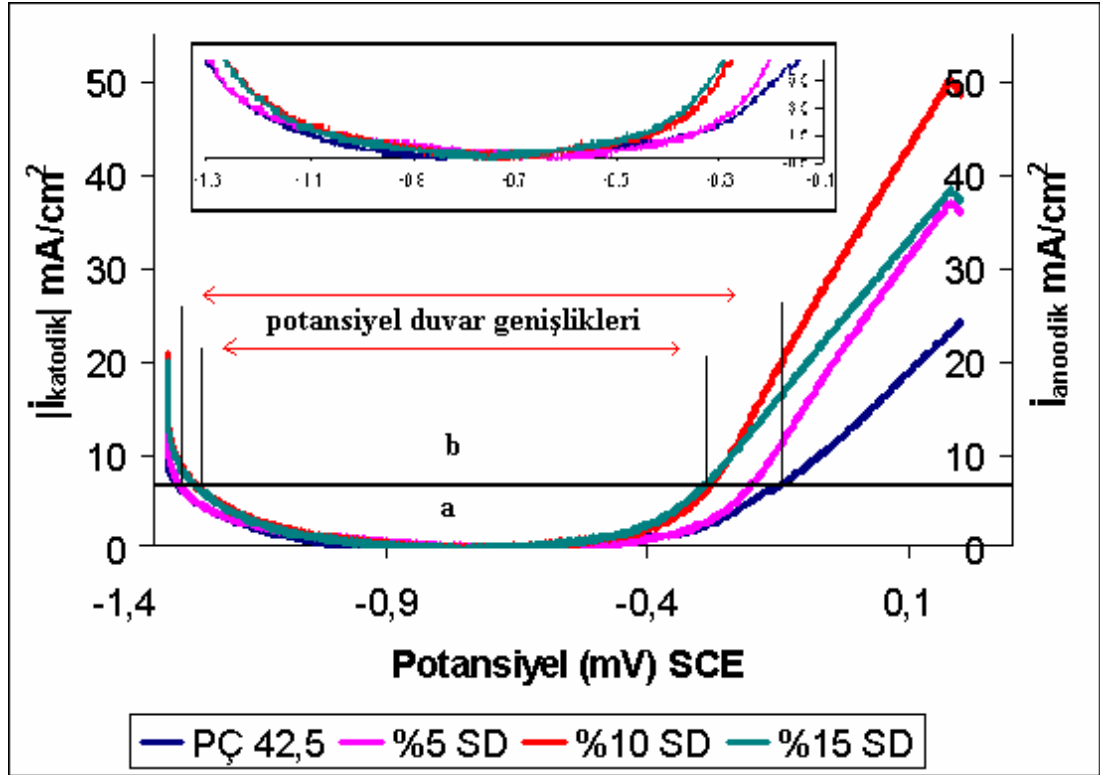
Şekil 4.15'e göre beton çözeltilisindeki SD miktarı arttıkça lokalize korozyonun önce azalıp daha sonra yüksek konsantrasyonlarda arttığı, akım titreşim gürültü genliklerindeki artışlardan anlaşılmaktadır.

Şekil 4.16'de ise aynı ortamlarda akım-potansiyel eğrileri elde edilerek yaşlandırma işlemleri yapılmıştır. Elde edilen eğrilere göre düşük polarizasyon koşullarında (az yaşlandırma) görülen potansiyel duvar genişliği SD ilavesi ile azalmaktadır.

(Şekil 4.16.a bölgesi, Çizelge 4.3)

Yüksek polarizasyon koşullarında ise (Şekil 4.16.b) çeliğin son oksitlenme ve son indirgenme potansiyellerinde gözlenen akım büyüklükleri. SD ilavesi ile PÇ 42,5'e göre daha büyük değerler göstermiştir.

Bu sonuçlara göre SD'nin çelikte korozyon hızını ve lokalize korozyon eğilimini doğrudan artırdığı çok net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.16. Çeşitli süspansiyon çözeltilerinin -1,3 V ile +0,2 V arasında 3 mV/sn tarama hızı ile elde edilen katodik anodik polarizasyon eğrilerinin oluşturduğu potansiyel duvarı grafiği

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Silis dumanı katkısının betonarme çeliği korozyonuna etkisinin araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda sıralanmıştır.

1. SD katkısı betonun porozitesini azaltarak beton basınç dayanımını artırmıştır (Şekil 4.1, Çizelge 4.1).

2. Betonarme çeliği, çalışılan bütün beton numuneleri içinde lokalize korozyona uğramıştır.

3. Betonarme çeliği korozyon incelemelerinde betona ilave edilen NaCl;

✓ Farklı numunelerin korozyon özelliklerini ayırt etmede yararlı olmuştur.

✓ Korozyon çözeltisinde bulunan agresif Cl^- iyonlarının numuneye difüzyon süresini kısaltıp çeliğin elektrokimyasal denge değerlerine daha çabuk ulaşmasını sağlamıştır.

4. Betonarme çeliği için akım ve potansiyel gürültü ölçüm tekniklerinin uygulanması, farklı numunelerin lokalize korozyon özelliklerinin karşılaştırmalarında kesin sonuçlar vermiştir (Şekil 4.4, Şekil 4.14).

5. Havada bekletilen numuneler için ortalama R_p değerleri ve R_p saçılmalarının azalması, beton boşluk oranındaki azalmayı gösteren diğer bir bulgudur (Şekil 4.11.c).

6. SD katkısı betonarme çeliği korozyonu üzerinde birbirine zıt yönde iki farklı etkide bulunmuştur:

✓ SD, beton boşluklarını kapatarak çeşitli korozif maddelerin çevreden çelik yüzeyine difüzyon hızını azaltarak bunların sebep olduğu korozyonu kısıtlamıştır.

✓ SD, çelik yüzeyinde kendisinin temas ettiği bölgelerde korozyon direncini düşürerek, özellikle lokalize korozyonu hızlandırmıştır. (Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14). Bunun, özellikle SD içindeki yüksek değerlikli demir bileşiklerinin çelik üzerindeki korozif etkisinden ve SD ilavesinin betonun kompozit özelliğini artırmasından kaynaklandığı söylenebilir. (Bir metalin çevresindeki kimyasal sayısı yani heterojenliği arttıkça, o metalin lokalize korozyon riski artar.

7. SD katkısı özellikle ıslanan ve yoğun çevre değişimine uğrayan betonarme yapıları (deniz yapıları, köprü ayakları vb.) için uygun değildir.

8. Betonarme çeliğinde lokalize korozyona uğrama derecesi farklı sürelerde elde edilen elektrokimyasal değerlerin ortalamaları, saçılma aralıkları ve farkları beraberce kıyaslanarak iyi bir şekilde belirlenebilir. Çeşitli elektrokimyasal parametrelerin (R_p , E_{adp} , E_{kor} , i_{kor} vb.) saçılma aralıklarının büyümesi betonarme çeliğinin korozyon eğiliminin artışı işaret eder. Aynı tür numunenin çevre değişimine ve zamana bağlı olarak elde edilen verilerin değerlendirilmesinde de buna benzer yaklaşımlar kullanılmalıdır.

9. Betonarme çeliğinin yüzeyinde oksit filmi oluşumunun artışı korozyon potansiyelinde ($E_i=0$), yarı hücre potansiyelinde ve polarizasyon direncinde artışlar ve korozyon akımlarındaki azalmalar ile anlaşılabilir. Bununla beraber verilerde saçılmalar artıyorsa oksidin yüzeyde lokal olarak büyüyüp çukur korozyon oluşumunu katalizlediği önerilir.

KAYNAKLAR

1. TS 802, “Beton Karışım Hesap Esasları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (1985).
2. Keleştemur, O., “Doğu ve Güneydoğu Bölgelerinde üretimi yapılan PKÇ/B 32,5 R Çimentosunun Betonarme Yapılardaki Donatı Korozyonuna Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 4 (2002).
3. Erdoğan, T. E., “Beton”, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını*, Ankara, 677 (2003).
4. Arslan, M., “Beton”, *Atlas Yayın Dağıtım*, İstanbul, 160 (2001).
5. Tezel, A., “Yapılarda Korozyon”, *İzolasyon Dünyası Dergisi*, 34: 10 (2002).
6. TS 708, “Beton Çelik Çubukları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (1996).
7. Asan, A., “Galvanik Akım Metodu Kullanarak Klorür İyonları, Asetat İyonları ve Uçucu Külün, Beton İçindeki Çeliğin Korozyonu Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 11 (1996).
8. Ekinci, C.E., “Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1 (1995).
9. Güvercin T., “ Silis Dumanı, Uçucu kül ve Yüksek Fırın Cürufunun Bağlayıcı Olarak Çimento Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 1-3 (1996).
10. Long, A.E., Basheer, P.A.M., and Montgomery, F.R., “Assessment of the Durability of Silica Fume Concrete”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Naturel Pozzolans in Concrete*, İstanbul, 413-425 (1992).
11. Baalbaki, M., Sarker, S.L., Aitein, P.C., and Isabelle, H., “ Properties and Microstructure of High Performance Concretes Containing Silica Fume, Slag, and Fly Ash”, *Proceedings of the Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Naturel Pozzolans in Concrete*, İstanbul, 427-449 (1992).
12. Yüzer, N., “Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanların Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi İle Araştırılması”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3-13 (1998).

13. Halilov, S., “Silis Dumanı ve Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Lifli Betonların Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-15 (2003).
14. Özbek, R., “Silis Dumanının Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-14 (1998).
15. Aruntaş, H.Y., Tokyay, M., “Katkılı çimento üretiminde diatomitlerin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği”, *Çimento ve Beton Dünyası*, 1,4,33-41, (1996).
16. Yeğinoğlu, A., “Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı”, *TÇMB/ARGE Enstitüsü*, Ankara, 9-56 (2003).
17. Yılmaz, A., “Antalya Ferrokrom İşletmesi’nin Elektrik-Ark Fırını Cürufalarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya, 9-10 (2002).
18. Temiz, H., “Uçucu Kül ve Silis Dumanının Birlikte Katıldığı Harcın Özellikleri”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 10 (1997).
19. TS EN 197-1, “Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2002).
20. TS 708, “Beton Çelik Çubukları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (1996).
21. Mamaş S., “Alüminyumun Polipirol Filmlerle Kaplanması ve Korozyona Karşı Etkinliğinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 27-34 (2003).
22. Sivaslı, Y., “Çeliğin Beton İçinde Korozyonu”, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi, Teknik Bülten*, Mayıs, 10 (2000).
23. Rasheeduzzafar, S. vd, “Reinforcement corrosion resisting characteristics of silica fume blended-cement,concrete”, *ACI Materials Journal* 89 (4): 337-344, (1992).
24. Aköz, F., Yüzer, N., Koral, S., “Silis dumanı katkılı ve katkısız harç içindeki çeliğe farklı konsantrasyonlardaki sodyum klorürün etkisi”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı*, Ankara, 185-200 (1995).
25. Aköz, F., Yüzer, N., Koral, S., “Silis dumanı katkılı ve katkısız harç içindeki çeliğe farklı konsantrasyonlardaki magnezyum klorürün etkisi”, *4. Ulusal Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 317-326 (1996).

26. Hoşhan, P., “Beton İçindeki Çeliğin Korozyonunun Üç Elektrot Yöntemi İle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 50 (1994).
27. Aköz, F., Yüzer, N., “Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Deneyler İle Araştırılması”, *6. Korozyon Sempozyumu*, DEÜ, İzmir, 50 (1998).
28. Güvercin, T., “Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Curufunun Bağlayıcı Olarak Çimento Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 67-68 (2002).
29. Lewis, D.A., Copenhagen, W.J., “Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete in Marine Atmospheres, *Corrosion-Nace*, 15: 50 (1959).
30. Erdoğan, Ş., Kurbetçi, Ş., Doğan, A., "Silis Dumanının Katkılı Çimento İle Kullanımı", *4. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 257-265 (1996).
31. Çelik, M.H., Değirmenci A., “The Experimental Study About The Usage Of Silica Fume In Mortar Plaster Production”, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (1): 1-7 (2005).
32. Papadakis, V.G., "Experimental Investigation and Theoretical Modeling of Silica Fume Activity in Concrete", *Cement and Concrete Research*, 29: 79-86 (1999).
33. Duval, R. and Kadri, E.H., "Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes", *Cement and Concrete Research*, 28 (4): 533-547 (1998).
34. Cohen, M.D. and Bentur, A., " Durability of Portland Cement-Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodyum Sulfate Solutions" *ACI Materials Journal*, 19: 148-157 (1988).
35. TS 3530 EN 933-1, “Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 4-9 (1999).
36. TS 3529, “Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-5 (1980).
37. TS 3526, “Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-13 (1980).
38. TS 3523, “Beton Agregalarının Yüzey Nemi Oranının Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-5 (1980).

39. TS 3527, “Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-7 (1980).
40. TS 3528, “Beton Agregalarında Hafif Madde Oranı Tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-5 (1980).
41. Yeğınobalı, A., “Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi” *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildirileri*, Ankara, 149-167 (1993).
42. TS EN 12390-2, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin yapımı ve küre tabi tutulması, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2002).
43. TS EN 12390-3, Serleşmiş beton deneyleri Bölüm: 3 Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2003).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEĞİRMENCİ, Aykut
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 02.05.1981 Samsun
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (535) 847 05 57
 E-posta : teknik_101@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi, FBE /Yapı Eğitimi	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi, TEF /Yapı Eğitimi	2003
Lise	Samsun Atakum Teknik Lisesi/ İnşaat Bölümü	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1999	Samsun / ER-BE İnşaat	Teknik personel
2002	Ankara / Settar Yapı	Teknik personel

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Çelik, M.H., Değirmenci A., “The Experimental Study About The Usage Of Silica Fume In Mortar Plaster Production”, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (1): 1-7 (2005).

Hobiler

Matematik, Satranç, Bilgisayar, Bilim ve Teknik