



**FARKLI SINIFLARDAKİ BETONARME
ÇELİKLERİNDE GERİLİM KOROZYONUNUN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatma Merve PEKTAŞ

DANIŞMAN

Yrd.Doç.Dr. Gökhan KÜRKÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAYIS 2016

Bu tez çalışması 14.FEN.BİL.12 numaralı proje ile AKÜ BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARKLI SINIFLARDAKİ BETONARME ÇELİKLERİNDE
GERİLİM KOROZYONUNUN ARAŞTIRILMASI**

Fatma Merve PEKTAŞ

DANIŞMAN

Yrd.Doç.Dr. Gökhan KÜRKÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAYIS, 2016

TEZ ONAY SAYFASI

Fatma Merve PEKTAŞ tarafından hazırlanan “FARKLI SINIFLARDAKİ BETONARME ÇELİKLERİNDE GERİLİM KOROZYONUNUN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 17/05/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜRKÜ

Başkan : Doç. Dr. Ali ERGÜN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet CANBAZ
Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜRKÜ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17/05/2016

İmza

Fatma Merve PEKTAŞ

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

**FARKLI SINIFLARDAKİ BETONARME ÇELİKLERİNDE GERİLİM
KOROZYONUNUN ARAŞTIRILMASI**

Fatma Merve PEKTAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜRKÜ

Betonarme elemanlarının imalatında kullanılan çelikler, uygun konumda yerleştirmek ve aderansı sağlamak amacıyla bükülerek şekillendirilirler. Bu işlem sırasında çelik donatı üzerinde gerilme oluşur. Bu gerilme durumu da korozyon mekanizmasına etki edecektir. Bu tez çalışmasında, farklı sınıflardaki betonarme çeliklerde gerilim korozyonu araştırılmıştır. İncelemede inşaat çelikleri şekillendirilirken kullanılan üç farklı bükme açısı (45, 90, 135°) ile gerilimsiz durum ele alınmıştır. Çalışmalarda 12 mm'lik S220 düz, S420 nervürlü ve B500C tempcore nervürlü çelik sınıfı donatılar ile mineral katkı içermeyen normal beton ve %25 uçucu kül ikamesi yapılan katkılı betonlar kullanılmıştır. Korozyon sürecinde beton açısından, çelik açısından ve beton ile çelik beraber olmak üzere üç farklı açıdan ele alınmıştır. Uçucu kül katkısı beton dayanımının %4 azalmasına sebep olmuş buna karşın korozyon direncini %62 ila %20 arasında arttırmıştır. Korozyon hızı bükme açısı arttıkça artmaktadır. Çelik sınıflarından en yüksek korozyon direnci ve en düşük korozyon hızı davranışını B500C çeliği sergilemiştir.

2016, xii + 97 sayfa

Anahtar Kelimeler: Gerilim korozyonu, uçucu kül, tempcore, betonarme donatısı.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**INVESTIGATION OF STRESS CORROSION IN DIFFERENT CLASSES
REINFORCED CONCRETE**

Fatma Merve PEKTAŞ
Afyon Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Supervisor: Asst. Prof. Gökhan KÜRKLÜ

Reinforcing rebars are formed by bending to ensure adherence and placing the suitable position in reinforced concrete elements. During this process, stress occurs on reinforcement rebars. This stress will affect the corrosion mechanism. In this study, stress corrosion in different classes reinforced concrete were searched and also three different bending angles (45, 90, 135°) were used while forming reinforced concrete rebars and stress free situation was considered. 12 mm diameter reinforcement rebars were used in this study. As a reinforced rebar category flat S220, ribbed S420 and tempcore ribbed B500C rebar class were used. Normal concrete which does not contain any mineral additives and additive concrete which contains %25 fly ash substitutions were used. Corrosion process was considered from three different perspectives which are in terms of concrete, in terms of reinforced bars and in terms of reinforced concrete. Fly ash additive caused %4 reduction of concrete strength but it increased corrosion resistance between %20 and %62. If the bending angle increases, the corrosion rate increases. Tempcore ribbed B500C showed the highest corrosion resistance and the lowest corrosion rate behavior in the class of reinforcements rebars.

2016, xii + 97 pages

Keywords: Stress corrosion, flyash, tempcore, reinforced concrete rebar.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleri ile bana her konuda destek olan ve beni yönlendiren, bu araştırmanın konusunda, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım, Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Yrd.Doç.Dr. Gökhan KÜRKLÜ'ye teşekkür eder ve şükranlarımı sunarım.

Araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd.Doç.Dr. Yusuf KAYALI'ya, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarım ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanan bu çalışmayı, 14.FEN.BİL.12 numaralı proje ile destekleyen AKÜ BAPK birimine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca bana güvenen, maddi ve manevi desteklerini hiç sorgulamadan bir an olsun eksiltmeyen aileme ve eşime tüm kalbimle teşekkür ederim.

Fatma Merve PEKTAŞ
AFYONKARAHİSAR, 2016

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
RESİMLER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Beton.....	3
2.2 Betonarme	5
2.3 Betonarmede Kullanılan Çelikler	6
2.3.1 Betonarme Çeliklerinin Şekillendirilmesi.....	8
2.4 Durabilite.....	10
2.5 Korozyon Mekanizması	12
2.6 Korozyon Gelişimi.....	12
2.7 Beton Yapılarda Donatı Korozyonunun Mekanizması.....	14
2.7.1 Atmosferik Korozyon	17
2.7.2 Elektrolitik Korozyon	18
2.7.3 Klorid Korozyon.....	18
2.7.4 Temas Korozyon	19
2.8 Korozyon Çeşitleri.....	20
2.8.1 Üniform (Genel) Korozyon.....	21
2.8.2 Galvanik (Metal Çifti) Korozyon	22
2.8.3 Çatlak (Yarık) Korozyon	23
2.8.4 Çukur (Pitting) Korozyon	24
2.8.5 Taneler Arası Korozyon.....	25
2.8.6 Mikrobiyolojik Korozyon	26
2.8.7 Erozyon Korozyon.....	27
2.8.8 Kaçak Akım Korozyon	28
2.8.9 Hidrojen Kırılğanlığı	29

2.8.10 Stres (Gerilme) Korozyon.....	30
2.9 Korozyondan Korunma Yöntemleri	32
2.9.1 Uygun Tasarım.....	32
2.9.2 Uygun Malzeme Seçimi.....	33
2.9.3 Yeterli Yüzey Kaplaması.....	33
2.9.4 Katodik Koruma	34
2.9.5 Anodik Koruma	34
2.10 Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar	35
3. MATERYAL VE METOT.....	44
3.1 Materyal	44
3.1.1 Agrega.....	44
3.1.2 Çimento.....	45
3.1.3. Uçucu Kül	46
3.1.4 Kimyasal Katkı.....	47
3.1.5 Sodyum Klorür Tuzu	47
3.1.6 İnşaat Çelikleri	47
3.2 Metot.....	48
3.2.1 Beton Numunelerin Hazırlanması	48
3.2.2 Hızlandırılmış Korozyon Numunelerinin Hazırlanması.....	49
3.2.3 Tafel Numunelerinin Hazırlanması	50
3.3 Yapılan Deneyler	51
3.3.1 Beton Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler	51
3.3.1.1 Basınç Dayanımı Deneyi.....	51
3.3.1.2 Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi	52
3.3.1.3 Klor Geçirimsizliği Deneyi	53
3.3.1.4 Elektriksel Direnç Deneyi	55
3.3.2 Çelik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler	56
3.3.2.1 Elektrokimyasal Korozyon Deneyi.....	56
3.3.2.2 X Işınımı Kırınımı (XRD) Analizi.....	57
3.3.2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi.....	58
3.3.3 Betonarme Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler.....	59
3.3.3.1 Hızlandırılmış Korozyon Deneyi.....	59
3.3.3.2 Ağırlık Kaybı Deneyi.....	61
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	63
4.1 Betonun Özellikleri.....	63
4.2 Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları.....	65

4.3 Elektrokimyasal Korozyon Sonuçları.....	71
4.4 SEM Analizi Sonuçları	79
4.5 EDX Analizi Sonuçları	81
4.6 Korozyon Deneyi Sonrası Görüntüler	84
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	86
6. KAYNAKLAR.....	88
ÖZGEÇMİŞ.....	97



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

S220	Sıcakta haddelenmiş min. akma dayanımı 220 MPa olan düz inşaat çeliği
S420	Sıcakta haddelenmiş min. akma dayanımı 420 MPa olan nervürlü inşaat çeliği
B500C	Sıcakta haddelenmiş min. akma dayanımı 500 MPa olan nervürlü inşaat çeliği
Cr ₂₃ C ₆	Krom karbür
Ø	Düz çubuk çapı mm
Φ	Nervürlü çubuk çapı mm

Kısaltmalar

UKB	%25 oranında uçucu kül katkılı beton
NB	Normal beton

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Özel deprem etriyeleri ve deprem çirozları.....	9
Şekil 2.2 Nervürlü çeliklerde doğru pilye bükümü	10
Şekil 2.3 Beton içine gömülü çelik donatının elektro-kimyasal korozyonu	15
Şekil 2.4 Çatlama hasarı	17
Şekil 2.5 Kapak atma hasarı.....	17
Şekil 2.6 Pas payının tabaka halinde dökülmesi hasarı	17
Şekil 2.7 Basit bir pil modeli	18
Şekil 2.8 Galvanik korozyonda katot/anot yüzey alanları oranının etkisi	23
Şekil 2.9 Çatlak korozyonunun oluşumu ve çatlak	24
Şekil 2.10 Çukur korozyonu mekanizması	25
Şekil 2.11 304 paslanmaz çelikte taneler arasında krom karbür (Cr_{23}C_6) çökeltisi	26
Şekil 2.12 Yoğunlaştırıcı tip duvarlarında meydana gelen erozyonlu korozyon	28
Şekil 2.13 Elektrikli tren raylarından kaçan akımların bir boru hattında oluşturduğu..... kaçak akım korozyonu	29
Şekil 2.14 Metal içine hidrojen atomu penetrasyonu	29
Şekil 2.15 Tane sınırları kırılması ve tane içi kırılması	31
Şekil 3.1 Agregaya ait XRD analiz sonuçları	45
Şekil 3.2 Çimentoya ait XRD analiz sonuçları	45
Şekil 3.3 Uçucu küle ait XRD analiz sonuçları.....	46
Şekil 3.4 Tafel numunesi	51

Şekil 3.5 Yarma deneyi.....	53
Şekil 3.6 Hızlandırılmış korozyon cihazının çalışma prensibi.....	61
Şekil 4.1 Betonların klor geçirimsliliği	64
Şekil 4.2 Betonların elektriksel özdirenci	64
Şekil 4.3 Betonun elektriksel özdirenç-klorür geçirimsliliği ilişkisi	65
Şekil 4.4 45° Bükümlü çelik çubukların korozyon akımı.....	66
Şekil 4.5 90° Bükümlü çelik çubukların korozyon akımı.....	66
Şekil 4.6 135° Bükümlü çelik çubukların korozyon akımı.....	66
Şekil 4.7 Betonarme örneklerinin başlangıç korozyon akımları	67
Şekil 4.8 Betonarme örneklerinin ortalama korozyon akımları	68
Şekil 4.9 Betonarme örneklerinin korozyon hızı.....	68
Şekil 4.10 Betonarme örneklerinin korozyon süresi	69
Şekil 4.11 Çelik sınıfına göre gerilim-korozyon hızı ilişkisi	70
Şekil 4.12 Beton çeşidine göre gerilim-korozyon hızı ilişkisi	70
Şekil 4.13 Gerilim-korozyon hızı ilişkisi.....	71
Şekil 4.14 S220 çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon grafiği.....	72
Şekil 4.15 S220 çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği	73
Şekil 4.16 S420 çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon grafiği.....	73
Şekil 4.17 S420 çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği	74
Şekil 4.18 B500C çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon grafiği.....	75

Şekil 4.19 B500C çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği	76
Şekil 4.20 Çelik sınıfının bükülerek deforme edilmemiş duruma göre Tafel polarizasyon grafiği	76
Şekil 4.21 Çelik sınıfının 45° bükme duruma göre Tafel polarizasyon grafiği	77
Şekil 4.22 Çelik sınıfının 90° bükme duruma göre Tafel polarizasyon grafiği	77
Şekil 4.23 Çelik sınıfının 135° bükme duruma göre Tafel polarizasyon grafiği	78
Şekil 4.24 Çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği	78
Şekil 4.25 S220 sınıfı betonarme çeliklerine ait korozyon sonrası SEM görüntüleri	79
Şekil 4.26 S420 sınıfı betonarme çeliklerine ait korozyon sonrası SEM görüntüleri	80
Şekil 4.27 B500C sınıfı betonarme çeliklerine ait korozyon sonrası SEM görüntüleri .	81
Şekil 4.28 S220 sınıfı çeliğin 45° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi	82
Şekil 4.29 S220 sınıfı çeliğin 135° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi	82
Şekil 4.30 S420 sınıfı çeliğin 45° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi	83
Şekil 4.31 S420 sınıfı çeliğin 135° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi	83
Şekil 4.32 B500C sınıfı çeliğin 45° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi	84
Şekil 4.33 B500C sınıfı çeliğin 135° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Betonlarda kullanılan malzemelerin XRF analiz sonuçları.....	46
Çizelge 3.2 Çimento ve uçucu küle ait fiziksel özellikler ve lazer tane boyutu analiz sonuçları	47
Çizelge 3.3 Deneylerde kullanılan betonarme çeliklerinin kimyasal bileşimi (%).....	47
Çizelge 3.4 Betonarme çeliklerinin mekanik özellikleri	48
Çizelge 3.5 Beton karışım oranları	49
Çizelge 3.6 Toplam geçen yük ile klorür geçirimsliliği arasındaki ilişki	54
Çizelge 3.7 Elektriksel direnç ve korozyon olasılığı arasındaki ilişki.....	55
Çizelge 4.1 Betonların mekanik özellikleri.....	63
Çizelge 4.2 S220 çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon analizi ile elde edilen korozyon parametreleri	72
Çizelge 4.3 S420 çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon analizi ile elde edilen korozyon parametreleri	73
Çizelge 4.4 B500C çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon analizi ile elde edilen korozyon parametreleri	75

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 2.1 Donatıdaki korozyondan dolayı betonda oluşan çatlak ve beton kırıldığında içerdeki çelik donatının korozyonu	20
Resim 2.2 Donatının korozyon sebebiyle uflanması	20
Resim 3.1 İnşaat çelik çubuklarının bükme açıları	49
Resim 3.2 Hızlandırılmış korozyon numuneleri	50
Resim 3.3 Tafel deneyi için çelik çubuklardan numune alınan yerler	50
Resim 3.4 Tek eksenli basınç presİ	52
Resim 3.5 Klorür geçirimliliği numunesinin hazırlanması.....	54
Resim 3.6 Klor geçirimliliği deney düzeneği	54
Resim 3.7 Elektriksel direnç ölçümü.....	56
Resim 3.8 Elektokimyasal korozyon deney hücresi.....	57
Resim 3.9 Bruker D 8 Advance XRD cihazı	58
Resim 3.10 LEO 1430 VP	59
Resim 3.11 Numuneler üzerinden geçen akımları ölçen devre	60
Resim 3.12 Hızlandırılmış korozyon düzeneği.....	60
Resim 4.1 Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası bir numune	85
Resim 4.2 Beton içerisinden çıkartılan donatıların beton ve pasdan temizlenmesi	85
Resim 4.3 Korozyon deneyi sonrası donatı numune örnekleri	85

1. GİRİŞ

Beton ve çelik günümüzün en önemli yapı malzemelerindendir. Betonarme yapılar yüksek çekme ve basınç dayanımları, istenilen şekil ve boyutlarda kalıplanabilmeleri ve en önemlisi ucuz oluşları sebebiyle her türlü yapıda tercih nedeni olmaktadır. Bu tür yapıların yangına karşı dirençli oluşu ve çok az bakım ve onarım istemesi de büyük avantaj sağlamaktadır. 1950'li yıllara kadar mühendislerce beton içinde bulunan donatının korozyona uğramayacağı görüşü düşünülmüştür. Fakat sonraki yıllarda çevre kirlenmesinin, özellikle otoyollarda buzlanmaya karşı tuz kullanımının fazlalaşması ile beraber betonarme çubuklarının korozyonu sebebiyle betonun çatladığı ve hatta parçalanarak dağıldığına şahit olunmuştur. Korozyon mekanizması karışım ve döküm hatalarının yapılmış olduğu düşük dayanımlı betonlarda kendini daha çok göstermiştir. Karbonasyon olayının da etkisi ile betonarme çubuklarının korozyonu günümüzde tüm beton yapıların en büyük problemi olmuştur (Yalçın ve Koç 2004).

Genel olarak korozyon, çelik çubuklar içerisinde bulunan demir iyonlarının klorid iyonlu bir ortamda bulunmasından ya da karbonasyonundan dolayı oluşur. Korozyona sebep olan en önemli etmenlerin, yüksek klorid oranı, ısı, düşük pH, nem, su/çimento oranı, döküm aşamasındaki yetersiz vibrasyon ve problemlili atık/yağmur su sistemleri olduğu düşünüldüğünde, korozyonun Türkiye'de bulunan yapılara yüksek oranda etki ettiği ve bu yapılara geçen yıllar içerisinde hasar verdiği bilinmektedir. Yapıyı uzun vadede etkileyerek yapı performansının önemli bir derecede düşmesine sebep olan son yüzyılımızdaki en büyük sorunlardan biri de betonarme yapıların taşıyıcı elemanlarındaki demir donatıların korozyona uğramasıdır. Korozyon artıkları sebebiyle korozyona uğrayan demir çubukların hacimlerinde artış gerçekleşmekte, bu hacim artışıyla birlikte en dışta bulunan beton örtüsü çatlamakta ve korozyona uğrayan çelik çubuklar yüksek oranda mukavemet ve süneklik kaybında bulunmaktadır. Aynı zamanda korozyon çelik donatılarda kesit kaybına neden olmakta dış beton tabakası sağlam olsa dahi donatılardaki kesit kayıpları sebebiyle donatılar gevrek hasara uğrayıp kopmaktadırlar (Ghaffari 2013).

Betonarme yapılarda donatı korozyonu evrensel olarak ilgi duyulan bir sorun olma özelliğini devam ettirmektedir. Köprülerde, yollarda ve deniz ortamı etkisinde bulunan

betonarme yapılarında sıkça karşılaştığımız demir donatı korozyonu, sadece maddi değil verdiği yapısal risk sebebiyle aynı zamanda önemli derecede bir durabilite sorunudur (Erdoğan 2003).

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde genel bilgiler olarak betonarme, korozyon, durabilite ile ilgili konular sunulmuş ve bunun devamında bu çalışmaya ışık tutacak literatürdeki öne çıkan diğer çalışmalar verilmiştir.

Üçüncü bölüm olan materyal ve metot kısmında deneysel çalışmanın temel prensipleri ve süreci tarif edilerek, beton, çelik ve betonarme için yapılan deneyler hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölüm, bulgular ve tartışma kısmında deneysel çalışmalar sonunda elde edilen veriler şekil, grafik ve çizelge gibi görsel öğeler kullanılarak sunulmuş ve bu bulguların ortaya çıkma sebepleri izah edilmeye çalışılmıştır.

Beşinci ve son bölümde ise deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bilgiler sıralanarak daha sonra yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler verilerek tez çalışması tamamlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Beton

Beton; kum, çakıl, kırmataş gibi malzemeler ile bağlayıcı madde olarak çimento, kimyasal reaksiyonlar (hidratasyon) için yeterli su ile birlikte, gerektiğinde mineral ve kimyasal katkıları da kullanılarak elde edilen, taşa benzeyen, inşaat işinde yapı taşı olarak kullanılan bir yapı malzemesidir (İnt. Ky.1).

Beton, uzun yıllardan beri en önemli yapı malzemesi olma özelliğini korumuş, evrensel yük taşıyıcı malzeme olarak kabul edilmiştir. Güncelliğini kaybetmeyen beton, bütün inşaatlarda az veya çok kullanılmaktadır. Bu inşaatlar arasında; binalar, santraller, istinat duvarları, köprüler, limanlar, sulama kanalları v.b. gibi betonarme yapılar vardır. Yani başka bir deyişle toprak altında, atmosferde, tuzlu veya tatlı su etkisinde bulunan tüm yapılarda kullanılabilir (Şahin 2002, Özkul vd. 2004). Beton bileşime giren malzemeler özel olarak oranlandığı zaman karışım herhangi bir yere dökülebilir ve şekli önceden belli kalıpların şeklini alabilen plastik bir kütle meydana getirir. Bu plastik kıvam özelliği ile istenilen şeklin verilebilmesi, betonu diğer yapı malzemelerinden üstün kılan en önemli özelliğidir (Sümer 2009).

Çimentonun su ile karıştırılmasının ardından kimyasal reaksiyon başlar. Su, kum ve çakıl tanelerini birbirine bağlar ve tek parça bir malzeme elde edilir. Beton hazırlanırken çimentonun hidratasyonu için gerekli olan kadar su konulursa, betonun akıcılığı olmaz ve kalıplara istenildiği gibi yerleştirilmesi, donatı demirlerinin arasına girmesi zorlaşır. Bu sebeple kimyasal reaksiyon için geçerli su miktarından daha fazla su konularak betona akıcılık kazandırılır. Betonu meydana getiren birleşim malzemelerinin (kum, çimento, çakıl, su) oranları değiştirilerek dayanımı farklı olan betonlar elde edilir. Buna ek olarak özel üretilmiş çimento, agrega, katkı maddeleri ve kür koşulu kullanılarak daha farklı özelliklere sahip beton elde edilebilir (Şahin 2002).

Betonun karılmasından sertleşmeye başladığı ana kadar geçen süre içindeki şekil verilebilir haline taze beton, sertleştikten sonraki katı haline ise sertleşmiş beton denilmektedir. Beton; taze halde iken istenilen şeklin verilebilmesi, sertleşmiş halde ise

dayanımı ve dayanıklılığı yüksek bir malzeme olması sebebiyle yapı mühendisliğinde önemli bir yere sahiptir. Bu yüzden, beton istenilen işlenebilmeyi sağlamalı, yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip olmalıdır. Beton, mekanik açıdan basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük olan gevrek bir malzemedir (Saran 2007).

Beton, dayanımı ayarlanabilinen ve dış etkenlere karşı dayanıklı bir yapı malzemesidir. Betonun en büyük avantajı ise; ucuz ve yapım alanında üretilen bir malzeme olmasıdır. Beton malzemesinde oluşan kılcal çatlaklarının içerisinde az miktarda da olsa nem ve su bulunur. Bu nem ve su, kalsiyum tuzlarını ve bazı kimyasal iyonlarını içerir. Bu sebeple beton heterojen yapıya sahip bir elektrolit olarak düşünülebilir. Oysaki betonun iyonik iletkenliği çok düşüktür. İletkenliğinin az olması donatı demirlerinin üzerinde korozyonun büyümesini güçleştirmektedir (Şahin 2002).

Betonda boşluklu yapılar bulunmasına karşın, betonun difüzyona karşı dayanımı sebebiyle, atmosferik gazlara (oksijen, karbondioksit, sülfürdioksit, azot gibi) ve en önemlisi klorür olmak üzere tuz iyonları gibi zararlı maddeler bulunduran çözeltilerin donatı yüzeyine ulaşımını engelleyen fiziksel bir engeldir. Bu özellik ise; su/çimento oranı, su miktarı, pas payı v.b. etkenlere bağlıdır.

Beton içinde bulunan toplam boşluk oranı betonun mukavemetini ve geçirimsizliğini etkileyen önemli bir etkidir. Yani boşluk oranının artması beton mukavemetinin düşmesine, permeabilitenin ise artmasına sebebiyet verir. Betonarme çeliklerinin korozyondan korunmasında en önemli faktör beton örtü kalınlığıdır. Beton örtüsü, korozyon hızının azaltılmasında, betonun elektriksel direncinin artırılmasında önemli bir faktördür (Mailvaganam 1992, Çakır 1997, Yüzer 1998, Şahin 2002). Betonun durabilitesini ve dayanımını arttıran, korozyona karşı direnç göstermesinde yararı olan puzolanik malzemelerin de olumlu etkileri görülmektedir. Çimentodan daha ince olan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik malzemelerin süper ve hiper akışkanlaştırıcı olarak bilinen yeni nesil akışkanlaştırıcılarla birlikte kullanılması, daha dayanıklı betonlar üretilmesine olanak sağlamıştır.

2.2 Betonarme

Taneli kompozit bir yapı malzemesi olan betonun mekanik açıdan kusuru, çekme gerilmeleri altındaki dayanımının, basınç gerilmeleri altındaki dayanımına oranla çok küçük olmasıdır (Kürklü 2011). Bu nedenle beton gibi çekme dayanımı düşük olan bir malzemeden taşıyıcı sistemler yapmak zordur ve ekonomik olmayan çözümler ortaya çıkarmaktadır. Betonun çekme dayanımına karşı zayıflığını ortadan kaldırmak için 19. yüzyılda, çekme dayanımı ve sünekliği yüksek olan çelik çubuklar ile homojen ve elastik olmayan bir malzeme olan beton beraber kullanılmaya başlanmıştır. Böylece betonarme olarak nitelendirilen demir takviyeli beton elde edilmiştir. Betonarme, beton ve çelik donatı çubuklarının beraber çalışarak, birbirlerinin eksikliklerini tamamlayacak şekilde bir araya gelmesi şeklinde de tanımlanabilir (Şahin 2002, Çınar 2011).

Betonarme her iki malzemeninde avantajlarına sahiptir. Örneğin; maliyeti düşüktür, çevre koşullarına ve yangına karşı dayanıklıdır, basınç mukavemeti yüksektir, her istenen şekil ve biçimde yapılabilir. Betonarme, çeliğin yüksek çekme mukavemetine, yüksek sünekliği ve dayanıklılığı özelliklerine sahiptir. Dolayısı ile günümüz yapılarında yaygın olarak kullanılır. Örneğin; bina, köprü, baraj, depo ve birçok diğer yapıların inşa edilmesinde betonarme kullanılmaktadır (Kaplan 2009).

İçine çelik konan her betonun betonarme olmadığı unutulmamalıdır. Yükleri taşıyan çelik profilli yangından korumak veya yüklerin yayılmasını sağlamak amacıyla betonla örtmek, çelik yapı olması niteliğini değiştirmez. Ayrıca rötire, sıcaklık değişimi gibi nedenlerle oluşabilecek çatlakları önlemek amacıyla, büyük beton kütleleri, yüzeyine yakın bir çelik hasır konulsa bile bunlar yinede beton yapılardır (Sümer 2009). Çelik çubuklar ve betondan oluşan malzemenin betonarme olabilmesi için, bütün bir şekilde beraber çalışmaları gerekir. Yani çubukların ve çevresindeki betonun deformasyonunun aynı olması için, çevresindeki beton kütleyle iyi bir şekilde kenetlenmelidir. Beton ve çeliğin birlikte çalışmasını sağlayan bu olay “kenetlenme” veya “aderans” olarak adlandırılır (Ersoy ve Özcebe 2004).

2.3 Betonarmede Kullanılan Çelikler

Çelikler, ağırlığının %95'i Fe (demir)'den oluşan, mekanik olarak işlenebilen (dövülerek, preslenerek, haddeden geçirilerek şekil verilebilen) demir alaşımlardır. Çelik, bünyesinde belli oranlarda C (karbon) bulundurur. Çeliğe istenen bazı özellikleri verebilmek için çelik cevherine karbondan başka katılan elementlere alaşım elementleri denir. Üretilmek istenen çeliğe göre çelik içerisine ilave olan alaşım elementleri ise; C, Cr, V, Ni, Cu, Mn, Si, Mo v.b.'dir. Bu alaşım elementlerinin katılmasının sebebi sünekliği yüksek olan çelik elemanın sünekliğini düşürmeden çekme mukavemetini artırmak, çeliğin darbelere karşı dayanımını iyileştirmek, korozyona karşı dayanımını artırmak, aşınma dayanımını iyileştirmek v.b. nedenlerden dolayıdır (Tama 2012).

Beton ve çeliğin beraber kenetlenerek çalışmasından oluşan betonarmede eğilme ve çekme ile zorlanan taşıyıcı yapı elemanlarında çelik donatının görevi çekme kuvvetlerini karşılamaktır. Yine kesitlerde oluşan, kayma gerilmelerinin karşılanmasında da betonun yetersiz kaldığı durumlarda çeliğe iş düşer. Ayrıca donatı, betonda oluşan sıcaklık değişimi, çatlama gibi etkilerden oluşan çekme gerilmelerinin yüklenmesini ve çatlak genişliklerinin azami ölçüde kalmasında, rötre ve sünme etkilerinin bir kısmının karşılanmasında yarar sağlar. Kolonlarda bulunan betonarme donatıları basınç kuvvetleri altında zorlanan betonun taşıma kapasitesini fazlalaştırır. Oluşan büyük çatlaklara karşı direnç gösterir ve meydana gelen eğilme momentlerini düşürür. Sadece basınç kuvvetleri ile zorlanan ve burkulma tehlikesi olmayan yapı elemanlarında, betonun yüksek basınç mukavemeti nedeniyle betonarme demirlerinin önemi fazla değilse de bu tür betonarme yapılarda yarılmalara karşı enine donatı (etriyeler) veya fret donatısı kullanılır (Kumbasar 2003, Kürklü 2005, Altıneller 2008).

Çelik çubuklar, imalat metotlarına, en küçük akma dayanımlarına ve yüzey özelliklerine göre üç farklı şekilde sınıflandırılabilirler (TS 708 2010).

- Beton çelik çubukları imalat metoduna göre;
 1. Sıcak haddeleme işlemi ile üretilen
 2. Sıcak haddeleme esnasında ısıtılarak uygulanarak imal edilen
 3. Soğuk mekanik işlemi ile imal edilen olmak üzere üç sınıftır.

- Bunun yanında betonarme yapıda kullanılan çelik çubuklar en küçük akma sınırı gerilmelerine göre;
 1. En küçük akma sınırı 220N/mm^2 (S220 veya BÇI)
 2. En küçük akma sınırı 420 N/mm^2 (S420 veya BÇIII)
 3. En küçük akma sınırı 500 N/mm^2 (B500 veya BÇIV) olmak üzere üç sınıfa ayrılır.
- Beton çelik çubukları yüzey özelliklerine göre;
 1. Düz yüzeyli (D)
 2. Haddeleme sırasında yüzeyinde sürekli veya kesintili enine, boyuna veya eğimli çıkıntılar veya fitiller oluşturulmuş nervürlü (N)
 3. Yüzeyinde girintiler oluşturulmuş profil yüzeyli (P) olmak üzere üçe ayrılır.

Düz yüzeyli çeliğin dayanımı düşüktür ve beton ile aderansı iyi değildir. Bu yüzden S220 çeliğinin kullanımı ülkemizde giderek azalmıştır uygulamada da artık nadir şekilde görülmektedir. Düz donatılar ile süneklik özelliğinin kazandırılması da oldukça güçtür. Donatı akma gerilmesine ulaşmadan betonla donatı arasındaki aderans yok olabilmekte ve donatı betondan sıyrılabilir. Düz donatılar ancak etriyeler gibi ankraj ve bükümün, uygun uç kancaları ile sağlandığı yerlerde uygun biçimde kullanılabilir (Celep ve Kumbasar 2001).

Nervürlü çeliğin dayanımı yüksektir ve beton ile daha iyi kenetlenir. Nervürler bir olta gibi davranır, çeliğin beton içinden sıyrılması zorlaşır. Günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle kolon, kiriş ve perdelerin uç kısımlarında kullanılır. Bir de B500 sınıfında yer alan ticari adı tempcore olan inşaat çelikleri vardır. Bunlar istinat duvarlarında, radye temel plakalarında, döşemelerde gibi yerlerde kullanımı günden güne artan çelik sınıfıdır (Topçu 2015).

Çelik betonarmede kullanılmadan önce çeşitli cihaz ve el aletleri vasıtası ile belli şekillere getirilir. Bu şekiller vasıtası ile kolon, kiriş, döşeme, merdiven gibi yapıyı teşkil eden ana unsurlar meydana getirilir. Bu işlemlerin yapımında çelik çubuklar, etriyeler, pilyeler, çelik teller, kancalar, kaynak ekleri gibi malzemeler kullanılır ve bu

malzemelerin tamamı iletkendirler. Çelik çubuklar fabrikaların tamamında 12m boyunda üretildiklerinden daha uzun yapılarda bu çubuklar birbirlerine bu elemanlar vasıtası ile eklenerek tam bir gövde yapısı meydana getirilir. Yapıda kullanılan ve çelik içeren elemanlar çelik hasırlar, perdeler, kolonlar, kirişler, döşemeler, merdivenler, rampalar, dış cephe kaplamaları, çelik yapıların tüm omurgası, uzay kafes gibi çelik çatı ve taşıyıcı sistemler olarak sıralanabilir (Ekinci 2005).

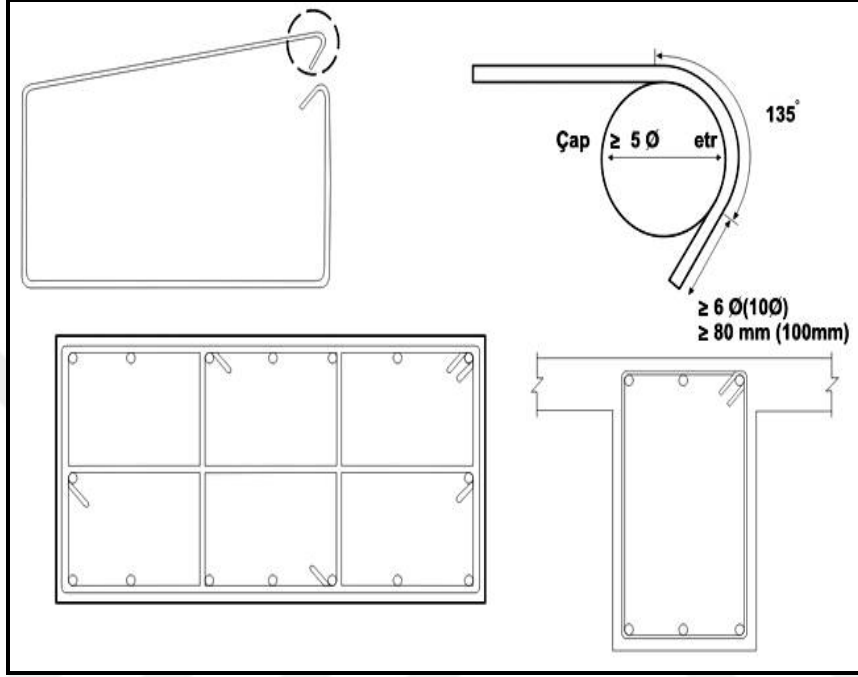
2.3.1 Betonarme Çeliklerinin Şekillendirilmesi

Etriye, betonarme yapılarda kolon ve kirişlerde yatay donatı olarak kullanılan, elemanlara gelen kesme kuvvetlerine karşı dayanım sağlayan elemanlardır. Kısaca açıklamak gerekirse kolon ve kirişlerden geçen demirleri enine saran bir gereçtir. Bunun yanı sıra elemanların ve genel olarak yapının daha sünek davranması için sıklaştırma ve boyuna donatılarında burkulmasını engellemek için (sargılama) kullanılır (İnt. Ky.2).

Etriye, herşeyden önce, donatı kafesinin montajında ve yerleştirilmesinde yaş beton içinde stabilitesini sağlamak için gerekli ve vazgeçilmez bir elemandır. Etriye, eğilme donatısının yerel burkulma mukavemetini artırmak için de gereklidir. Etriye, sık aralıklarla kullanıldığı zaman, sargı (kuşaklama) görevi yaparak, betonarme elemanın kesme mukavemeti yanında eğilme mukavemetini de arttırır; elemanlara daha büyük plastik şekil değiştirebilme özelliği kazandırır; eleman ve yapı sünekliliğini arttırır. Betonarme elemanının kesme ve kesme-eğilme mukavemetini sağlayabilmek için gereklidir; betonarme kesitin özellikle son limit duruma yakın zorlanmalarında yapının bütünlüğünü korumakta çok önemli bir elemandır; deprem hasarlarının pek çoğu ya etriye yetersizliğinden, ya da hatalı ve eksik düzenlenmiş etriyelerden kaynaklanır (İnt Ky.3).

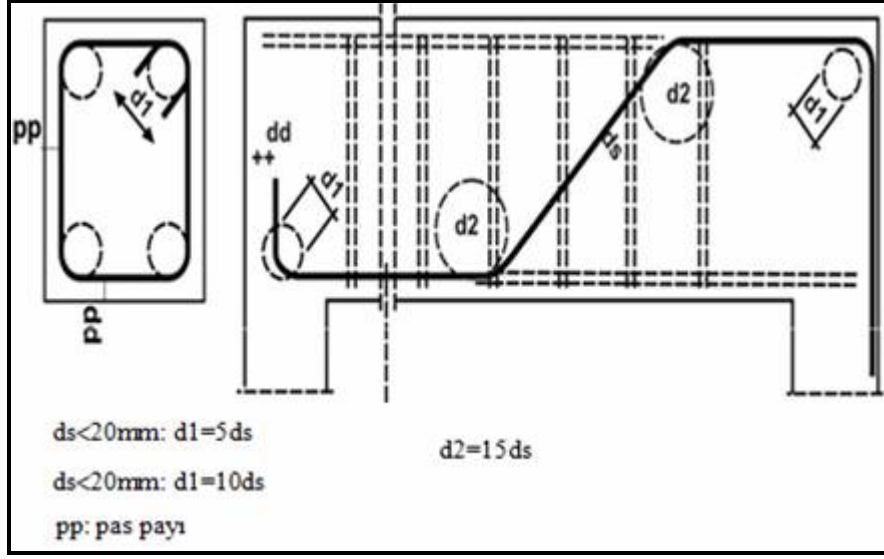
Özel deprem etriyelerinin her iki ucunda mutlaka 135° kıvrımlı kancalar bulunacaktır. Özel deprem çirozlarında ise bir uçta 90° kıvrımlı kanca yapılabilir. Bu durumda kolonun veya perdenin bir yüzünde, kanca kıvrımları 135° ve 90° olan çirozlar hem yatay hem de düşey doğrultuda şaşırtmalı olarak düzenlenecektir. 135° kıvrımlı kancalar, Ø enine donatı çapını göstermek üzere, en az 5 Ø çaplı daire etrafında

bükülecektir. Kancaların boyu kıvrımdaki en son teğet noktasından itibaren, düz yüzeyli çubuklarda 10 $\emptyset$ ve 100 mm'den, nervürlü çubuklarda ise 6 $\emptyset$ ve 80 mm'den az olmayacaktır (Şekil 2.1) (DBYBHY 2007, İnt. Ky.4).



Şekil 2.1 Özel deprem etriyeleri ve deprem çirozları.

Pilye kesme gerilmelerini karşılamak için belirli yerlerinden bükülmesiyle elde edilen şekillendirilmiş çelik donatı elemanıdır (Şekil 2.2). Pilyeler genellikle 45° açıyla bükülür ve bazı özel durumlarda 30° veya 60° açıyla da bükülebilir (MEB 2011).



Şekil 2.2 Nervürlü çeliklerde doğru pilye bükümü (İnt. Ky.5).

2.4 Durabilite

Beton, içerden ya da dışardan fiziksel, kimyasal, mekanik ve biyolojik etmenlere maruz kalır. Zamanla ilk baştaki özelliklerini yitirir. Betonun karıldığı andan artık hizmet veremeyeceği zamana kadar geçen süreye servis ömrü denilmektedir. Yapı malzemelerinin ve yapıların servis süreleri boyunca iç ve dış etkiler karşısında özelliklerini yitirmeksizin direnç göstererek bozulmadan işlevlerini yerine getirmeleri istenmektedir. Betonun bu etkilere karşı gösterdiği dirence kalıcılık, dayanıklılık veya durabilite denir. Bu etkiler dalga, akıntı, sürüntü maddelerinin çarpması gibi aşındırıcı; asit, kristalleşme, tuz etkisi, alkaliagrega reaksiyonu gibi kimyasal; donma-çözülme gibi fiziksel olabilir. Yani kısaca durabilite, betonun başlangıçta sahip olduğu özelliklerinin zaman içerisinde devam ettirmesidir (Akman 1992, Özgen 2006, Gönen 2009).

Durabilite, Amerikan Beton Enstitüsünün (ACI) tanımında yapının içinde bulunduğu hava koşulları, kimyasal etkiler varsa aşınma ile ilgili parametreler ve diğer tüm koşullar altında yapının özelliklerini koruması olarak tanımlanmaktadır. Avustralya standartlarında da bu tanımda aşınma etkileri, sülfat etkisi ve betonun geçirimsizlik ya da geçirimsizlik özelliği ön plana çıkmaktadır (TMMOB 2004).

Yapıların servis ömrünün uzatılması için gerçeğe uygun değerlendirmelerin yapılması ve bu sürenin önceden tahmin edilebilmesi tasarımcılar, uygulayıcılar ve kullanıcılar

için önemli bir kazanımdır. Türkiye’de özellikle 1999 Marmara depremi sonrasında kalıcılık önem kazanmıştır (Gönen 2009). Bu konuya dikkat çekmede atılmış önemli bir adım 1-3 Ekim 2003 tarihinde düzenlenen “5. Ulusal Beton Kongresinin” teması “Betonun Dayanıklılığı (Durabilite)” seçilmesidir. Kongre içeriğinin; betonun boşluk yapısı ve permeabilitesi, betonarme çubuklarının korozyonu, sülfatın ve diğer kimyasal maddelerin etkisi, donma çözülme ve buz çözücülerinin etkileri, biyolojik etkiler, yüksek sıcaklık ve yangın etkisi, aşınma-kavitasyon ve erozyon olaylarının etkisi, dayanıklılığa göre yapı tasarımı ve malzeme seçimi, yapıların servis ömrünün tahmini ve karşılaştırmalı maliyet analizi gibi başlıkların bulunduğu görülmektedir (İnt. Ky.6).

Beton durabilitesinde etkili olan faktörler başta betonun kalitesine bağlı olması ile şu şekilde sıralamak mümkündür; performansta bileşen malzemeler, karışım oranları, üretim yöntemi, betonun bakım ve kürü gibi süreçler ile çevre koşulları etkilidir. Beton uygun şekilde kür edilmemişse beton dayanım değeri yaklaşık %30 oranında düşebilir, fakat durabilite bu durumdan daha da olumsuz etkilenir. Kür edilmemiş betonun geçirimsizliği yaklaşık 10 kat artabilir, bu durumun oluşması korozyonu olumsuz yönde etkiler ve durabilite önemli ölçüde azalır. Uygun beton durabilitesi için istenilen amaca uygun malzeme seçilmeli, su da dâhil olmak üzere tüm bileşenler standartlara uygun olmalı, karışım iyi tasarlanmalı ve taze betonun yeterli biçimde yerine yerleştirilmesi gerekir. Özellikle ilk sertleşme sürecinde yüksek sıcaklık farklarından kaçınılmalı, beton iyi korunmalı ve gerekli olan kür aksatılmadan yapılmalıdır. Tüm bunlar yapılırsa betonda oluşan ve oluşabilecek oturma çatlakları, plastik rötre çatlakları ve kısıtlanmış rötre çatlakları önlenebilir. Bu çatlakların önlenmesi beton durabilitesinin avantajıdır (Çorbacioğlu 2008).

Beton veya betonarme elemanların işlevsel özelliklerini yerine getirmeleri durabilitelerine bağlıdır. Yapıya etki edecek olan hesap dışı yüklerin sebep olduğu bozulmalar haricinde de, yapılarda bozulmalar olmaktadır. Yalnız doğru taşıyıcı sistemin seçilmesi, projelendirilmesi ve uygulanması durabilitenin sağlandığı anlamına gelmez. Beton ve betonarme elemanların öngörülen servis ömürleri süresince maruz kalacakları çevresel etkilerin (sıcaklık, nem ve kimyasal maddelerin taşınım mekanizması ve bunları etkileyen parametreler) ve bu etkilere karşı alınacak önlemlerin

yapıları tasarlayan mimar ve mühendisler tarafından bilinmesi ve projelendirmenin bu esaslar çerçevesinde yapılması gerekmektedir (Baradan vd. 2002). Beton veya betonarme elemanların mekanik sebepler dışındaki bozulma süreçlerini kontrol eden ana faktör su veya nemin varlığıdır. Su betonun bünyesine girerek bir takım reaksiyonlara sebep olduğu gibi beton içine zararlı maddelerin taşınmasında rol oynar. Beton yüzeyinde oluşan çatlaklar ile betondaki boşluklar, suyun taşınmasındaki etkenlerdir. Yapıda kalıcılığın sağlanması için çatlak oluşumunun önlenmesi için gerekli tedbirlerin alınması ve beton bünyesinde boşlukların dağılımının kontrol edilmesi şarttır. Betonun bozulması çoğunlukla tek bir nedene bağlanamaz. Birkaç etkinin bir arada veya peşpeşe oluşması sonucu, beton veya betonarme elemanların umulmadık kısa sürelerde bozulduklarını görmek mümkündür. Beton veya betonarme yapıların bozulmalarına yol açan etkenler fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyolojik kökenli olarak sınıflandırmak mümkündür (Özgen 2006).

2.5 Korozyon Mekanizması

Korozyon mekanizması, malzemelerin özellikle metal ve alaşımların, çevrenin çeşitli etkileriyle kimyasal ve elektrokimyasal değişme ya da fiziksel çözünme sonucu yani heterojen tepkimelerle aşınarak yüzeysel görünümünün bozularak parçalanması hatta kullanılmaz hale gelmesidir. Ayrıca metallerin çevreleri ile tepkimeye girerek metalik özelliklerini kaybetmesidir (Yaşar 1995, Üneri 1998, MEGEP 2009). Terminolojik olarak korozyon bu şekilde tanımlansa da fiziksel olarak korozyon, malzemelerin doğada bulunan en kararlı (en düşük enerjili) durumları olan oksit haline geçme olayıdır (Baradan vd. 2002). Doğada cevher halinde bulunan metal hammaddesine yüksek enerji verilerek, istenilen özellikleri sağlayan mühendislik malzemeleri üretilir. Fakat bu malzemeler uygun ortam ile karşılaştığı zaman doğada bulundukları şekildeki mineral formlarına geri dönmek isterler. Bu bozulma süreci korozyon olarak tanımlanır. Korozyon yerine bazı durumlarda oksitlenme, paslanma, küflenme terimleri de kullanılmaktadır (Yiğiter 2008).

2.6 Korozyon Gelişimi

Korozyon birbirini tamamlayan iki elektro-kimyasal reaksiyonla oluşur. Birincisi oksidasyon ikincisi ise redüksiyon reaksiyonlarıdır. Atom halindeki metalin elektron

kaybetmesine oksidasyon denir. Bunun sonucunda iyon haline dönüşmesi ile anod reaksiyonu oluşur. Redüksiyon ise atomdan ayrılan kaybedilen elektronların başka bir yerde harcanmasıdır bu da katot reaksiyonu diye adlandırılır (Boğa 2005, Onaran 2006). Diğer kimyasal olaylarda olduğu gibi anodik ve katodik reaksiyonlar birbirleri arasında denge halindedirler. Anottan ayrılan elektron katoda doğru ilerler çözeltideki negatif iyonlar ise anoda doğru yönelirler. Korozyon potansiyeli ise anodik ve katodik reaksiyon hızlarının dengede olduğu potansiyel değeridir. Bu denge reaksiyonlarından birinin önlenmesi korozyon sürecini durdurur (Boğa 2005, Doğan 2008).

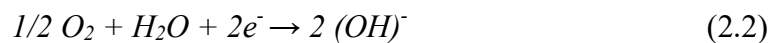
Yani korozyon mekanizmasının başlayıp ilerleyebilmesi için dört unsur vardır. Aksi şekilde bu unsurlardan biri sağlanmadığında korozyon gelişimi durur. Bu unsurlar şunlardır:

- Anodik reaksiyonlar,
- Katodik reaksiyonlar,
- Anodik ve katodik bölgeler arasında iyon transferi,
- Elektron akışı (Yiğiter 2008).

Demirin anot ve katot reaksiyonları bazı tepkimeler ile oluşmaktadır. Anodik reaksiyon metallerin çözünmesini tarif eder. Demir için anodik reaksiyon, Denklem 2.1 gösterilmiştir:



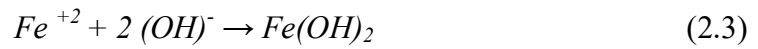
Anot reaksiyonun da metal çevresinde açığa çıkan elektronlar ortamdan uzaklaştırılmak istenir. Bunun temel sebebi metalin bulunduğu bölgede malzeme kaybı vardır bu kaybın sürekli olması hasar oluşmasına ortam hazırlar. Bu açığa çıkan elektronların ortamdan uzaklaştırılması ve azaltılması redüksiyonun olduğu katodik reaksiyonu ile gerçekleşir. Katodik reaksiyon ise su ve oksijenin hidroksit iyonlarını oluşturduğu indirgenme işleminden oluşur Denklem 2.2 de gösterilmiştir:



Anodik ve katodik reaksiyon bölgeleri arasında bulunan elektrolit ortam iyon transferi görevini yerine getirir. Elektrolit anoda ve katoda temas eden bir materyaldir.

Anot ile katot arasındaki elektron akımı ise metal üzerinden gerçekleşir. Bu metalik bağlantı hem anoda hem de katoda temas eder (Odabaşı 2007).

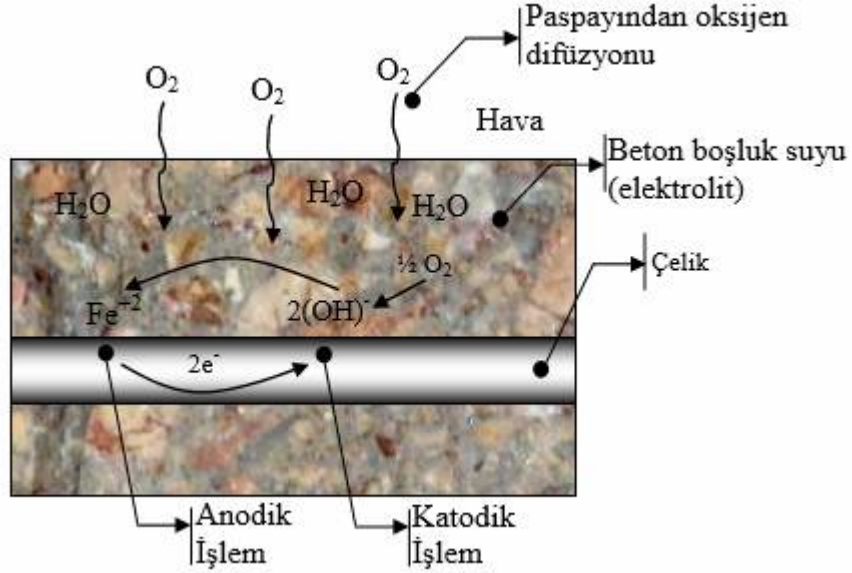
Daha sonra anodik ve katodik reaksiyon ürünleri birleşerek Denklem 2.3 ve Denklem 2.4 deki korozyon ürünleri meydana getirirler.



2.7 Beton Yapılarda Donatı Korozyonunun Mekanizması

Çelik, hava ve su içinde hızla korozyona uğradığı halde, beton içinde pasif haldedir ve korozyon hızı oldukça düşük seviyededir. Beton rutubetli ve gözenekli yapıda olmasına karşın, beton içinde bulunan çeliğin korozyona uğramamasının temel sebebi betonun alkali özellikte olması ile açıklanır (Yalçın ve Koç 2004). Beton, içerisindeki çelik donatıya kimyasal ve fiziksel olarak koruma tabakası sağlamaktadır. Çimento ile su arasındaki hidratasyon reaksiyonları sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ (sönmüş kireç), NaOH ve KOH bileşenlerinden kaynaklanan ve betonun pH değeri yaklaşık 12-13 civarında olan yüksek alkaliniteye sahip pasivasyon tabakası donatıyı kimyasal korozyona karşı korur ve bu bileşenler beton pH'nın yüksek seviyede tutulmasını sağlar (Alekseev 1993, Öztekin 2001). Beton içindeki yüksek alkali ortamı, donatı çeliğine sıkıca yapışarak bir film oluşturur (Gel 2003). Beton içerisindeki çelik, normal olarak çelik ile çimento ara yüzeyindeki alkalın çimento matrisi içerisinde oluşan pasif film tarafından korozyondan korunmaktadır (Ngala *et al* 2002). Geçirimsiz bir beton, bu tabakaya zarar verebilecek O_2 , CO_2 gibi gazların ve Cl iyonlarının ya da suyun betona girişini önleyerek fiziksel bir engel sağlar. Ancak pasif film tabakası betonun fiziksel özellikleri yeterli olmadığında, bir şekilde sözü edilen maddelerin girişi engellenemediğinde veya alkalinitenin ana bileşeni olan $Ca(OH)_2$ 'in karbonatlaşarak bazikliğini yitirmesi ile pH'nın düşmesi

sonucunda zarar görür ve depassivasyona uğrar yani başka bir deyişle pasivasyon tabakası hasar görür. (Şekil 2.3) (Doğan 2008, Ormellese *et al* 2009).



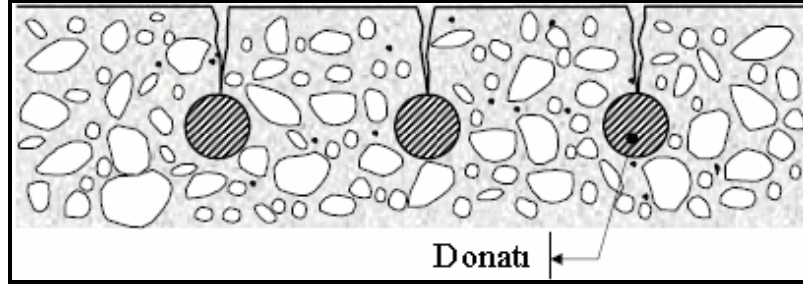
Şekil 2.3 Beton içine gömülü çelik donatının elektro-kimyasal korozyonu.

Betonarme çeliklerinin korozyonu birçok faktöre bağlı son derece karışık bir fizikokimyasal olaydır. Korozyon olayını açıklığa kavuşturmak için betonun tüm fiziksel ve kimyasal özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Korozyon dıştan gelen ve betonarme çeliklerine temas eden maddelerden kaynaklanır. Betonarme bir yapıda betonun fiziksel ve kimyasal olarak koruyucu özellikleri ile metali (çeliği) korozyondan koruduğu bilinmesine karşın, betonarme yapılarda donatının korozyonuna sebep olan diğer faktörler de şu şekilde sıralanabilir:

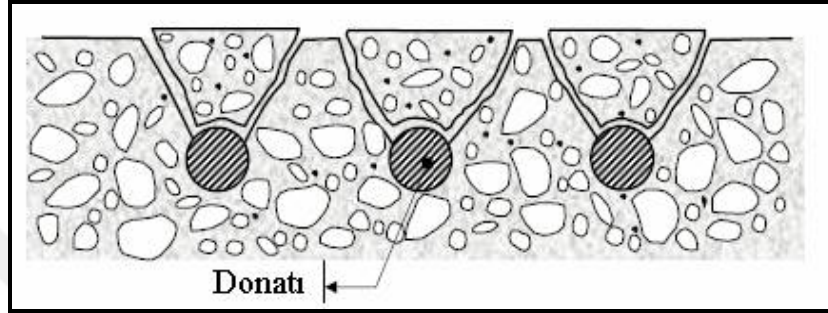
1. Çimento tipi,
2. Çimento miktarının yetersiz olması,
3. Betonun yaşı,
4. Beton porozitesi,
5. Su-çimento oranı,
6. Nem,
7. Sıcaklık,
8. Betonun pH'ı,

9. Betonun yeterince vibrasyonla yerleştirilememesi, krnn (bakım) yapılmaması, agrega ve imento pastasının segregasyonu ile betonun üniform olmaması,
10. Pas payı kalınlığının gereğinden az olması,
11. Kaçak elektrik akımlarının varlığı,
12. Beton ile temas eden topraktaki organik maddeler,
13. Ortamın zararlı etkileri (şahin 2002, Yalçın ve Koç 2004, İnci 2011).

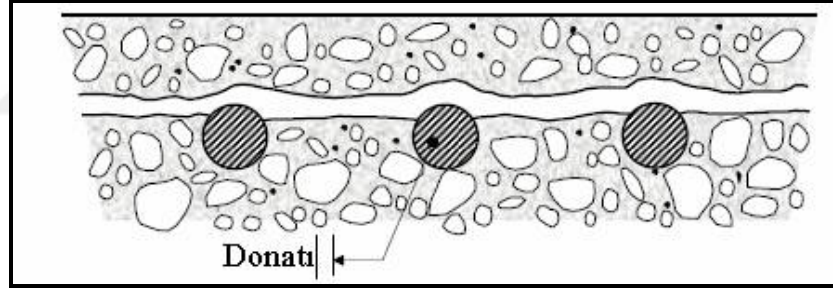
Yaşadığımız yüzyılda korozyon, yapı elemanlarının servis ömürlerini etkileyen en önemli etken olmaktadır. Betonarme eliklerinin korozyonu sonucu betonda oluşan çatlaklar ve parçalanmalar sadece şekil bozukluklarına neden olmakla kalmaz, aynı zamanda yapıyı oluşturan betonların mekanik kuvvetlerini de azaltır. Betonarme ubuklarında korozyon denince akla ilk gelen çeliğin kaybedilmesidir. Ancak asıl tehlike betonarme donatılarının korozyon sebebiyle kesit alanlarının küçülmesi, süneklik kaybına uğraması ve çekme gerilmelerinin azalmasından kaynaklanır. elik donatı korozyon sonucu oluşan kimyasal bileşikler (pas), metale göre çok daha büyük hacim kaplaması nedeniyle beton bünyesinde içsel gerilmeler oluşur ve betonda oluşan hacim artışı önce betonarme donatılara paralel çatlamalara, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülmesine sebep olur (Kaftan 2006, il 2006, Haberal 2010). Betonun bir kere çatlamasından sonra, yapı tamamen atmosferik etkiler altında kalır ve yapı büyük bir hızla ömrünü doldurur. Çatlama, kapak atma ve pas payı tabakasının dökülmesi türündeki hasarlar şekil 2.4-şekil 2.6’da şematik olarak verilmiştir (Yiğiter 2008).



Şekil 2.4 Çatlama hasarı.



Şekil 2.5 Kapak atma hasarı.



Şekil 2.6 Pas payının tabaka halinde dökülmesi hasarı.

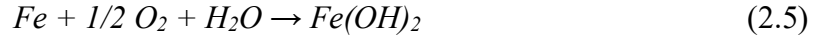
Değişik tipte korozyon mekanizmaları olup, betonarmede korozyonu dört ana başlıkta incelemek mümkündür:

- Atmosferik korozyon,
- Elektrolitik korozyon,
- Klorid korozyonu,
- Temas korozyonu (Çil 2006).

2.7.1 Atmosferik Korozyon

Açıktta bırakılan çelik çubuklarda veya betonarme yapılarda pas payı tabakasının dökülmesi ile tamamen açıktta kalan çelik donatılarda atmosferik korozyon görülür.

Oksijen ve nemin beraber donatıyı etkilediği durumlarda oluşur. Atmosferik korozyon Denklem 2.5 ve Denklem 2.6 da kimyasal reaksiyonlar ile gelişir. Öncelikle demir atmosferdeki nem ve oksijen ile birleşir (Yiğiter 2008).

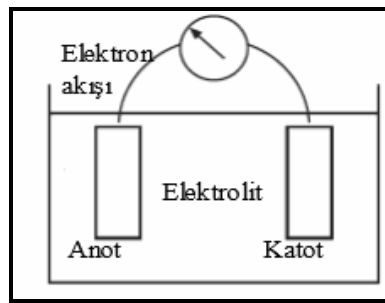


Daha sonra $Fe(OH)_2$ de aşağıda gösterildiği şekilde ayrışır.



2.7.2 Elektrolitik Korozyon

Ortamdaki elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu pilin meydana gelmesi bu tür korozyonun sebebidir (Şekil 2.7). Korozyon öncelikle noktasal olarak başlamasına karşın daha sonra sürekli hale dönüşür. Bu korozyonda reaksiyonların sürekli olabilmesi için su ve nem varlığı şarttır. Bağıl nem ve oksijen ters orantılı olduğundan bağıl nemin yüksek olduğu durumda oksijen varlığı azalır ve doymun ortamda (%100 bağıl nem) oksijen bulunamayacağı için reaksiyonlar yavaşlayacak veya duracaktır. Ters durumda, kuru ortamda ise katodik reaksiyonlar için gerekli nem bulunmadığından reaksiyon gerçekleşmeyecektir (Çil 2006, Yiğiter 2008).



Şekil 2.7 Basit bir pil modeli (Roberge 2000).

2.7.3 Klorid Korozyon

Betonda gerçekleşen karbonatlaşma olayı sonucunda, alkali özelliğini yitirmiş, geçirgen betonarme elemanların yüzeyinden kapiler boşluk ve çatlaklardan donatıya ulaşan klor

iyonlarının sebep olduğu iki aşamalı ve sürekli bir korozyon tipidir. Klorür iyonları çelik çubuklarının korozyonu açısından en zararlı madde olarak kabul edilirler. Betonarme yapılarda en tehlikeli korozyon tipi olarak nitelendirilir. Klorür iyonları çelik donatı üzerinde oluşan ve korozyonun gelişimini engelleyen pasif tabakanın çözünmesine yol açmaları bu etkilerden en önemlisidir. Klorür iyonları, ortamın elektrolitliğini arttırarak ve elektriksel direncini azaltarak anot-katot iyon akışını kolaylaştırırlar. Böylece akım şiddetinin artışına bağlı olarak korozyon hızı da artar. Ayrıca asit karakterli olmaları ve ortamın pH değerini indirgemeleri bir diğer olumsuz etkidir. Klorür iyonları metal tarafından O_2 ve $(OH)^-$ iyonlarına kıyasla çok daha kolay adsorbe edilirler. Böylece katalizör görevi görerek, anodik reaksiyonun kolaylıkla oluşmasını sağlarlar ve demirin iyonlaşmasını çarpıcı biçimde hızlandırırlar (Çil 2006, Yiğiter 2008).

2.7.4 Temas Korozyon

Elektriksel olarak temas halinde bulunan farklı elektropotansiyellere sahip metallerde görülen bir paslanma olayıdır. Betonarme eleman içinde iki farklı metalin kullanılması nadir rastlanan bir durumdur. Bu nedenle betonarmede ender olarak rastlanır (Baradan vd. 2002). Ayrıca donatının korozyondan korunması için çeşitli maddelerle kaplanması halinde, kaplanmış ve kaplanmamış donatıların bir arada kullanımı da bu tür korozyonun gelişmesine yol açabilir (Yiğiter 2008).

Nedeni ve tipi ne olursa olsun, betonarme elemanlarda meydana gelen korozyon, yapının güvenliğini tartışılmaz bir şekilde tehdit eden ve hatta sona erdiren bir durumdur. Özellikle depremlerden sonra hasar gören yapıların durumu incelendiğinde, donatıların korozyon sebebiyle büyük kesit kayıplarına uğradığı, hatta bazı betonarme elemanlarda donatıların tamamen yok olup sadece izlerinin kaldığı görülmüştür (Şekil 2.8 ve Şekil 2.9). Bu durum, yıkımın esas sebepleri arasında donatı korozyonunun ilk sıralarda yer aldığını göstermektedir (Çil 2006).



Resim 2.1 Donatıdaki korozyondan dolayı betonda oluşan çatlak ve beton kırıldığında içerdeki çelik donatının korozyonu (Kaplan vd. 2005).



Resim 2.2 Donatının korozyon sebebiyle ufalanması (Kaplan vd. 2005).

2.8 Korozyon Çeşitleri

Metaller ve alaşımlar, içinde bulundukları ortamın özelliklerine göre çeşitli şekillerde korozyona uğrarlar. Bu korozyon türleri birbirlerinden oldukça farklılık arz etmektedir. Görünümüne göre korozyon çeşitlerini aşağıdaki gibi sınıflandırılır (Roberge 2000).

Çıplak gözle görülebilen,

- Üniform (Genel)
- Galvanik
- Çukur
- Çatlak

Özel araçlar ile görülebilen,

- Erozyon
- Aşınma
- Kazımalı
- Taneler arası

Mikroskop altında görülebilen,

- Gerilimli korozyon çatlaması

Metaller üzerinde oluşan korozyon çeşitleri genel olarak on başlıkta sınıflandırılabilir.

2.8.1 Üniform (Genel) Korozyon

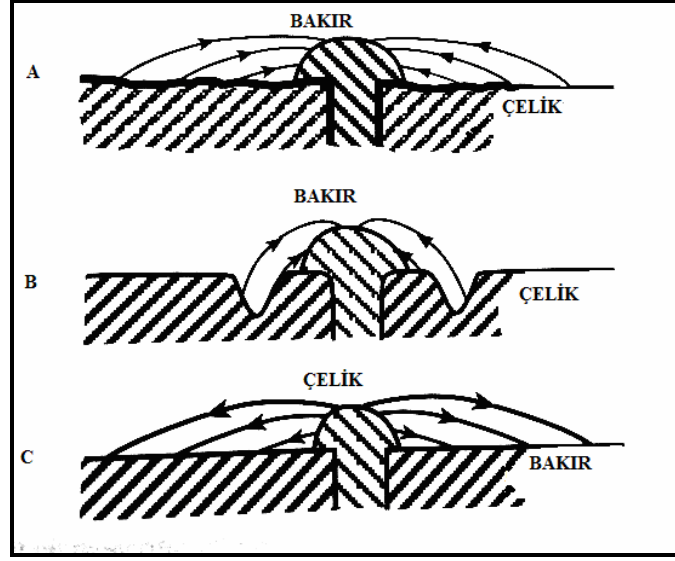
Karşılaşılan en yaygın ve en basit korozyon çeşitlerinden birisidir. Geniş bir yüzey ya da bütün yüzeyin tamamında kimyasal ya da elektrokimyasal tepkimenin aynı ölçüde yürümesi ile metal yüzeyinin her noktasında aynı hızla yürüyen korozyon çeşididir (Jones 1996, Schweitzer 1996). Eğer korozyon olayı üniform olarak yürürse, metal kalınlığı yüzeyin her noktasında aynı derecede azalır. Metal giderek inceler ve zamanla kullanılamaz hale gelir. Korozyonun yüzeyde eşit dağılımının başlıca nedeni anodik ve katodik çevrelerin devamlı olarak yer değiştirmeleridir. Üniform olarak dağılan korozyonun sebep olduğu metal kaybı diğer korozyon türlerine oranla çok daha fazladır. Ancak buna karşın en az korkulan korozyon türü olduğunu belirtmek gerekir. Çünkü korozyon hızının hesaplanması mümkündür ve metalin kalınlığı her noktada aynı kalır, malzeme hesaplanan servis ömrünce dayanımını korur. Böylece agresif ortamlara terk edilen parçaların ömrüne ilişkin tutarlı tahminlere ulaşılabilir. Bu tip bir korozyona atmosferik ortamda açıkta bekletilmiş çeliklerde rastlanır. Metalin yüzey kısmında renk

değişimi ve matlaşma olarak kendini gösterir. Bu korozyon türüne demirin paslanması, gümüşün kararması, bakırın renginin matlaşması gibi örnekler verilebilir. Bu tür korozyon çeşitli koruma yöntemleri kullanılarak başarıyla kontrol altına alınabilir. Koruma için boyama, ortama inhibitör ilavesi, kaplama, ve katodik koruma gibi ve zımparalama, parlatma işlemleri ile yüzeyden temizlenebilir (Özbaş 1997, Yalçın ve Koç 2004, Çolak 2010, San 2012).

2.8.2 Galvanik (Metal Çifti) Korozyon

Elektrolitik bir ortamda elektriksel olarak temas halinde bulunan farklı iki metalin veya daha çok metalin maruz kaldığı bir korozyon türüdür. Bu farklı olan iki metal bir korozif ortama daldırılır ve elektriksel bağ ile birbirine bağlanırsa galvanik bir pil oluşur (Yalçın ve Koç 2004). Bu metallere elektrot potansiyeli daha yüksek olan oksidasyon yönünde daha büyük olan metal anot diğeri ise katottur. Diğer bir deyişle metallere daha asil olanı katot, daha aktif olanı ise anot olur. Anot olan metalden, katot olana doğru elektron akımı gerçekleşirken anot metalinde çözünme meydana gelir. Bu olayda katot olan metal korunurken anot olan metal korozyona uğrar. Potansiyel farktan oluşan bu tip korozyona galvanik veya metal çifti korozyonu denir. Böylece bir korozyon hücresi meydana gelir (Yiğiter 2008, Kayalı 2011).

Galvanik bir hücrede korozyon hızı, yürütücü kuvvet olan anot ve katot arasındaki potansiyel farka, devrenin toplam direncine bağlıdır (Yalçın ve Koç 2004). Örneğin, bakır ve çeliğin birlikte kullanıldığı durumlarda, her iki metalin temas etmesi ile bakırdan dolayı çelik korozyona uğrar. Ayrıca korozyon hızı çevre elektrolitin iletkenliği, katot/anot yüzey alanının oranı da etki eder. Eğer elektrolitin iletkenliği fazla ise korozyon geniş bir alanda etkisini gösterir. İletkenliğin düşük olmasında ise korozyon dar bir alanda şiddetli olarak kendini gösterir. Katot/anot oranının fazla olması anot akım yoğunluğunu artırır, şiddetli bir korozyon oluşturur ve madde kaybına sebep olur (Shreir *et al* 2000, Bülbül 2009). Bunun tipik örneği çelik plakaya yapılmış bakır perçin ile bakır plaka üzerine yapılmış çelik perçinde görülür (Şekil 2.8). (A) Küçük katot – büyük anot (elektrolit iletkenliği yüksek), (B) Küçük katot – büyük anot (elektrolit iletkenliği düşük), (C) Büyük katot – küçük anot (Yalçınve Koç 2004).



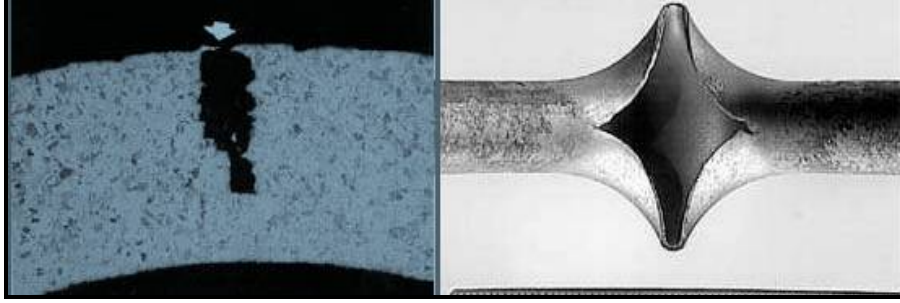
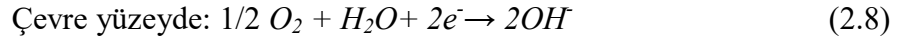
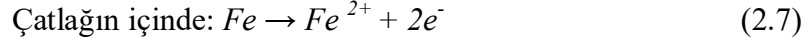
Şekil 2.8 Galvanik korozyonda katot/anot yüzey alanları oranının etkisi.

Galvanik korozyondan korunmak için birbirine yakın olan metaller seçilir. Katot/anot oranının büyük olmasından kaçınılmalı, her iki metale karşı anodik davranabilecek olan üçüncü bir metal kullanılabilir ayrıca anodik parçalar kolay değiştirilebilecek biçimde tasarlanır ya da daha uzun dayanması için daha kalın yapılması mümkündür (Gürü ve Yalçın 2004).

2.8.3 Çatlak (Yarık) Korozyon

Metal yüzey kısmında bulunan ince bir çatlak, dar olan bir aralık, iki levha arasında kalan boşluğa elektrolitin girmesi zor bir olaydır. Bu bölgelerde korozyon hızı diğer normal yüzeylere göre daha fazladır (Yalçın ve Koç 2004). Havanın girmesine engel olunmasından dolayı, bir çatlak içinde, elektrolitte farklı oksijen yoğunluğu meydana gelirse, bu durumda çatlak korozyonu oluşur (Şekil 2.9).

Çatlak korozyonunun mekanizması, çatlak içerisinde bulunan elektrolitin akışı çok yavaş olduğundan bu bölgede oksijen yoğunluğu çevredeki oksijen konsantrasyonuna göre daha fazladır. Oluşan bu farklılık çatlak içi ile çevre arasında bir yoğunluk hücresi oluşmasına sebep olur. Çatlağın iç kısmı anot, çatlağın çevresi ise katot bölgesi olur. Anot ve katot reaksiyonları Denklem 2.7 ve Denklem 2.8'deki gibidir (Yalçın ve Koç 2004).



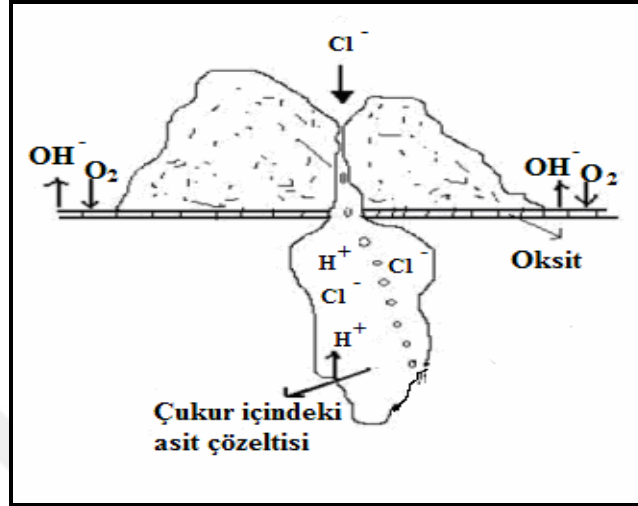
Şekil 2.9 Çatlak korozyonunun oluşumu ve çatlak (MEGEP 2009).

2.8.4 Çukur (Pitting) Korozyon

Çukur korozyonu, metal yüzey kısmının küçük bir bölgesinde herhangi bir noktada oluşan lokal anodik bir reaksiyon saldırısıdır (Şekil 2.10). Şayet çevre koşulları ve metal koşullara uygun ise, bu anodik reaksiyon birbirlerinin oluşmasına sebep olan bir seri otokatalitik reaksiyonlarla saldırı sonucu metalin bazı noktalarında çukurcuklar oluşur. Bu tip korozyon türünde anot ve katot bölgeleri birbirinden kesin şekilde ayrılmıştır. Anot, yüzeyin herhangi bir noktasında açılan çukurun içindeki (çukurun dibi) dar bir bölge, katot ise çukurun çevresindeki (çukur ağzı) geniş bir alandır. İyonik akım elektrolitten geçerken, elektronik akım ise metalden geçer (Yiğiter 2008, Bülbül 2009). Korozyon sonucu çukurcuklar gittikçe derinleşir ve metal o noktadan kısa sürede lokal bir hasara uğrar ve delinir. Metal yüzeyinde çok sayıda çukur oluşur. Oluşan çukurların içi genellikle korozyon ürünleri ile doludur. Oluşan çukurların çapı, derinliği, sıklığı kullanılan malzeme ve ortama bağlı olarak değişir. Çukur korozyonu, küçük bir bölgede olması ve çoğu kez bir anda ortaya çıkması sebebiyle en tehlikeli korozyon türüdür (Jayaraman 1999). Bu sebeple çukur sayısını ve derinliğini belirlemek oldukça güçtür.

Çukurcukların oluşması için uzun bir süre gerekir. Yalnız bu süreç başladıktan sonra hızlı bir şekilde çukurcuklar oluşur metali dayanım kaybına uğratar ve birden meydana gelen kırılma ile malzemenin tamamıyla kullanılmaz hale gelmesine neden olur. Bu korozyon türünün oluşumunda metal cinsi de önemli rol oynar. Çukur (pitting) korozyonuna, kullanım alanı geniş olan ve endüstriyel açıdan önemi fazla olan

paslanmaz çelikler ve alüminyum alaşımlar bu karşı daha duyarlıdır (Gilbert *et al* 1995, Jones 1996).

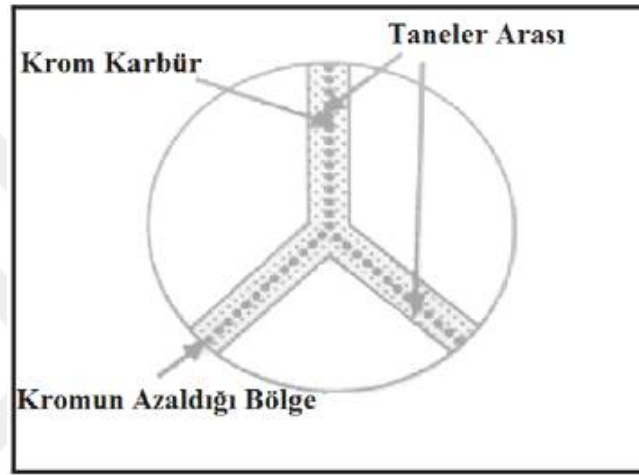


Şekil 2.10 Çukur korozyonu mekanizması (Uysal 2006).

2.8.5 Taneler Arası Korozyon

Metal ürünler katı kristal halinde bulunurlar. Metal atomları bu kristal yapı içinde düzgün olarak dağılmışlardır. Demir ve çelik kübik merkezli kristal yapıda bulunurlar. Bu kristal yapıları metallerin taneler arası korozyonunda etkilidir (Yalçın ve Koç 2004). Bu korozyonun temel nedeni; tane sınırlarının düzensiz olmasından ötürü potansiyelinin daha düşük olması ve bu sebeple potansiyel farkı meydana gelmesiyle element kayıplarının oluşmasıdır (Kayalı 2011). Taneler arası korozyonunun en belirgin özelliği çok az ağırlık kaybına karşın, korozyon hızının tane sınırları yakınında çok büyük değerlere ulaşabilmesidir. Taneler bütünlük ve şekillerini korurken, taneler arası bağ bozunmaya başlar. Sonuç olarak metallere özgü olan bazı davranışlarda önemli değişiklikler beklemek gerekir. Bunlardan en önemlisi; korozyonun etken olduğu bölgelerde mekanik dayanımının sıfıra indirgenmesidir. Parçaların dış görünüm ve ölçülerinde önemli bir değişiklik meydana gelmez. Bu şartlar altında taneler arası korozyonun gözlenmesi ve kontrol altına alınması oldukça güçleşir (Doruk 1982).

Taneler arası korozyonun en tipik örneği paslanmaz çeliklerde görülür (Şekil 2.11). Paslanmaz çeliklerde taneler arası sınır bölgelerinde krom miktarı oldukça azdır ve bu bölgelerdeki krom azlığından taneler arası korozyona oldukça dayanıksızdır. Paslanmaz çelikler yüksek sıcaklıkta ısıtılırsa veya kaynak yapılırsa, bünyesindeki Cr, C ile reaksiyona girer ve karbürleri (Cr_{23}C_6) bileşimini oluşturur. Krom karbür çelik içinde çözünmeyen bir bileşiktir ve taneler arasında sınır çizgisi boyunca toplanır (Yalçın ve Koç 2004).



Şekil 2.11 304 paslanmaz çelikte taneler arasında krom karbür (Cr_{23}C_6) çökeltisi.

2.8.6 Mikrobiyolojik Korozyon

MIC (mikrobiyolojik etkiden kaynaklanan korozyon veya mikrobiyolojik korozyon), mikroplar, mantarlar ve bakterilerin sebep olduğu korozyon türüdür. Bu mikro canlılar aynı zamanda korozyonu hızlandırır (İnt. Ky.7). Mikro canlıların gelişmesi sonucu asitler ve sülfürler v.b. bazı bileşenler ortaya çıkar. Bu oluşan bileşenler korozyon hızını artırıcı olarak etken bir rol oynar. Bazı hallerde ise mikroplar direkt elektrokimyasal reaksiyonlara da katılabilir. Örneğin *Thiobacillus thio oxidans* gibi bazı aerobik bakteriler, her çeşit sülfür bileşimini ve elementel kükürdü sülfat halinde oksitleyebilir. Bu tip bakterilerin faaliyeti için ortamda oksijen bulunması gerekir (Yalçın ve Koç 2004).

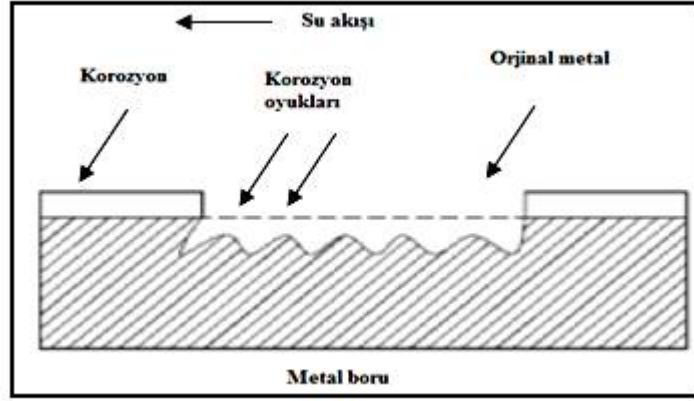
Mikrobiyolojik korozyon sonucu oluşan korozyon ürünlerinde mutlaka FeS (demir sülfür) bulunur. Bu korozyon çeşidine en çok ham petrol depolama tanklarında,

soğutma suyu sistemlerinde, kanalizasyon suyu ve çamurunda sıkça rastlanır. Korozyon olayı genelde tabanda durgun bölgelerde meydana gelir ve büyük oyuklar oluşturur. Bu tip korozyonun önlenmesi içinse; pH derecesinin değiştirilmesi, organometalik metal bileşikleri (çinko ve vanadium gibi) kullanılarak mikro canlıların öldürülmesi yahut aralıklı olarak dezenfeksiyon yani klorlama yapılması gerekir (Yalçın ve Koç 2004).

2.8.7 Erozyon Korozyon

Korozif çözeltilerin bir metal ya da alaşımda yüzeyinden hızla akması veya metal ya da alaşımın bu korozif sıvı sebebiyle aşınması sonucu birlikte görülen korozyon türüdür (Şekil 2.12). Temel sebebi malzeme yüzeyi ile ortam arasındaki hız farkından dolayı oluşan bozunmadır. Korozif sıvıların metal yüzeyinden hızlı akması korozyon olayının yanında erozyon da meydana getirir. Mekanik ve kimyasal olayların beraber etkimesi korozyon hızının da artmasına sebebiyet verir. Erozyonlu korozyon olayı daha çok hareketli akışkanların bulunduğu ekipmanlarda (boru sistemlerinde, limanlarda, dirsekler, valfler, pompalar, santrifüjler, pervaneler, karıştırıcılar, ısı değiştiriciler v.b.) söz konusu olabilir. Birbiri üzerinde kayan iki yüzeyde de aşınma ve korozyon olayları birlikte gelişebilir. Özellikle boru sistemlerinde ve limanlarda çok rastlanan bu tür korozyon türünde metal/alaşım ile korozif ortam arasındaki metalin aşınma hızı artar. Bu korozyon türüne en hassas olan metal Cu (bakır) ve alaşımlarıdır (Videla 1996, Gürü ve Yalçın 2004, Yiğiter 2008).

Erozyon korozyonu önlemek için; tasarım iyi yapılmalı, daha dayanıklı malzemeler kullanılmalı, korozif ortam değiştirilmeli, malzeme kaplanmalı ve katodik koruma yapılmalıdır (San 2012).

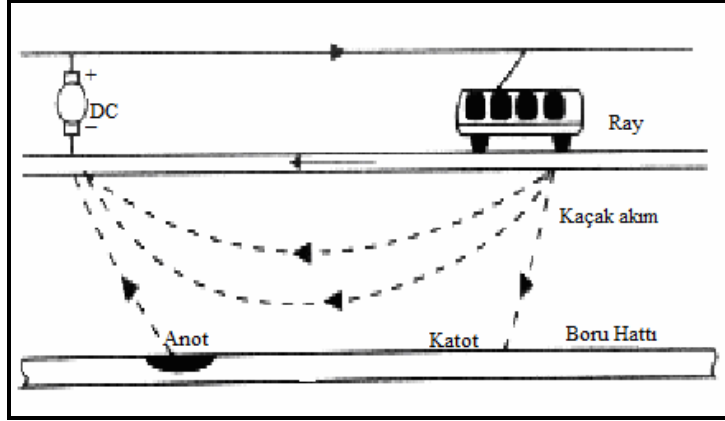


Şekil 2.12 Yoğunlaştırıcı tip duvarlarında meydana gelen erozyonlu korozyon (Bülbül 2009).

2.8.8 Kaçak Akım Korozyon

Bu tip korozyon türüne en çok yeraltı ve su altı yapılarında sıkça rastlanır. Her hangi bir doğru akım kaynağından yeraltına kaçan akımlar çevrede bulunan metalik akımlara girerek korozyona sebep olurlar (Şekil 2.13). Bu korozyon mekanizması; demir zeminden daha iletken olan kaçak akımlar demir yapılara girmeyi tercih ederler. Akımın demir yapıya girdiği noktalar katot; akımın demir yapıdan çıktığı noktalar ise anot olan bölgeler korozyona uğrar. Örneğin bir yeraltı tren hattına paralel giden boru hattında bu korozyon türüne rastlanabilir (Yalçın ve Koç 2004).

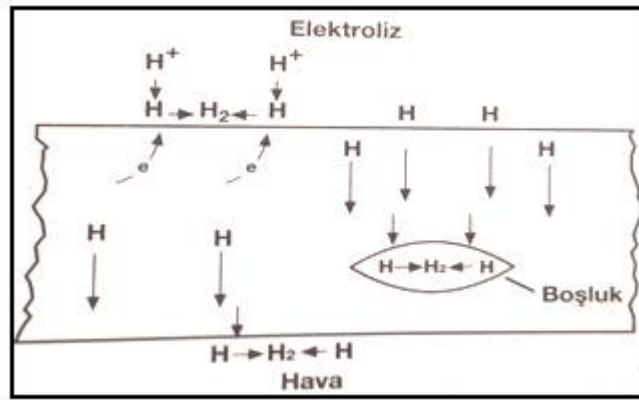
Bu korozyon türünden korunmak için kaçak akımlardan kaçınılır ve yapılara girmesi önlenmeye çalışılır. Bu yapıların boyanmasıyla ve kaplanmasıyla elektriksel direnç artırılabilir.



Şekil 2.13 Elektrikli tren raylarından kaçan akımların bir boru hattında oluşturduğu kaçak akım korozyonu (Yalçın ve Koç 2004).

2.8.9 Hidrojen Kırılgenliği

Hidrojen kırılgenliği olayına demir, çelik malzemelerde metalik alaşımlarda sıkça rastlanır. Korozyon tepkimelerinde, katodik koruma uygulanmasında veya elektrolit kaplama işlemlerinde metal yüzeyinde atomik halde hidrojen oluşur. Oluşan hidrojen atomlarının bir kısmı metal yüzeyinde absorbe edilir bir kısmı gaz halinde atmosfere karışır bir kısmı da metal yüzeyindeki boşluklara yerleşir (Şekil 2.14). Metal yüzeyine yerleşen bu hidrojen atomları molekül haline dönüşür ve büyük bir hacim artışına sebebiyet verir, metal boşluklarında büyük bir basınç oluşturarak metalin çatlamasına neden olur ve malzemenin sünekliğinde ve çekme dayanımında kayda değer bir azalma oluşur (Yalçın ve Koç 2004, Eker 2009).



Şekil 2.14 Metal içine hidrojen atomu penetrasyonu (Yalçın ve Koç 2004).

Hidrojen kırılğanlaşmasının oluşması için bir hidrojen kaynağının bulunması gerekir. Hidrojen konsantrasyonunun 10-15 ppm seviyesinde bile olması bu durumun gerçekleşmesi için yetelidir. Yapıda çözünen (ara yer pozisyonlarında) hidrojen atomları dislokasyonların hareketlerini bloke ederek bu duruma sebep olur. Hidrojenin sebep olduğu çatlaklar genellikle tanelerin içinden (transgranular) ilerler (Kürklü 2014).

Hidrojen kırılğanlaşmasını engellemek için; alaşım yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak yapıdaki hidrojen ortamdan uzaklaştırılır. Daha çok hacim merkezli kübik kafes yapısına sahip olan metallerde meydana gelir (Kürklü 2014).

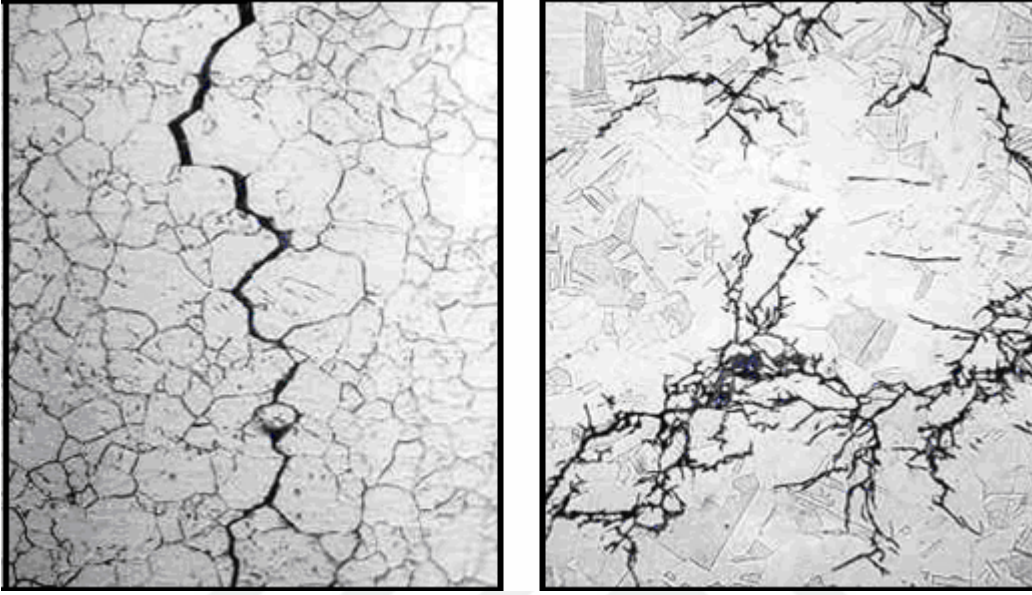
2.8.10 Stres (Gerilme) Korozyon

Bir malzemenin korozyonla birlikte, dış yüklerin oluşturduğu statik çekme gerilmelerinin veya artık çekme gerilmelerinin etkisi altında hasara uğramasına “gerilmeli korozyon çatlaması” adı verilir. GKÇ malzemede çatlaklar oluşturarak dayanımını azaltan bir korozyon şeklidir (Eryürek 1993).

Korozif bir ortamda bulunan bir metal bunun yanında statik bir gerilme altında ise, metal malzemenin çatlayarak kırılması çabuklaşır (Yalçın ve Koç 2004). Gerilmeli korozyon çatlamasının sebep olduğu yapısal kırılma genellikle ani ve beklenmediktir. Kılcal çatlakların tespiti güç olduğundan önceden fark edilemez. Birkaç saat gibi kısa bir servis süresinde ortaya çıkabildiği gibi birkaç hafta ya da uzun bir servis ömründen sonra da meydana gelebilir. Normal halde korozyon ürünleri metal yüzeyinde koruyucu bir kabuk oluşturduğu halde, gerilim altında iken kabuk oluşturamaz. Bunun sonucu olarak korozyon hızla devam ederek metalin o bölgede çatlamasına ve metalin zarar görmesine neden olur (Yalçın ve Koç 1998). Bu tip korozyona alaşımlar daha çok tepki gösterir. Ayrıca basınç gerilmesinin korozyona artırıcı bir etkisi yoktur önemli olan çekme gerilmesi altında bulunmasıdır bunun yanında duyarlı bir malzeme etken bir ortam ve zaman bu korozyonun oluşmasında etkindir.

Gerilmeli korozyonun oluşması için, malzemeye statik kuvvet çekme ya da basma yönünde gerilme uygulanıyor olmalı, mevcut bir çatlak başlangıcı ve olayı destekleyici

ortama uygun bir elektrolit bulunmalıdır. Yani gerilme korozyonu çatlağı, malzeme ve elektrolite göre değişerek, hem taneler arasında hem de tane içinde, her türdeki malzemede oluşmaktadır (Şekil 2.15) (Bülbül 2009, Eker 2009, Çolak 2010).



Şekil 2.15 Tane sınırları kırılması ve tane içi kırılması.

Gerilmeli korozyon çatlaması (GKÇ) üç aşamada gerçekleşir;

1. Çatlak oluşumu,
2. Çatlak ilerlemesi,
3. Zoraki kırılma.

Gerilmeli korozyon çatlaması (GKÇ) genel olarak şu özelliklere sahiptir;

a) Çekme gerilmesi gereklidir. Bu gerilme;

- Dış yüklerden,
- Soğuk şekil verme nedeniyle doğan iç gerilmelerden,
- Isıl işlem, kaynak v.b. nedeniyle doğan iç gerilmelerden,
- Montaj sırasında oluşan kaçıklıklar nedeniyle doğan gerilmelerden meydana gelebilir.

b) Bazı istisnalar dışında bu olaya sadece alaşımlar maruz kalır, saf metallerde görülmez.

c) Verilen bir alaşımda olaya özgü bir elektrolit bulunmalıdır. Alaşım, gerilmeli korozyona neden olan bu elektrolite karşı normalde aktif değil soydur. Yani bu elektrolit normalde alaşımda genel elektrokimyasal korozyon oluşturmaz.

d) Alaşım statik yük altında sünek kırılma gösterse bile gerilmeli korozyonla gevrek olarak kırılır.

e) Malzeme ve ortama özgü bir “eşik gerilme şiddet faktöründe” gerilmeli korozyon oluşmaz.

f) Katodik koruma GKÇ’ni engellemede etkilidir.

g) Alaşımın cinsine, mikro yapısına ve ortama bağlı olarak, gerilmeli korozyon çatlağı taneler arası, tane içi veya karışık tip şeklinde ilerleyebilir. Çatlaklar mikroskobik seviyede sık sık dallanmaya uğrarlar (Yalçın ve Koç 1998, Kumru 2004).

2.9 Korozyondan Korunma Yöntemleri

Korozyon teknik ve ekonomik açıdan mümkün olabildiğince en düşük düzeye indirilmesi veya zorunlu hallerde tamamen önlenmesi için kullanılan yöntemler çok çeşitlidir. Korozyondan korunmak ve kayıplarını mümkün olabildiğince azaltmak amacıyla yapılması gerekenler maddeler halinde şu şekilde sıralanabilir:

- Uygun tasarım,
- Uygun malzeme seçimi,
- Yeterli yüzey kaplaması,
- Katodik koruma,
- Anodik koruma (MEGEP 2009).

2.9.1 Uygun Tasarım

Bir yapının tasarımı her zaman yapım için seçilen gereç ölçüsünde önemli olmaktadır. Tasarımda mekanik dayanımın yanında sistemin korozyona karşı dayanımı da düşünülmelidir. Tüm durumlarda bir bileşenin mekanik tasarımı malzemenin yapısına dayanmalıdır. Malzeme seçiminden sonra tesis için yapılacak tasarım en az malzeme

seçimi kadar önemlidir. Birden çok malzeme kullanılacak olan sistemlerde bir malzeme hemen yanındaki diğer malzeme için tehlike arz etmemelidir (Yalçınkaya 2008).

2.9.2 Uygun Malzeme Seçimi

Korozyonu önlemenin genel yolu korozif ortamda kullanacak malzeme seçilirken, ortamın özelliği iyi bilinmeli ve bu ortama direnç gösterecek özellikteki uygun metal veya alaşımlar seçilmelidir (Yalçın ve Koç 1991). Uygun malzemenin seçimi, malzemenin kullanılacağı tesisin amacı, tesisin bulunduğu coğrafi koşullar, çalışma koşullarının fiziksel ve kimyasal içyapısı, çalışma sıcaklığı, çalışma basıncı, hammaddeden ürüne kadar her aşamada malzemenin temas edebileceği ara ürünler v.b. dikkate alınarak uzun bir planlama ve araştırma sonucu seçilmelidir. Malzeme seçerken kullanılması olası her malzeme için nelerin, hangi koşullarda korozif olabileceği araştırılmalıdır. Seçilecek olan malzemenin ekonomik açıdan da değeri çok önemlidir. Elde edilecek ürünün değerini aşan bir malzemenin kullanılması anlamsızdır. Malzeme seçiminde kısa yoldan sonuca gitmek yerine, her aşamada bir önceki aşamanın göz önüne alınması ve her türlü veri ve bilginin değerlendirilmesi gerekir (Erbil 1984).

2.9.3 Yeterli Yüzey Kaplaması

Kaplamaların görevi; metalin yüzeyinin kaplanmasıyla korozif ortamla bağlantısını kesmek, engel oluşturarak metali korumaktır. Bu yöntem korozyondan koruma uygulamalarının en yaygın olanlarından birisidir. Genellikle kaplamalar çok korozif ortamlarda kullanılmazlar. Fakat atmosfer, toprak, su gibi doğal ortamlarda kullanılırlar (Üneri 1998).

Kaplamalar organik boyalarla veya metalik boyalarla yapılabilir. Kaplamanın en iyi şekilde sonuç vermesi için kaplama yapılacak metalin yüzeyinin temiz ve kuru olması gerekir. Kaplama iyi yapılmısa, yani yüzeyde kaplanmamış metal kısımlar bulunursa kaplanmamış yüzeylerde korozyon hızlanır ve kaplanmamış halinden daha hızlı korozyon devam eder. Kaplama yapılacak metale uygun bir kaplama maddesi seçilmesi

gerekir. Organik kaplamalar metal yüzeyinin kapatılmasında en çok uygulanan kaplamalardır (Yalçinkaya 2008).

2.9.4 Katodik Koruma

Katodik korumanın temel ilkesi elektrokimyasal korozyon teorisine dayanır. Elektrokimyasal teorisine göre bir elektrokimyasal hücreden net bir akım geçtiğinde anota oksidasyon (yükseltgenme) olayı, katot da ise buna eşdeğerde indirgenme tepkimesi yürür. Katot bölgesinde hiçbir zaman korozyon gerçekleşmez. Bu teoriye göre metalin yüzeyündeki anodik bölgeler, katot haline dönüşür ve korozyon olayı kesin olarak önlenmiş olur. Başka bir deyişle metalin potansiyelini katodik yönde değiştirerek çözünmesini önleyen bir uygulamadır (Short *et al* 1996, Yalçinkaya 2008).

2.9.5 Anodik Koruma

Anodik koruma, aynen katodik korumada olduğu gibi metale dış taraftan bir akım kullanılarak koruma sağlanır. Bu koruma metalin potansiyelini korozyon potansiyeline göre daha anodik tutularak korozyon hızının düşürülmesi yöntemidir. Bu korumada pasifleşme özelliği gösteren bir metalin anodik yönde polarize edilerek pasif hale getirilmesi ilkesine dayanır. Bu nedenle bu koruma yöntemi sadece pasifleşme özelliği olan metallere uygulanabilir. Pasiflik bölgesine uygulanan potansiyel metalin daha çok aşınmaya uğramasını önler (Schweitzer 1996, Yalçinkaya 2008).

Fakat betonarme demirlerinin korozyonu diğer ortamlarda yürüyen korozyon olaylarından farklı olarak genellikle pasifliğin bozulması ile başlar. Demirler beton içinde normal olarak pasif haldedir bu yüzden donatıların korozyonunu önlemek amacıyla öncelikle pasifliğin korunmasını sağlayan önlemler göz önüne alınmalıdır (Yalçın ve Koç 2004).

Öncelikle göze çarpan ilk iş, betonun donatıları koruyucu özelliğinden yararlanarak geçirimsiz bir beton üretmektir. Beton üretimi sırasında çimento yerine minereal katkıları katılarak (uçucu kül, silis dumanı vs.) betonun geçirimsizliği azaltılır ve

donatının korozyona karşı dayanıklılığı arttırılır. Ayrıca iyi bir şekilde vibrasyon, dökümünden sonraki günlerde uygun kür yapılması ile geçirimsiz bir beton üretilebilir. Bunun yanında demirlerin beton yüzeyünden en az 7.5 cm derine konulması suretiyle pas payı artırılarak, çevreden beton içine absorbe edilen zararlı bileşenlerin donatılara ulaşması engellenir.

Bunların dışında donatıların korozyonunu önlemek için betonarme yapılarda başka önlemler de geliştirilmiştir. Bu önlemler;

- İnhibitör Kullanımı: Klorürle kirlenmesi muhtemel olan betonlara inhibitör enjekte edilerek betonarme çeliklerini pasifleştirmek mümkündür.
- Beton İçindeki Tuzun Giderilmesi: Klorürle kirlenmiş durumda bulunan betonlar desalinizasyon işlemi (elektrokimyasal yöntem) ile klorürden temizlenir.
- Betonun Alkalileştirilmesi: Karbonizasyon sonucu alkali özelliğini yitirmiş olan betonlar realkalizasyon yöntemi ile yeniden normal Ph derecesine kadar alkali ile doyurulabilir.
- Betonarme Çeliklerinin veya Beton Yüzeyinin Kaplanması: Betonarme donatılarının epoksi veya galvaniz yapılarak kaplanması donatıların korozyonunu önler. Beton yüzeyini geçirimsiz malzeme ile kaplanması beton bünyesine girecek olan zararlı iyonların girmesini özellikle de korozyon için mutlaka gerekli olan oksijen ve suyun beton içine girmesini önler (Yalçın ve Koç 2004).

2.10 Konuyla İlgili Yapılmış Çalışmalar

Literatür incelendiğinde beton ve betonarmeye ilişkin korozyonun etkileri noktasında oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Bunun yanında betonarme çelikleri üzerinde gerilim (stres) korozyonunun konu alındığı araştırmalar oldukça azdır. Bu yüzden bu tez çalışmasında; uçucu kül katkısının ve bükme açısının korozyon hızına, korozyon direncine karşı dayanımına, gerilim korozyonunun oluşmasına nasıl etkiler yaptığı incelenmiştir. Bu bölümde de tez çalışmasına genel olarak ışık tutacak çalışmaların özet bilgileri sunulmuştur.

Miletic *et al* (1997) yapılan bu çalışmada beton korozyonunu önlemek için uçucu külün yararları üzerinde durulmuştur. Uçucu külün eklenmesi halinde çalışma sonucuna göre amonyum sülfat aşınmasının önlenmesinde ve amonyum sülfat saldırısına karşı direnç göstermesinde uçucu külün çok yararlı olduğu görülmektedir.

Montemor *et al* (2000) uçucu külün beton donatı korozyonu üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Çalışmalarının sonucunda uçucu kül ilavesi betonun öz direncini artırmıştır ve korozyon hızının azalmasını sağlamıştır.

Saraswathy *et al* (2002) çalışmalarında korozyon direncine ve betonun mukavemetine uçucu külün etkisi araştırılmıştır. Beton numunelere %10, %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül ikame edilerek 7, 14, 28 ve 90. günlerdeki dayanımlarını normal katkısız beton numuneleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda kritik seviyenin uçucu kül ikamesinde %20-%30 arasında olduğu ve bu seviyelerin korozyon direncini ve betonun mukavemetinin artırdığı gözlemlenmiştir.

Türker (2003) çalışmasında Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri hakkında araştırma yapılmıştır. Deneyde Soma ve Afşin Elbistan uçucu külleriyle hazırlanan harçlarda yüzde değeri arttıkça dayanımlar düşmekte, su ihtiyaçları ise artmaktadır. Orhaneli uçucu küllünde ise %30 oranına kadar tüm kür süreleri için referans Portland çimentosundan daha yüksek basınç dayanımı gözlemlenmiştir. Ayrıca referans Portland çimentosundan daha az su ihtiyacı görülmüştür.

Schroeder and Müller (2003) gerilim korozyonu ve hidrojen kırılganlığı davranışını AISI 1080 çeliğinde farklı deneysel tekniklerle araştırmıştır. Üretilen beton numunelerinde klorid, sülfat ve kükürtlü siyanür iyonları kullanılmıştır. Karşılaştırmak amacı ile standart olarak %20 amonyum kükürtlü siyanür çözeltisi kullanılmıştır. Deney sonucunda gerilim korozyon çatlaması sürecinin çatlama mekanizması hidrojen olayı ile alakalı olduğu gözlemlenmiştir.

Jiang *et al* (2004) yaptığı çalışmada aktivatörle birlikte yüksek miktarda düşük kaliteli uçucu küllü betonun iyi karbonatlaşmaya ve çelik donatı korozyon direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Güneyisi *et al* (2005) yaptıkları çalışmada; çelik çubukların korozyonu, elektriksel direnci ve betonun basınç dayanımı incelenmiştir. Katkılı ve katkısız çimento kullanımının donatı korozyonundan oluşan zararların beton dayanımı üzerindeki etkisini hızlandırılmış korozyon deneyi ile araştırılmıştır. Basınç dayanımı, elektrik direnci ve betonun korozyon dayanımı 180 güne kadar farklı günlerde belirlenmiştir. Sonuç olarak kontrolsüz kür uygulanan betonların dayanımı ve korozyon dayanımı düşük performans sergilediği görülmüştür.

Boğa (2005) yaptığı tez çalışmasında uçucu küllü betonarme elemanlarda donatı korozyonunu hızlandırılmış yöntemlerle araştırılmıştır. Korozyona karşı daha etkin bir beton üretmek amacıyla yaptığı çalışmada CEM II/B 32.5 R, CEM I 42.5 R ve CEM I 52.5 N çimentoları kullanılmış ve bu çimentoları da 300 ve 375 dozajlarında kullanarak katkısız ve % 10 ve % 20 oranında uçucu kül katkılı olmak üzere beton karışımları hazırlanmıştır. Numunelere 28 ve 180 gün olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. Deneyde üretilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlenmiştir. Ayrıca beton içine donatıların dikildiği lolipop şeklinde üretilen numunelerde hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılmıştır ve betonların hasar oluşum sürelerini belirlenmiştir. Sonuç olarak yapılan bu çalışmada hızlandırılmış korozyon deneyi sonrasında beton içerisindeki donatının korozyona uğradığı, beton içerisinde genleşmelerin oluşup hasara uğradığı gözlemlenmiştir. Hasar oluşum sürelerinin kullanılan çimentonun tipine ve uçucu kül miktarına göre farklılıklar göstermiştir. Dozaj miktarının ve kullanılan uçucu külün artmasıyla da hasar oluşum sürelerinin arttığı görülmüştür.

Çil (2006) çalışmasında betona gömülü çelik donatıların korozyonunun tespiti ve kontrol edilmesi için tahribatsız bir metot önermektedir. Elektriksel ölçümlere dayanan yöntemde, direnç farklılıklarının değerlendirilmesi ile korozyon gelişimi hakkında fikir edinebilmek mümkündür.

Choi *et al* (2006) yaptıkları çalışmada; uçucu küllü ve uçucu külsüz betonların içerisindeki çelik donatıların korozyona uğrama performanslarını belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla üretilen numuneler % 3.5'luk NaCl çözeltilerinin içerisinde bekletilmiştir. Çelik donatıların korozyon performanslarını değerlendirmek için yarı

hücre potansiyeli, polarizasyon direnci ve EIS ölçümleri yapılmıştır. Belli oranlarda uçucu külün kullanılması ile korozyon dirençleri arttığı ispatlanmıştır.

Kurt (2007) çalışmasında silis dumanının betonun basınç dayanımına, kılcal yolla su emmesine, klorür geçirimsiliğine ve öz direncine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca bunların yanında betona gömülü çelikte korozyon durumu arasındaki ilişki de ayrıca araştırılmıştır. Üretilen numunelerin yarısı suda yarısı havada 90 gün süreyle küre tabi tutulmuştur. Kür süresinin ardından betonların basınç dayanımları, kılcallık katsayıları, kılcal penetrasyon direnci katsayıları, etkin porozite katsayıları bulunmuştur ve ASTM C1202-97 standardına göre betonların klorür difüzyonuna karşı performansları belirlenmiştir. Ayrıca lolipop numuneler 1 M NaCl çözeltisine konulmuştur ve Gecor 8 cihazı ile (Korozyon ölçüm sistemi) iki haftada bir olmak üzere öz direnç, yarı hücre potansiyeli ve korozyon hızı ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak silis dumanı katkısının genel olarak betonun dayanıklılığını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Görür (2007) çalışmasında, granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve granüle bazaltik pomza (GBP) katkılı betonun durabilite özellikleri araştırılmıştır. Kontrol örnekleri olarak kırma taş agregası ile üretilen beton kullanılmıştır. Kontrol betonundaki ince agregası yerine % 40, 60 ve 80 oranlarında YFC ve GBP yer değiştirilerek katkılı betonlar üretilmiştir. Üretilen beton örneklerin deniz ve laboratuvar ortamında deniz suyu etkisi ile aşınma değerleri kütle kaybı ile bulunmuştur. Deniz suyunda bekletilen betonların basınç dayanımları, mekanik aşınma, korozyon ve permeabilite değerleri belirlenmiştir ayrıca örneklerin, mikro yapıları incelenmiştir.

Saran (2007) çalışmasında, beton üretiminde kullanılan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun betonun durabilite özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Üretilen betonlara ait numuneler üzerinde basınç dayanımı, kılcal su emme, hızlı klorür geçirimsiliği deneyleri ile lineer polarizasyon (korozyon hızı), yarı hücre (korozyon potansiyeli) ve öz direnç deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda kür koşullarının etkisini de araştırmak için, deneyde kullanılan tüm betonlara ait numuneler havada ve suda kür edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, su kürü numunelerinin hava kürü numunelerine göre çok daha iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır. Öte yandan betonların basınç dayanımları, cüruf oranının artması ile azalmıştır. Ayrıca yapılan korozyon ölçümlerinde, cüruf oranının

artması ile su kürü uygulanmış betonlarda önemli ölçüde direnç artışları meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada genel olarak, cüruf oranının artması ile betonun durabilite özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Mercan (2007) çalışmasında farklı özellikteki çimentoların uçucu kül katkısıyla harçların dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Deneyinde beş farklı çimento üretim tesisinden alınan katkısız Portland çimentosuna (CEM I 42,5), %5, %9 ve %14 oranlarında uçucu kül katkısı ikame edilmiştir. TS EN 196-1 göre standart küre maruz referans numunelerinin 7., 28. ve 56. günlerde eğilme ve basınç dayanımları, su emme değerleri araştırılmıştır. Deney sonucunda 28. günün sonunda %5 oranında uçucu kül katkılı çimentoların dayanımlarının katkısız çimentoların dayanımlarından büyük olduğu gözlemlenmiştir. Uçucu küllü çimentolarda katkı oranının artmasıyla dayanım düşüşleri görülmüştür. Erken yaşlarda, uçucu küllü numunelerin dayanımları, katkı miktarı arttıkça azalmakta ve referans numunelerin dayanımlarından düşük değerler aldığı gözlemlenmiştir.

Topçu ve Boğa (2007) çalışmalarında farklı tip çimentolar (CEM II/B-M (P-L) 32.5 R ve CEM I 42.5 R) ile uçucu külsüz ve % 10, 20 oranlarında uçucu küllü (UK) olarak üretilen betonların içindeki çeliklerin korozyon performansları araştırılmıştır. Deneyde numunelere 28 ve 180 gün olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. Üretilen betonların mekanik özellikleri belirlenmiş ve lolipop şeklinde üretilen numunelerde hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılarak betonlarda hasar oluşum süreleri belirlenmiştir. Hızlandırılmış korozyon deneyleri tamamlanınca betonarme elemanların içerisindeki donatı çıkartılmış ve Clarke çözeltisi ile temizlendikten sonra korozyon sonrası donatıda meydana gelen ağırlık kayıpları bulunmuştur. Sonuç olarak kompoze çimento kullanımının ve çimento yerine belli oranlarda uçucu kül kullanımının korozyona karşı dayanıklılık açısından oldukça yararlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Topçu *et al* (2009) yaptıkları çalışmada betonların mekanik özellikleri belirlenmiştir ve betona gömülü çeliğin korozyon performansını gerilim testi ile analiz edilmiştir. Numunelere farklı oranlarda 0, 10, 20%, uçucu kül ikame edilmiştir. Üretilen her numunenin korozyon akımları ölçülmüştür ve veri kaydedici kullanılarak beş dakikalık

aralıklarla toplanmıştır. Korozyon akımları yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak modellenmiştir. Numunelerde uçucu kül oranının artması korozyon etkilerine karşı betonun dayanım özelliğinin arttığını kanıtlamıştır. Ayriyeten YSA kullanarak, korozyon akımları için doğru modelleme sonuçlar elde edilebilir sonucuna varılmıştır.

Boğa and Topçu (2012) çalışmalarında betonun korozyon direnci ve klorür iyonu geçirgenliğine uçucu külün etkisi araştırılmıştır. 300 dozlu CEM I 42.5 R çimento ve %0, %15, %30, %45 oranlarında uçucu küllü numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 28 ve 56 günlük su ve hava kürüne tabi tutulmuştur. Testlerin sonucunda, 56 günlük su kürü ve %15 oranı uçucu kül oranı iyi sonuç vermiştir.

Haberal (2010) tez çalışmasında uçucu küllü betonların klor iyon geçirgenliğinin ve donatı korozyonu incelenmiştir. Klor iyon geçirgenliğine ve korozyona karşı daha dayanımlı beton üretmek amacıyla yaptığı çalışmada CEM I 42.5 R çimento ve çimento yerine %15, %30, ve %45 oranlarında uçucu kül kullanılmak suretiyle % 0.8 kg katkı olmak üzere beton karışımları hazırlanmıştır ve numunelere 28 ve 56 gün dış ortam koşullarında ve suda bekletilmek üzere iki farklı kür uygulanmıştır. Hızlı klor geçirimsizliği deneyi sonucunda, uçucu külün basınç dayanımı düşürdüğü ve klor iyon geçirimsizliğini azalttığı sonucuna varılmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrasında beton içerisindeki donatının korozyona uğradığı, beton içerisinde genleşmelerin olduğu ve numunelerin çatladığı görülmüştür. Çatlayarak hasara uğrayan betonların hasar oluşum sürelerinde kullanılan uçucu külün miktarına, kür süresine ve tipine göre farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir ayrıca kullanılan uçucu külün artmasıyla da hasar oluşum sürelerinin arttığı görülmüştür. Deney sonucunda çimento yerine belli oranlarda uçucu kül kullanılmasının hem klor iyon geçirimsizliğini azaltmada hem de korozyona karşı gösterdiği direnç açısından oldukça yararlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Yamaç (2010) tez çalışmasında klorür etkisindeki silis dumanı katkılı beton numunelerin içinde gömülü çelik donatının korozyonu araştırılmıştır. Deneyinde farklı silis dumanı/toplam bağlayıcı, su/toplam bağlayıcı oranları ve toplam bağlayıcı miktarları kullanılarak üretilen ve içine donatı yerleştirilen silindir numuneler 90 günlükken sırası ile 7 gün 1 M NaCl çözeltisi içerisinde ve 7 gün havada olacak şekilde çevrimlere maruz bırakılmıştır. İki haftada bir olmak üzere Gecor 8 cihazı yardımı ile

elektiriksel   zdiren , yarı hücre potansiyeli ve korozyon hızı     mleri yapılmıştır. Sonuç olarak, betona silis dumanı katılmasının betonun korozyon dayanıklılığını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Niş (2011) tez çalışmasında çatlakların donatı korozyonundaki rolünü araştırılmıştır. Deney numunelerinde çatlaklar belirli eğilme yükleri altında elde edilip, bu çatlak genişlikleri yalın ve lifli betonlar için karşılaştırılmıştır. Korozyon     mlerini çatlaklı ve çatlaksız betonlar için yapılmıştır. Korozyon hızı çatlak genişliği arttı a artmıştır ve büyükten küçüğe sırasıyla dinamik yük altında çatlamış numuneler, statik yük altında çatlamış numuneler, çatlaksız numuneler olarak bulunmuştur.  elik lif kullanımı korozyon hızı su/ imento oranı azaldıkça azaldığını gözlemlenmiştir.

Zhao *et al* (2011)  alışmalarında beton hasarının neden olduğu betonarme demirinin korozyonu araştırılmıştır. Betondaki hasar işlemi iki duruma ayrılır;  atlamama evresi ve kısmen çatlama evresi. Mekanik ve elastik mekanikteki hasarı temel alan analitik model geliştirilmiştir bu model metodu beton çatlaması sırasındaki demir korozyonunu tahmin etmek içindir. Bu model temel alınarak, geniş baskı ve demir çubuklardaki radyan kaybı tartışılmıştır. Parametrik  alışmalar baskı genişliği ve demir kaybının birbiri ile bağıntılı etkileri ortaya çıkmıştır.

Shi *et al* (2011)  alışmalarında Portland  imento harcının ve betonun katkı maddeleri ile beton dayanımı ve korozyon özellikleri araştırılmıştır. Araştırmalarında basınç dayanımını ve harçtaki klorid yayılma gücünü bulmak için çeşitli laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Beton numunelerinde çeşitli mineral katkıları kullanılmıştır (F sınıfı uçucu kül, ultra ince uçucu kül, silika dumanı, metakolin ve yüksek fırın cürufu). Mineral beton boşluğu, donma çözünme dayanımı, mineral harçların buz çözücü varlığı ve harçtaki gözeneklerdeki kimyasallar üzerindeki malzemelerin etkisi araştırılmıştır.

Tran *et al* (2011)  alışmalarında betonda çatlama davranışları üzerinde donatı korozyonu için analitik çalışma gerçekleştirilmiştir. Donatı  eşitleri ile çeşitli donatı aralığı lokal korozyona uğramış donatı numuneler ve çukur korozyona uğramış donatı numuneleri üretilmiştir. Üç fazlı materyal korozyon genişlemesi modeli uygulanmıştır.

Lokal korozyon genişliği oranı, donatı uzunluğu ve çukur korozyon örneği çatlama davranışında önemli rol oynamıştır.

Boğa *et al* (2012) çalışmalarında betona gömülü çeliğin korozyon performansına uçucu kül miktarının ve çimento tipinin etkisi araştırılmıştır. Deneylerinde üç farklı çimento (CEM II / BM (PL) 32.5 R, CEM I 42,5 R ve CEM I 52.5 R) kullanılmıştır. % 0, % 10 ve % 20 oranlarında çimento yerine uçucu kül ikame edilerek 300 kg/m³ ve 375 kg/m³ dozajlarında betonlar üretilmiştir. Bu betonlar 28 ve 180 gün boyunca kür edilmiştir. Sonuç olarak kompozit çimento kullanımı ve numunelere uçucu külün katılması korozyon direncini artırmıştır.

Pürsünlü (2013) çalışmasında, soğuk bağlanmış ve sinterlenmiş uçucu kül agregası içeren hafif betonların dayanım ve durabilite ile ilgili özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Uçucu kül ve bentonitten üretilen taze agrega tanelerinin fırında sinterlenmesi ile sinterlenmiş agrega üretilirken, F tipi uçucu kül ile çimentonun soğuk bağlama yöntemi ile soğuk bağlanmış agregalar üretilmiştir. Su/Bağlayıcı oranı 0.35 ve 0.55 olan iki seri beton tasarımı yapılmıştır. Ayrıca hafif betonların silis dumanlı ve silis dumansız performanslarını kıyaslamak için %10 oranında silis dumanı çimento ile yer değiştirilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda hafif betonların özellikleri, basınç dayanımı, su geçirimsizliği, hızlı klorür geçirimsizliği, gaz geçirimsizliği ve hızlandırılmış korozyon testleri bakımından değerlendirilmiştir. Sonuçlar, sinterlenmiş agrega içeren hafif betonların soğuk bağlanmış agrega içeren hafif betonlara göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, üretimde silis dumanı kullanımı özellikle geçirgenlik ve korozyon dayanımının artırılmasını sağlamıştır.

Mancini *et al* (2014) çalışmasında betonda çeliğin korozyon saldırısını statik, döngüsel yükleme ve hızlandırılmış korozyon deneyleri ile incelenmiştir. Çatlak olan bölgelerde korozyon konsantrasyonu gözlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, stres genlik varlığı ve yerel hasar yükleme türü etkisini göstermiştir.

Patil *et al* (2014) çalışmalarında akustik emisyon ve elektrokimyasal tekniklerle betonarme elemanın korozyonu incelenmiştir. Akustik emisyon ve kimyasal teknikler

betona gömülü çeliğin korozyonunun araştırılması için karşılaştırmalı çalışma yapılmıştır. Sonuçlar korozyon süresindeki iki durumu göstermiştir. Kümülatif işaret dayanımı ve korozyon sebebi ile betonarme yapılardaki hasarı ilerleyişini göstermek için akustik emisyonun güven verici parametre olarak kullanılabildiği gösterilmiştir.

Muthulingam and Rao (2015) çalışmasında klorid çevresine maruz kalan betonda çevre donatısı boyunca homojen korozyon penetrasyon derinliğini etkili bir şekilde belirleyen birçok çerçeve sunulmuştur. Bu çerçeve donatı boyutunun etkilerini ve betondaki klorid girişinin sürecindeki yeri dikkate alır ve üniform olmayan korozyon durumlarını iki şekilde korozyon penetrasyon derinliğini sunar, biri donatı parçasının korozyonu diğeri donatı çevresi boyunca pürüzlü korozyondur. Değerlendirilmiş üniform olmayan korozyonun nitelikli karşılaştırmaları mevcut laboratuvar çeşitliliği ve veri alanı görüş birliği çeşitliliğini belirtir.

Feng *et al* (2015) donatı korozyon davranışı üzerindeki basınç ve çekme geriliminin etkisi araştırılmıştır. Elektrokimyasal iç direnç tayf ölçeri sonuçları ve korozyon durumu gözlemlendiğinde donatıdaki korozyona neden olan gerilim temel olarak beton/donatı arayüzeyini azalmasından kaynaklandığı görülmüştür. Numunelerden beton/donatı arayüzünün farklı kalıplarının gerilim sebebi ile gerilim olayı gösterilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

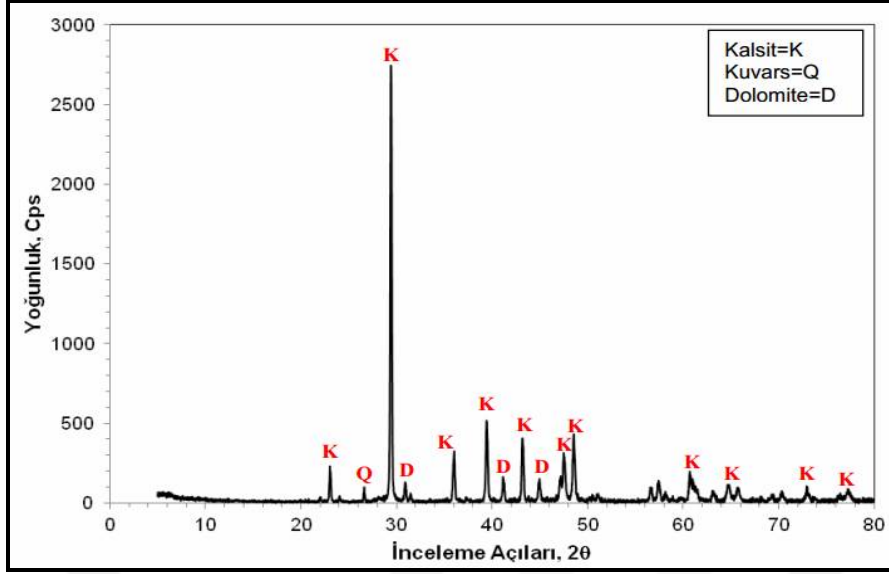
Bu bölümde betonarme imalatında kullanılan farklı sınıflardaki betonarme çeliklerinin ve uçucu kül katkılı betonun korozyona karşı değişim özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalar kapsamındaki kullanılan malzemeler, tasarlanan seriler, deney cihazları ve gerçekleştirilen deneyler hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1 Materyal

Bu çalışmada agrega, uçucu kül, çimento ve farklı sınıflarda inşaat çelikleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan materyallerin teknik, minerolojik, kimyasal ve fiziksel özellikleri aşağıdaki gibidir.

3.1.1 Agrega

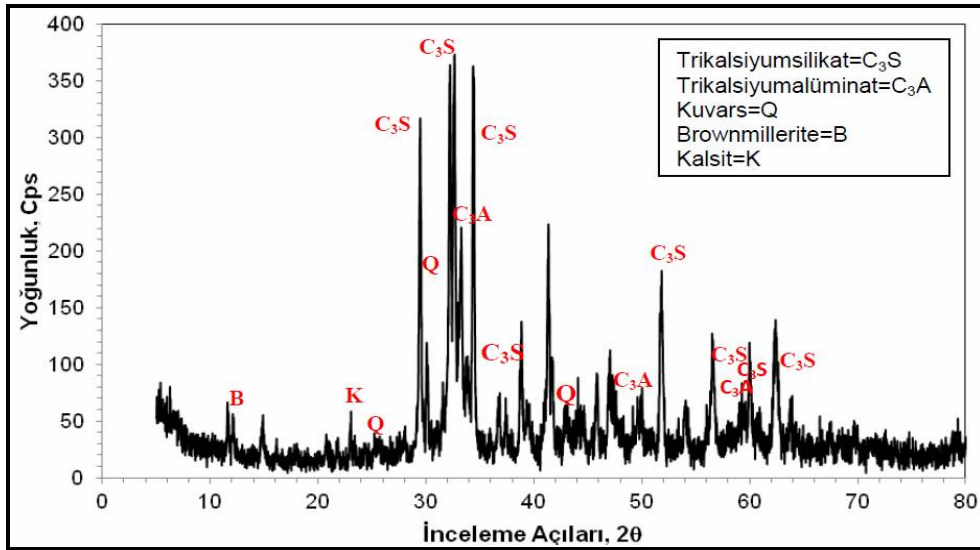
Beton numunelerin üretiminde agrega olarak Afyonkarahisar Işıklar Mevkii Kırka Tepesi'nde bulunan Kolsan Hazır Beton şirketine ait taş ocağından elde edilmiş agregalar kullanılmıştır. Bu agregaların minerolojik olarak kökeni kireçtaşıdır. İri agregaların parçalanma derecelerine bakıldığında Los Angeles kategorisi LA₂₅, donma-çözülme kaybı %8.9'dur. Beton agregasının suda çözülebilen klorür iyon muhtevası %0.0031, asitte çözülebilen sülfat kütlece %0.0086, toplam kükürt miktarı ise %0.0069'dur. Agrega gradasyonunun sağlanabilmesi için 0-4 mm kırma kum, 4-12 mm kırma taş I ve 12-22 mm kırma taş II agregaları kullanılmıştır. Bu agregaya ait XRD analizi sonuçları Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Agregaların XRD analizi sonucu elde edilen pik değerlerine göre kalker esaslı agregada yüksek oranda kalsit, az miktarda da kuvars ve dolomit mineralleri mevcuttur. Agregaya ait XRF analiz sonucu belirlenen kimyasal içerik değerleri ise diğer malzemeler ile birlikte Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Agregaya ait XRD analiz sonuçları.

3.1.2 Çimento

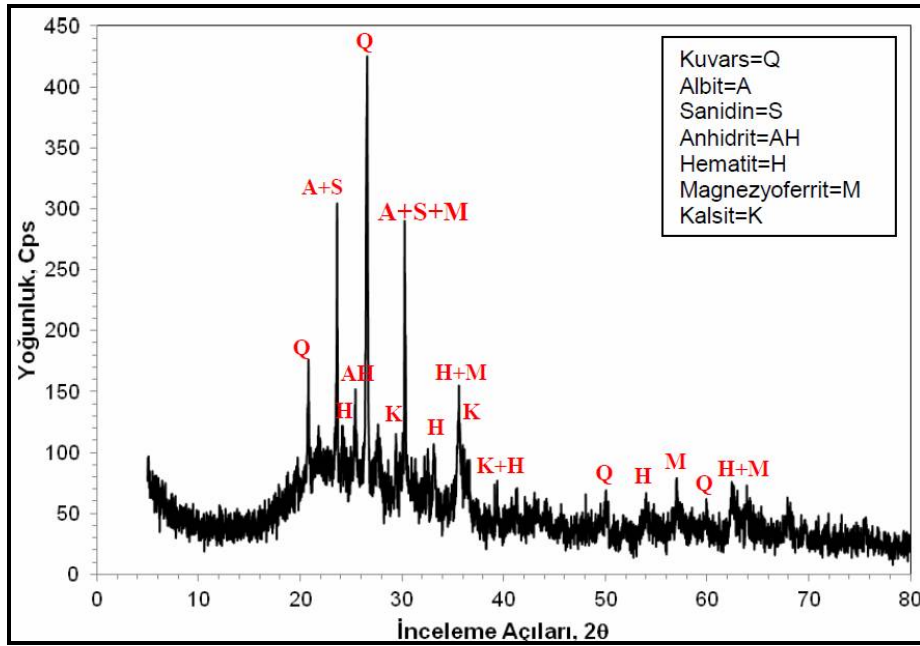
Beton üretiminde Afyon Çimento Fabrikası'nın (ÇİMSA) üretmiş olduğu TS EN 197-1 standartlı CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun XRD analizi sonuçları Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Çimentonun XRF analizi sonuçları Çizelge 3.1'de, fiziksel özellikleri ve lazer tane boyut analizi sonuçları ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Çimentoya ait XRD analiz sonuçları.

3.1.3. Uçucu Kül

Beton üretiminde mineral katkı olarak Seyitömer Termik Santraline ait uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün XRD analizi sonuçları Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Uçucu külde, kuvars, hematit, kalsit, magnezyoferrit, anhidrit, albit, sanidin gibi kristalize fazlar bulunmaktadır. XRD analizi sonuçları ışığında, silissi yapı ve camsı fazın belirgin olması Seyitömer uçucu külünün pozolanik aktivitesinin güçlü bir karakterde olduğunu göstermiştir. Çizelge 3.1’de verilen XRF analiz sonuçlarına göre; uçucu külün toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değeri %75.4, CaO değeri ise %12.10’dur. Bu verilere göre kullanılan uçucu kül, ASTM C 618-08a’ya göre C sınıfı uçucu küldür. Bu uçucu külün fiziksel özellikleri ve lazer tane boyut analizi sonuçları ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Uçucu küle ait XRD analiz sonuçları.

Çizelge 3.1 Betonlarda kullanılan malzemelerin XRF analiz sonuçları.

Malzeme	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MnO
CEM I 42.5 R	16.80	4.81	3.55	63.90	1.94	0.74	1.24	3.02	0.12
Uçucu Kül	44.40	17.90	13.10	12.10	3.96	0.67	1.91	2.00	0.12
Agrega	1.72	0.82	0.15	52.50	1.63	0.03	0.08	0.01	0.01

Çizelge 3.2 Çimento ve uçucu küle ait fiziksel özellikler ve lazer tane boyutu analiz sonuçları.

Malzeme	Özgül ağırlık	Özgül yüzey (cm ² /gr)	d ₁₀ (µm)	d ₅₀ (µm)	d ₉₀ (µm)
CEM I 42.5 R	3.15	3320	3.9	23.8	56.1
Uçucu Kül	2.10	2815	7.1	34.4	110.5

3.1.4 Kimyasal Katkı

Betonlarda kimyasal katkı olarak polikarboksilat destekli Chryso Fluid HP 203 su azaltıcı süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır.

3.1.5 Sodyum Klorür Tuzu

Beton içerisindeki donatıların hızlandırılmış korozyona tabi tutulmasında sanayi tipi sodyum klorür tuzu kullanılmıştır.

3.1.6 İnşaat Çelikleri

Deneyssel çalışmada kullanılan çeliklerin spektral analiz ile elde edilen kimyasal bileşimleri % ağırlık olarak Çizelge 3.3’de verilmiştir. Çalışmada üç farklı çelik sınıfı kullanılmıştır. S220 sınıfı düz betonarme çelikleri Karabük Demir Çelik Fabrikasından, S420 ve B500C nervürlü betonarme çelikleri İskenderun Demir Çelik Fabrikasından temin edilmiştir. Betonarme çeliği, inşaat sektöründe yoğun olarak kullanılan Ø12 (mm) çaplı çelik çubuklar kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Deneylerde kullanılan betonarme çeliklerinin kimyasal bileşimi (%).

Çelik Sınıfı	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	N	Fe
S220	0,16	0,40	0,50	0,02	0,04	0,10	0,21	0,13	0,01	98,43
S420	0,27	0,30	0,80	0,03	0,05	0,07	0,29	0,14	0,01	98,04
B500C	0,17	0,20	0,69	0,01	0,04	0,13	0,40	0,13	0,01	98,22

Betonarme çeliklerinin çekme deneyi sonucu elde edilen mekanik özellikleri ise Çizelge 3.4’de verilmiştir. Hem kimyasal içerik hem de mekanik özellikler açısından kullanılan çelikler TS 708’e uygundur.

Çizelge 3.4 Betonarme çeliklerinin mekanik özellikleri.

Çelik Sınıfı	Çap (mm)	Akma Dayanımı, R_e (MPa)	Çekme Dayanımı R_m (MPa)	R_m/R_e	Kopma Uzaması A_5 (%)
S220	12	354.3	491.3	1.4	29.5
S420	12	485.0	595.0	1.2	24.4
B500C	12	595.0	709.3	1.2	19.0

3.2 Metot

Betonarme yapıların inşaatında kullanılan çelikler soğuk şekillendirme ile bükülüp istenilen duruma getirilmektedir. Bu işlem sırasında donatı üzerinde hem bir gerilim oluşmakta hem de gerilim oluşan bölgede, çelik çubuk üzerindeki koruyucu tabaka dökülmektedir. Dolayısı ile soğuk şekillendirme sonucu oluşan bu değişimlerin korozyon mekanizmasına etkilerini araştırmak için iki farklı durum tasarlanmıştır. Birincisi; beton içerisindeki çelik çubukların hızlandırılmış korozyon düzeneği ile belirlenmesi ikincisi ise; büküm noktasındaki durumu ortaya koymak için çelik donatı numuneleri üzerinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon deneyleridir.

3.2.1 Beton Numunelerin Hazırlanması

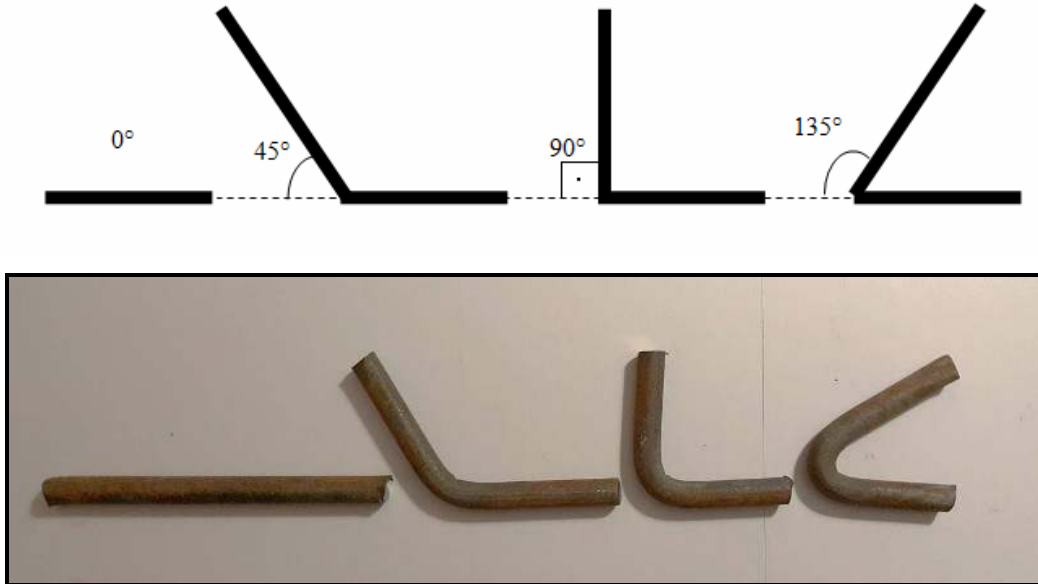
Betonarme çeliklerinin gerilim durumuna göre korozyon davranışlarının incelendiği bu çalışmada çelik donatılar iki farklı ortamda korozyona maruz bırakıldılar. Bunlardan ilki beton içerisinde hızlandırılmış korozyon uygulamasıdır. Bunun için iki farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımlardan ilki Portland çimentosunun dışında herhangi bir puzolanın bulunmadığı normal beton (NB); diğeri ise çimento ile uçucu külün %25 oranında ikame edildiği uçucu kül katkılı betondur (UKB). Bu betonlara ait karışım oranları Çizelge 3.5’te verilmiştir. Her iki betonda da su/çimento oranı 0.5’tir. UKB betonunda bu oran su/(çimento + uçucu kül) şeklinde hesaplanmıştır. Korozyon deneyleri beton 90 günlük olduğunda yapıldığından, betonlara ait mekanik ve fiziksel özellikler hem 28. hem de 90. günde yapılan deneyler ile belirlenmiştir.

Çizelge 3.5 Beton karışım oranları.

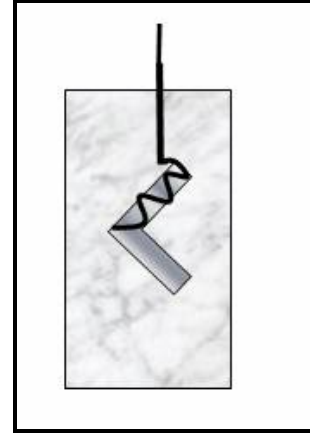
Beton Karışımı	Agregalar (kg/m ³)			Çimento (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Kimyasal Katkı (kg/m ³)	Su (Lt)	W/C
	0-4 mm	4-12 mm	12-22 mm					
NB	962	592	394	300	0	3	150	0.5
UKB	947	582	387	225	75	3	150	0.5

3.2.2 Hızlandırılmış Korozyon Numunelerinin Hazırlanması

Betonarme elemanlar içerisinde bulunan çelik çubukların gerilim korozyonunu belirlemek için yapılan bu çalışmada çubuklara soğuk şekillendirme yöntemi ile dört farklı gerilim hali uygulanmıştır. Soğuk şekillendirme ile bükülerek deforme edilen çubuklar Resim 3.1'deki gibi şekillendirilmiş ve bükme açısına göre anılmıştır. 12 mm (Ø12) çapında 120 mm (10Ø) uzunluğundaki çubuklar tam orta noktasından bükülmüştür. Bükülen bu çubuklara 4 mm çapında, etrafı PVC yalıtımlı bakır tel sarılmıştır. 100 x 200 mm ebatlarına sahip silindir kalıplar içerisine yerleştirilerek beton dökülmüştür. Bu sayede Resim 3.2'de de görüldüğü gibi çelik numunenin tamamı beton içerisine yalıtımlı bir şekilde gömülebilmektedir.



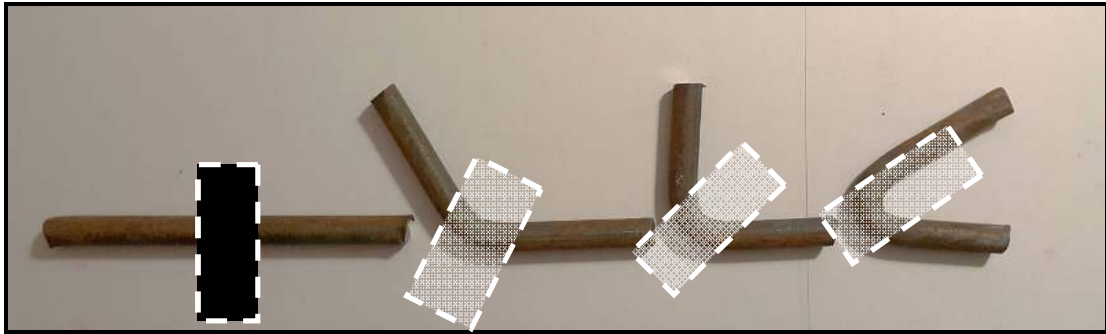
Resim 3.1 İnşaat çelik çubuklarının bükme açıları.



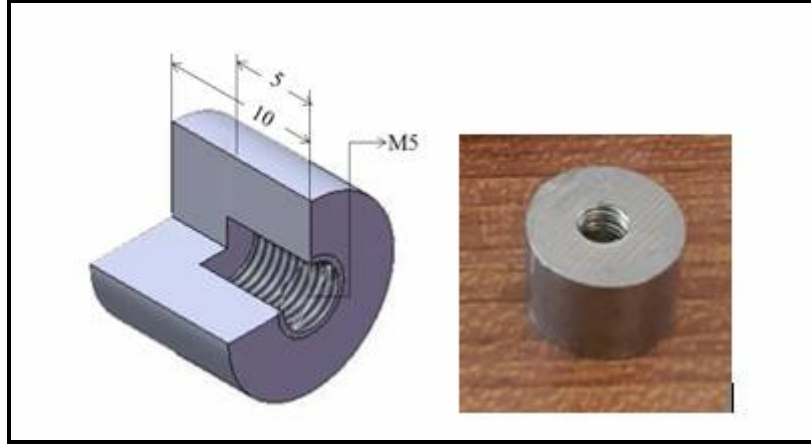
Resim 3.2 Hızlandırılmış korozyon numuneleri.

3.2.3 Tafel Numunelerinin Hazırlanması

Beton içerisine gömülü numuneler ile aynı özelliklere sahip olarak 12 mm çapındaki çelik çubuklar dört farklı gerilim halinin ardından Resim 3.3'te de gösterildiği gibi bükme işleminin tam gerçekleştiği ve gerilimin en yoğun olduğu bölgelerden kesilerek tornada işlenmiştir. Şekil 3.4'de de gösterildiği gibi 10 mm yüksekliğindeki silindirin orta noktasından M5'lik 5 mm derinliğinde vida ağzı açılmıştır. Silindir numunenin alt yüzeyi 120 ila 1200 mesh arasındaki zımpara kâğıtları ile zımparalanarak ardından alkol ile yüzeyleri temizlenip kurutulduktan sonra deneye hazır hale getirilmiştir.



Resim 3.3 Tafel deneyi için çelik çubuklardan numune alınan yerler.



Şekil 3.4 Tafel numunesi.

3.3 Yapılan Deneyler

Bu tez çalışmasında yapılan deneyler beton için, çelik için ve betonarme için ayrı ayrı ele alınmıştır.

3.3.1 Beton Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

Beton numuneler üzerinde sertleşmiş beton deneyleri olarak adlandırılan basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, klor geçirimliliği ve elektriksel özdirenç deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ait detaylar aşağıda sunulmuştur.

3.3.1.1 Basınç Dayanımı Deneyi

Mekanik özelliklerden biri olan basınç dayanımı testi için önceden hazırlanan UKB ve NB serilerinden 28 ve 90 günlük kür sürelerinin tamamlanmasından ardından serilerden üçer adet alınarak basınç dayanımlarının belirlenmesi ve beton sınıflarının tayini için 200 tonluk tek eksenli tam otomatik basınç presi kullanılmıştır (Resim 3.5). Basınç dayanımı deneyi 15x15x15 cm boyutlu küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kür süreleri tamamlanan numuneler eksenel basınca tabi tutulmadan bir gün önce kür havuzundan çıkartılarak yüzey nemini bırakmaları sağlanmıştır. Deneyde küp numuneler yan yatırılıp pürüzsüz yüzey kısımlarının presin iki çelik sıkıştırma tablası arasına gelmesi sağlanmıştır. Numuneler ortalama bir hızla yüklenmiş ve kırılma yükleri belirlenmiştir. Numunenin kırıldığı kuvvetin yüzey alanına bölünmesi ile basınç

dayanımı hesaplanmıştır. Çıkan sonuçların aritmetik ortalaması alınarak beton serilerine ait dayanımlar belirlenmiştir. Deney Afyon Kocatepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Basınç dayanımı (3.1) formülü kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\sigma = (P/A) \quad (N/mm^2) \quad (3.1)$$

Burada σ : betonun basınç dayanımını (N/mm^2), P: kırılma yükünü (N) ve A:deney yükü uygulama yönüne dik deney numunesi kesit alanıdır (mm^2).



Resim 3.4 Tek eksenli basınç presi.

3.3.1.2 Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

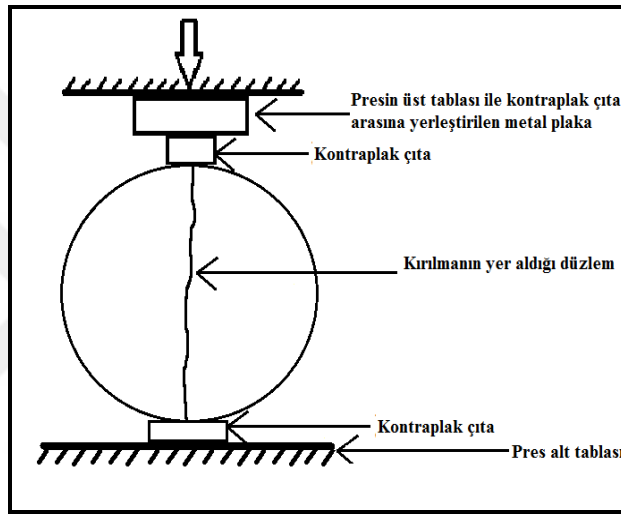
Dolaylı çekme yükleri altında betonun çekme dayanımını belirlemek için 100x200 mm boyutlarındaki NB ve UKB silindir numuneler üzerinde TS EN 12390-6'ya uygun olarak yarma deneyi yapılmıştır. 28 ve 90 günlük kür süreleri için üçer adet numune deneye tabi tutulmuştur. Yarmada çekme dayanımını belirlemek için Şekil 3.5'te görülebileceği gibi, silindirik numuneler deney presinin üzerine, numune eksenli presin alt tablasına paralel olacak tarzda yatırılmıştır. Deney presi ile uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmiş ve kırılma yükü (P) ölçülmüştür. Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin kırılma tarzı, numunenin ortasından boyuna

yarılarak gerçekleşmiştir.

Dolaylı çekme gerilmeleri (3.2) formülü kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\sigma_{y\check{c}} = (2P) / (\pi LD) \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3.2)$$

Formülde $\sigma_{y\check{c}}$: yarmada-çekme dayanımı (MPa), P: kırılma yükü (N), D: numunenin çapı (mm), L: numunenin boyunu ifade etmektedir (mm).



Şekil 3.5 Yarma deneyi.

3.3.1.3 Klor Geçirirnililiği Deneyi

Bu deney betonun klorür iyonu geçişine karşı göstermiş olduğu direncin belirlenmesine yöneliktir. Betonların klorür geçirirnililikleri belirlenirken ASTM C 1202 (1997) hızlı klorür geçirirnililiği deney yönteminden yararlanılmaktadır. ASTM C 1202-97 standardına göre klor geçirirnililiği deneyi için 100x200 mm boyutlarındaki 28 ve 90 günlük kür sürelerine tabi tutulan NB ve UKB olan silindir numunelerden elde edilen disk numuneler kullanılmıştır. Deneyde kullanılan disklerin çapı 100 mm, kalınlığı 50 mm olan silindir numunelerdir. Disk numunelerin etrafı elektrik akımının geçmesini önlemek amacıyla silikon ile kaplandıktan sonra numuneler silikonun kuruması için 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra vakum haznesine konulan numuneler 3 saat süre ile 1 mm Hg den daha düşük basıncın altında bekletildikten sonra haznenin içerisine mevcut

basınç değişmeden saf su doldurulmuştur ve tamamen saf su ile dolan hazne içerisindeki numuneler bu şekilde 1 saat daha vakumda tutulmuştur. Vakumlama işleminin ardından hazneye hava girişine izin verilmiştir ve numuneler 18 ± 2 saat süre ile saf suda bekletilmiştir (Resim 3.5). Bu işlemten sonra deney için hücrelere yerleştirilen numunelerin etraflarına, çözeltilerin sızıntısını engellemek için çabuk kuruyan silikon sürülmüştür. Silikonun kurumasının ardından deneye hazır hale gelen düzenekte hücrelerin birine %3'lük NaCl çözeltisi, diğerine 0.3 N NaOH çözeltisi doldurulmuştur ve 60 voltluk potansiyel fark oluşturmak için, güç kaynağının “-” kutbu NaCl hücresine, “+” kutbu ise NaOH hücresine bağlanmıştır (Resim 3.6). Güç kaynağının çalıştırılması ile birlikte ilk ölçüm yapılmıştır ve deneyin başlangıcından bitimine kadar 6 saat süre ile her 30 dakikada bir devreden geçen akım ölçülmüştür ve Coulomb cinsinden hesaplanmıştır. ASTM C 1202'ye göre sınır değerler Çizelge 3.6'da verilmiştir.



Resim 3.5 Klorür geçirimliliği numunesinin hazırlanması.



Resim 3.6 Klor geçirimliliği deney düzeneği.

Çizelge 3.6 Toplam geçen yük ile klorür geçirimsiliği arasındaki ilişki.

Toplam Geçen Yük (Coulomb)	Klorür Geçirimsiliği
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	Önemsiz

3.3.1.4 Elektriksel Direnç Deneyi

Elektriksel direnç deneyimizde James Instruments'ın RM-8000 marka elektriksel direnç ölçer kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce kür süresi dolan numuneler suya doymun hale getirilmiştir. Suya doymun hale gelen numuneler yüzeyleri kuruyana kadar bekletilmiştir ve daha sonra elektriksel direnç ölçümü yapılmıştır. NB ve UKB numunelerin elektriksel direnç deneyleri için 100x200 mm boyutlarındaki silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneye başlamadan önce silindir beton numunelerin orta bölgesine en az 8 mm derinliğinde ve delikler arası mesafe 50 mm olacak şekilde iki adet delik matkap yardımı ile açılmıştır. Açılan bu delikler iletken bir jel ile doldurulmuştur ve sonrasında direnç ölçerin elektrodları bu deliklere yerleştirilmiştir ve okuma yapılmıştır. Resim 3.7'de elektriksel direnç ölçümünde kullanılan deney düzeneği gösterilmiştir. Birçok araştırmacı tarafından korozyon riski ve betonun elektriksel direnci arasındaki ilişki Çizelge 3.7'deki gibi verilmiştir.

Çizelge 3.7 Elektriksel direnç ve korozyon olasılığı arasındaki ilişki.

Elektriksel Direnç (Ωcm)	Korozyon Olasılığı
<5000	Çok Yüksek
5000-10000	Yüksek
10000-20000	Düşük
>20000	İhmal Edilebilir



Resim 3.7 Elektriksel direnç ölçümü.

3.3.2 Çelik Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler

Çelik için bu tez çalışmasında yapılan deney ve incelemeler elektrokimyasal korozyon deneyi, X ışınımı kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) deneyi olarak sıralanmıştır.

3.3.2.1 Elektrokimyasal Korozyon Deneyi

Elektrokimyasal korozyon deney sonuçları, A.K.Ü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümünde bulunan ve Echem Analyst Soft Programı ile desteklenen Gamry Reference 600 Potansiyotat/Galvanostat cihazında yapılmıştır. Resim 3.8’de akım-potansiyel eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan deney düzeneği gösterilmiştir. Deneye başlamadan önce analiz düzeneği sırasıyla 25 °C’de 10 dk aseton, 10 dk etil alkol ve 10 dk çift distile edilmiş suda ultrasonik olarak temizlenmiştir. Numuneler daha sonra 30 °C’de etüv fırını içerisinde kurutulmuştur. Temizlenen numuneler yaklaşık 30 dk % 0.35 M NaCl sıvısında kararlı hale gelinceye kadar bekletilmiştir. Sonrasında analize başlanmıştır. Analizde elde edilen akım yoğunluğu-potansiyel eğrilerinden korozyon akımı (I_{corr}), korozyon akımının yüzey alanına bölünerek korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}), korozyon hızı, polarizasyon direnci (R_p) korozyon potansiyeli (E_{corr}), anodik ve katodik Tafel eğimleri (β_a ve β_c) tespit edilmiştir.



Resim 3.8 Elektokimyasal korozyon deney hücresi.

3.3.2.2 X Işınımı Kırınımı (XRD) Analizi

X-ışınları kırınım yöntemi kütle veya toz halindeki malzemelerin, kristalin malzemelerin karakterizasyonunda kullanılan, yapı kalitesini araştıran, malzemeye hasar vermeyen önemli, tahribatsız ve kolay temel tekniklerden biridir. Bu teknikte, malzeme yapısı (kristalin/amorf), kristal yapısının belirlenmesi, tabaka yönelimi, epitaksiyel tabakaların kalınlığı, tabakalar arası geçişler, gerilmeler, latis parametresinin hesaplanması ve dislokasyonlar hakkında nanometre mertebelerinde çok önemli bilgiler elde edilmesini sağlamaktadır. X-ışını kırınımı çeşitli kristal düzlemlerinden saçılan x-ışınlarını dedekte etme prensibine dayanır.

XRD deneyimiz Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Bruker marka D 8 Advance model XRD cihazı, numunelerin X-ışınları difraksiyon analizleri (5-80) derece arasında, monokromatik CuK_α ($\lambda=1.5406$ °Å) radyasyonu yayımlayan XRD sisteminde yapılmıştır. Kullanılan X-ışını difraksiyonu cihazının dış görünümü Resim 3.9'da gösterilmiştir.



Resim 3.9 Bruker D 8 Advance XRD cihazı.

3.3.2.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu yüksek çözünürlüklü resim oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve aynı ortamda elektromagnetik lenslerle inceltiren elektron demeti ile incelenecek malzemeyi analiz etme olanağı sunmaktadır. Elektron mikroskobu yüksek voltaj altında hızlandırılmış elektronların, numune yüzeyine çarptırılıp yansıtılması prensibi ile çalışmaktadır. Mikroskopta oluşturulan resimler, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışımlar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak oluşturulur. Numune yüzeyinden yansıyan bu elektronlar bir dedektör yardımıyla tutulur ve uygun bilgisayar yazılımları kullanılarak numunenin yüzey özellikleri belirlenir.

SEM analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan LEO 1430 VP marka ve modelde elektron mikroskobu kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan SEM cihazının görünümü Resim 3.10'da verilmiştir.



Resim 3.10 LEO 1430 VP.

3.3.3 Betonarme Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler

100x200 mm silindirik numunelerin merkezine gömülü çubuklar şeklinde üretilmiş betonarme numuneler üzerine hızlandırılmış korozyon düzeneği kurulup korozyon akımına maruz bırakılarak hızlandırılmış korozyon tayini deneyi yapılmıştır.

3.3.3.1 Hızlandırılmış Korozyon Deneyi

NB ve UKB serilerimizin korozyona karşı dayanıklılığını belirlemek amacıyla donatılı beton numunelerinde hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılmıştır. Bu deney yönteminde kullanılan deney düzeneği doğru akım kapasiteli bir güç kaynağı, verilerin toplanmasında kullanılan bir veri toplama cihazı, içerisinde %5 konsantrasyonlu NaCl çözeltisi su (elektroliz), paslanmaz çelik plaka bulunan bir plastik kap ve üretilmiş deney numunelerimizden oluşmaktadır. Çözeltisi suyumuzda numuneler yerleştirilmiştir ve bu numunelerde bulunan çelik çubuklara “+” (anot), paslanmaz çelik çubuklara “-” (katot) 30 voltluk elektrik yükü verilerek devreden geçen akım mA cinsinden ölçülmüştür. Burada ölçümleri her bir numune için bir ampermetre ile ölçmektense elektronik bir devreden faydalanılarak eş zamanlı altı adet numunede ölçümlerini yapmak ve bu ölçümlerde elde edilen verileri kaydetmek düşünülmüştür. Bu amaçla tasarlanan devre üzerinde bulunan pike yazılan kodlar sayesinde mA değerleri

ölçülebilmekte, veriler aynı anda LCD ekranda gösterilmekte ve hafızaya kaydedilebilmektedir (Resim 3.11).

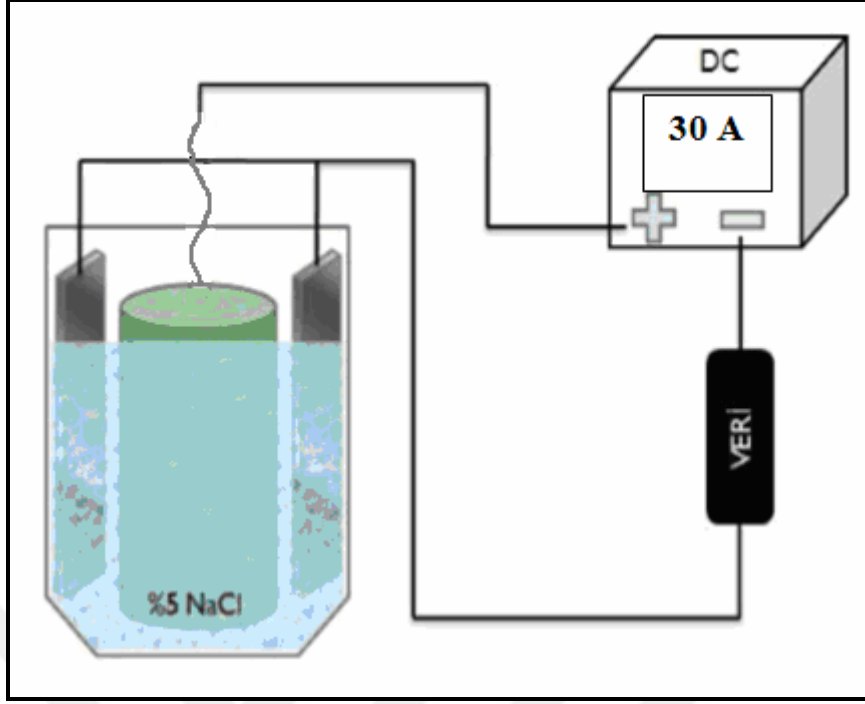


Resim 3.11 Numuneler üzerinden geçen akımları ölçen devre.

Hafızaya kaydedilen veriler, seri port aracılığı ile bilgisayara bağlanılarak bu cihaz için yazılmış olan program vasıtasıyla alınmıştır. Aktarılan veriler text formatında kaydedilmiş ve aktarımla aynı anda altı hücrenin de akım-zaman grafikleri çizilmiştir. Hızlandırılmış korozyon cihazının görüntüleri Resim 3.12’de ve hızlandırılmış korozyon cihazının çalışma prensibi Şekil 3.6’da verilmiştir.



Resim 3.12 Hızlandırılmış korozyon düzeneği.



Şekil 3.6 Hızlandırılmış korozyon cihazının çalışma prensibi.

3.3.3.2 Ağırlık Kaybı Deneyi

Belirli zamanlar boyunca korozif bir ortamda tutularak numunelerin eskitilmesi ve eskitme sürecinden sonra korozyona uğrayan numunelerin ağırlıklarındaki değişimlerin ölçüldüğü bir deney yöntemidir. Deneyde öncelikle korozyona uğratılacak çelik donatıların korozyona uğramadan önceki ilk ağırlıkları belirlendi. Daha sonra donatıların betonların içerisinde gömülmesi ile üretilen betonarme elemanlar belli bir süre %5'lik NaCl çözeltisinde bekletildi ve betonların içerisindeki donatılarda korozyonun başlaması sağlandı. Daha sonra beton numuneler kırılarak içerisinde korozyona uğrayan çelik donatılar çıkartıldı. Bu çelik donatılarda korozyon nedeni ile oluşan pas ürünleri hidroklorik asit olarak bilinen kimyasal sıvı ile temizlendi ve sonrasında donatılar hassas terazi ile tartılarak çelik donatıları son ağırlıkları belirlendi. Son ve ilk ağırlık arasındaki fark korozyon nedeniyle oluşan ağırlık kayıplarını vermektedir.

Ağırlık kaybına bağlı olarak hesaplanan korozyon hızı (3.3) formülü ile belirlenmiştir:

$$\text{Korozyon hızı (mpy): } \frac{87.6 \times W}{D \times A \times T} \quad (3.3)$$

W: korozyon nedeniyle oluşan ağırlık kaybı (mg), A: korozyonun oluştuğu yüzeyi (cm²), D: donatın yoğunluğu, T: deney süresini (saat), mpy: korozyon hızını (mil per year, mm/yıl) ifade etmektedir (Muralidharan *et al* 2004).



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgular bu bölümde değerlendirilmiştir.

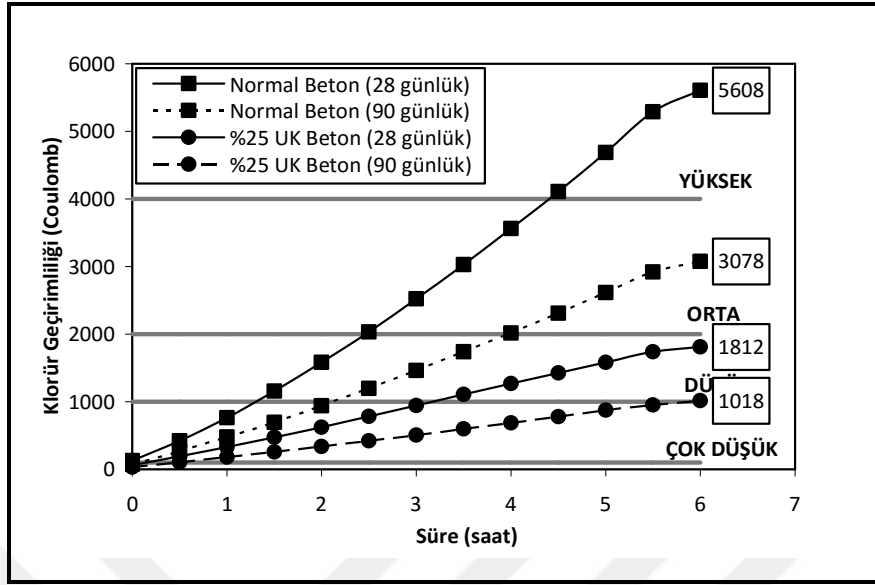
4.1 Betonun Özellikleri

Soğuk şekillendirme sonrası beton içerisindeki çelik donatıların korozyon davranışlarının belirlenmesinde, betonun etkisini de belirlemek için iki farklı beton üretilmiştir. Bunlar, içerisinde çimentoya ikame edilen mineral katkının olmadığı normal beton (NB) ve çimento ile ikame edilen %25 uçucu kül katkılı betondur (UKB). Mineral katkının uzayan kür süreleri ile özelliklerini daha iyi sergilediğinden betonlar üzerindeki deneyler hem 28 hem de 90 günlük betonlarda gerçekleştirilmiş ve korozyon deneyleri 90 günlük betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Beton örneklerine ait basınç ve yarmada çekme dayanımları Çizelge 4.1’de verilmiştir. 28 günlük dayanımlarda NB kıyasla %92 oranında dayanım gösteren UKB 90 günde %96 oranında basınç dayanımı sergilemiştir.

Betonarme yapılarda donatının korozyona uğrama sebeplerinin başında klorür varlığı gelmektedir. Betonun korozyon dayanımı açısından klorür geçirimsizliği nitelik belirlenmesi açısından yapılan bir deneydir. Şekil 4.1’de beton serileri için klor geçirimsizliği sonuçları verilmiştir. Buna göre uçucu kül katkısı betonun klorür geçirimsizliğine olumlu katkıda bulunmaktadır. Bununla birlikte kür süresinin artması klorür geçirimsizliğini azaltmaktadır. NB’nin 28 günlük örneklerinde “çok yüksek” olan klor geçirimsizliği 90 günde “orta” seviyeye gerilemiştir. UKB’de ise 28 günde “düşük” seviyede olan klorür geçirimsizliği 90 günde “çok düşük” sınır değerine kadar gerilemiştir.

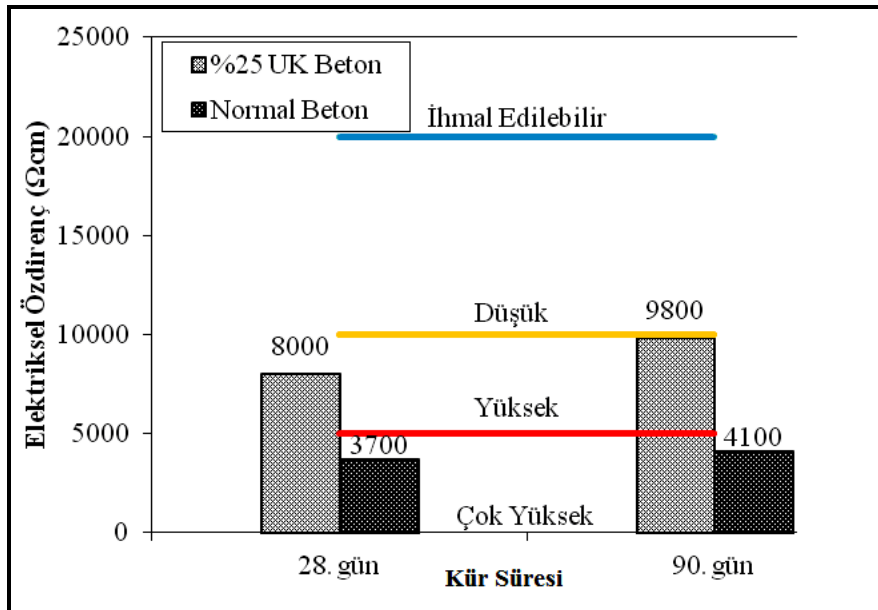
Çizelge 4.1 Betonların mekanik özellikleri.

Kür Süresi (gün)	Basınç Dayanımı (MPa)		Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	
	NB	UKB	NB	UKB
28	49.4	45.4	3.8	3.5
90	51.8	49.7	4.2	3.8



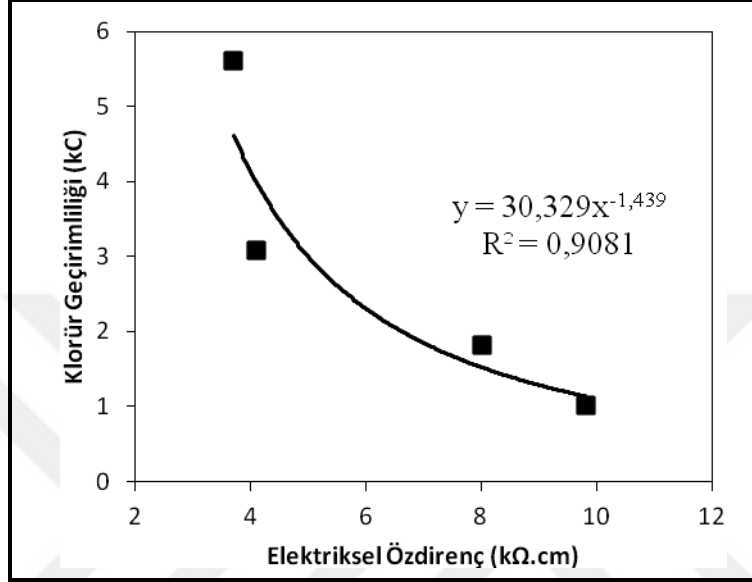
Şekil 4.1 Betonların klor geçiririliği.

Deneylerde kullanılan beton serilerine ait elektriksel özdirenç ölçüm sonuçları Şekil 4.2’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde UKB’nin elektriksel özdirencinin NB’ye göre oldukça “yüksek” olduğu, kür süresinin artmasıyla da bu değerlerin de bir miktar arttığı görülmektedir. Buna göre NB’nin korozyon ihtimali çok yüksek bölgede iken UKB’nin korozyon ihtimali düşük sınır bölgesine yakındır.



Şekil 4.2 Betonların elektriksel özdirenci.

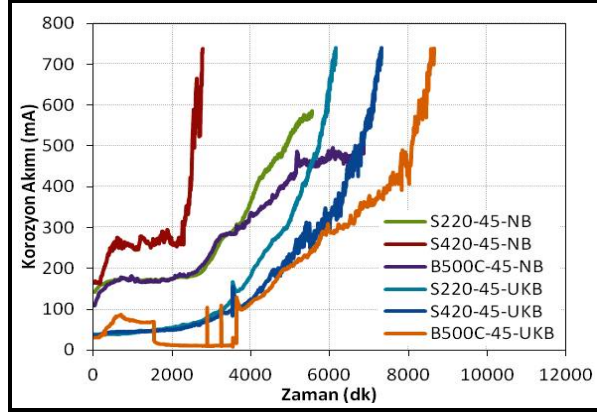
Beton numunelerin elektriksel özdirenci ile klorür geçirimsiliği arasında ters bir orantı vardır. Beton türünden ve kür süresinden bağımsız olarak Şekil 4.3'e göre bu iki değişken arasındaki kuvvetli bir ilişki vardır.



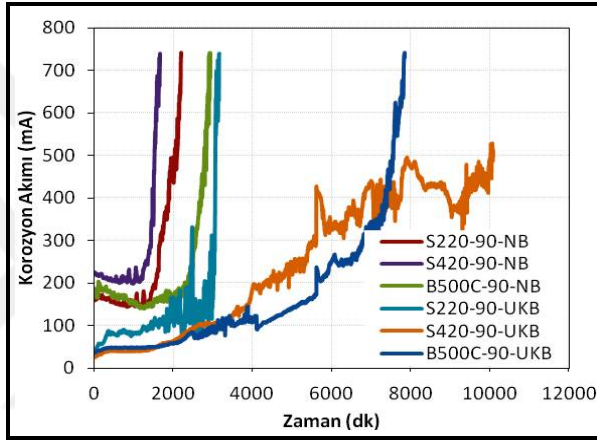
Şekil 4.3 Betonun elektriksel özdirenç-klorür geçirimsiliği ilişkisi.

4.2 Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları

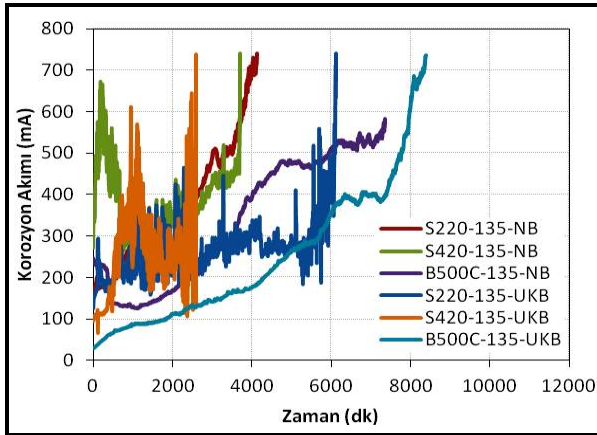
Betonun içerisine tamamen gömülmüş betonarme çelik çubuklarına uygulanmış hızlandırılmış korozyon deneyi sonucunda zamana bağlı olarak elde edilen korozyon akımı değerleri Şekil 4.4-4.6'da verilmiştir. Bu grafiklerde sunulan ham verilerden ziyade bu grafiklerden elde edilen başlangıç akımları, maksimum akımlar, ortalama akım değerleri ve deney sürelerinden faydalanılarak deney sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 4.4 45° Bükümlü çelik çubukların korozyon akımı.



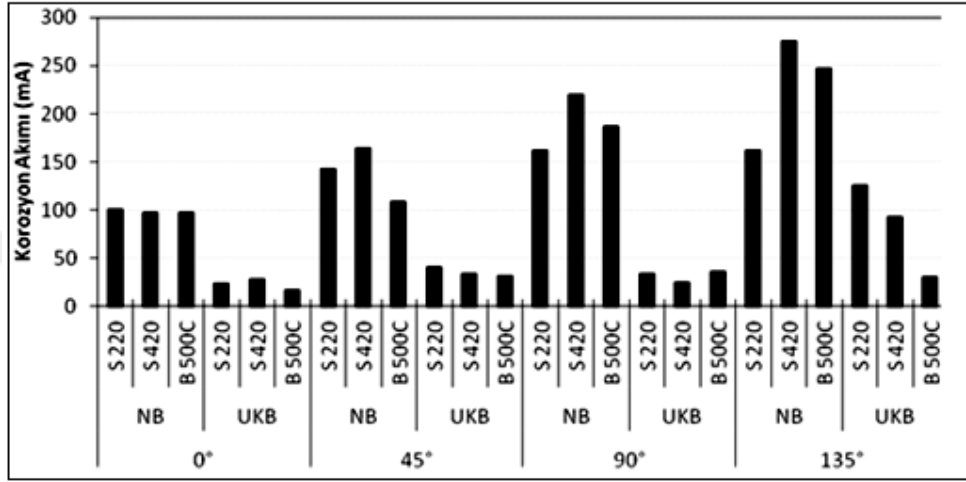
Şekil 4.5 90° Bükümlü çelik çubukların korozyon akımı.



Şekil 4.6 135° Bükümlü çelik çubukların korozyon akımı.

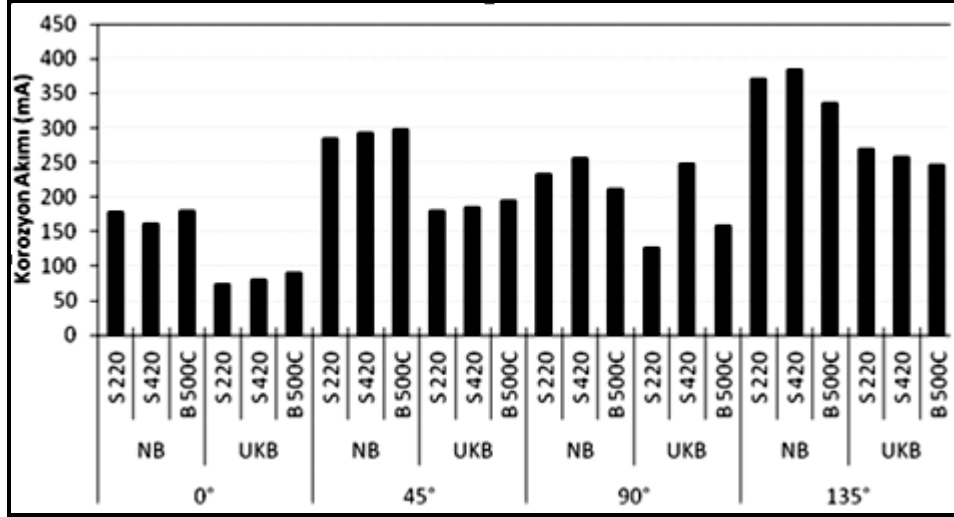
Şekil 4.7’de beton içerisindeki farklı sınıflardaki ve bükme açısındaki çeliklerin başlangıç korozyon akımları verilmiştir. Tüm bükme açılarında UKB içerisindeki donatıların başlangıç korozyon akım değerleri, NB içerisindeki donatıların başlangıç

korozyon akım değerlerinden daha düşüktür. NB serilerde donatı bükme açısı arttıkça başlangıç korozyon akımlarında artış göstermektedir. UKB de ise 135° de başlangıç korozyon akımı artmaktadır. En düşük başlangıç korozyon akım değeri bükülmemiş, UKB içerisindeki B500C sınıfı çelikte 17 mA'dır. En yüksek başlangıç korozyon akım değeri 135° bükülmüş NB içerisindeki S420 sınıfı çelikte 275 mA'dır.



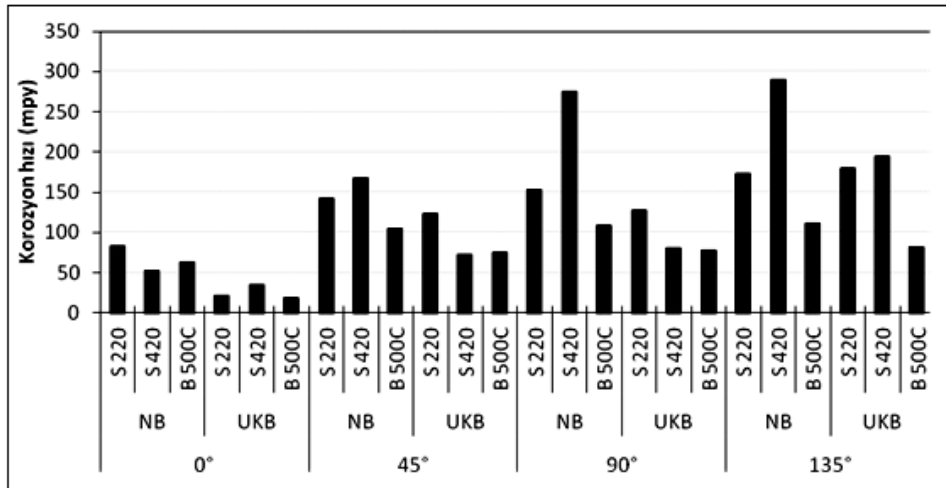
Şekil 4.7 Betonarme örneklerinin başlangıç korozyon akımları.

Ortalama korozyon akımlarının verildiği Şekil 4.8'e bakıldığında beton çeşidinin etkisi görülmektedir. UKB serilerin ortalama korozyon akımları NB serilerinden düşüktür. Bükme açısının artması da ortalama korozyon akımını da arttırmaktadır. En düşük ortalama korozyon akımı bükülmemiş UKB içerisindeki S220 sınıfı çelikte 73 mA olmuştur. En yüksek ortalama korozyon akımı ise 135° bükülmüş NB içerisindeki S420 sınıfı çelikte 384 mA olmuştur.



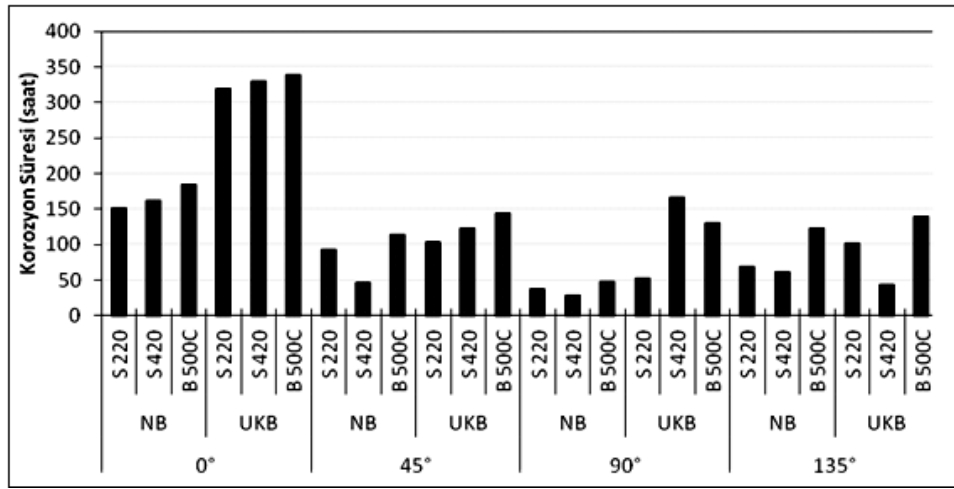
Şekil 4.8 Betonarme örneklerinin ortalama korozyon akımları.

Yapılan hızlandırılmış korozyon deneyinin ardından ağırlık kaybına bağlı olarak hesaplanan korozyon hızı değerlerindeki değişim Şekil 4.9’da verilmiştir. Soğuk şekillendirme ile deforme edilmemiş olan örneklerde korozyon hızı en düşük seviyededir. Burada UKB içerisindeki çeliklerde korozyon hızı NB’ye göre daha yavaştır. Korozyon hızı, donatıların bükülerek soğuk şekillendirme ile deforme edilmesi ile artış göstermektedir. Deforme edilmiş donatılar arasında en yüksek korozyon hızı S420 sınıfı çeliklere aittir. Genel olarak en düşük korozyon hızı B500C sınıfı çeliklerdedir.



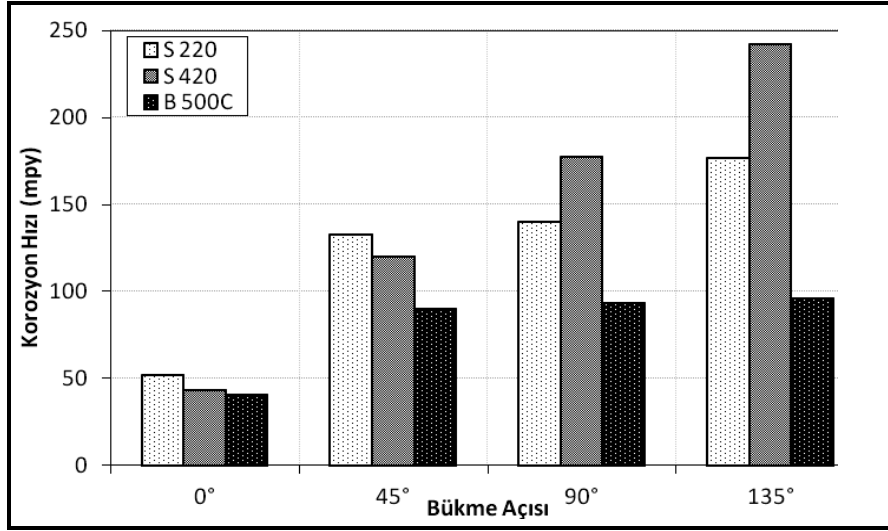
Şekil 4.9 Betonarme örneklerinin korozyon hızı.

Korozyon hızının düşük olması haliyle korozyon süresinin artmasına sebebiyet vermektedir. Bu sonuç Şekil 4.10'da verilen grafikte görülmektedir. Gerilim deformasyonun olmadığı seriler en uzun korozyon süresine sahip serilerdir. Burada UKB kullanıldığında korozyona uğrama süresi artmaktadır. Yine çelik sınıflarının yükselmesi de korozyon süresini arttırmaktadır. Donatıların deforme edilmesi ile birlikte korozyon süreleri yarı yarıya azalmaktadır. Fakat bu arada unutulmaması gereken bir diğer durum ise gerilime maruz kalmayan örneklerin nispeten beton örtü kalınlığı diğer örneklere göre daha fazladır ve bu da korozyon süresini arttırmaktadır.



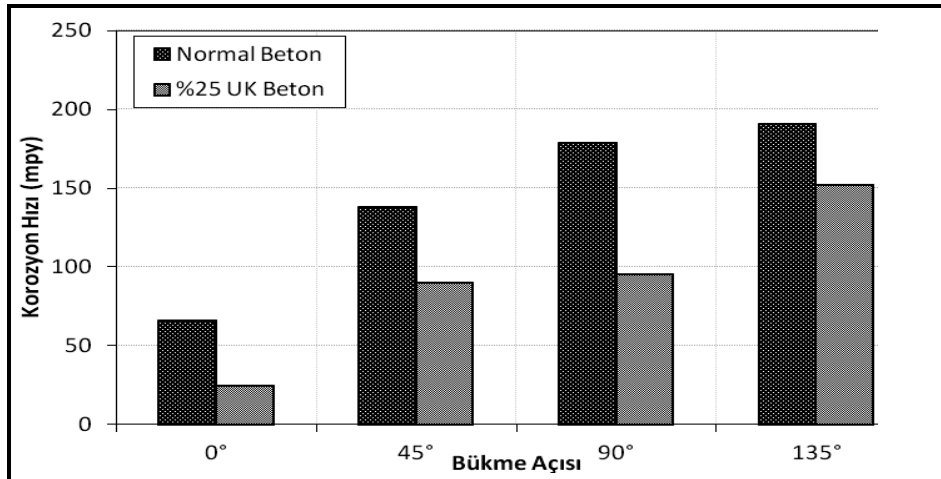
Şekil 4.10 Betonarme örneklerinin korozyon süresi.

Çelik sınıfına göre gerilim-korozyon hızı değişiminin verildiği Şekil 4.11 incelendiğinde bükme açısının dolayısıyla gerilmenin artışı korozyonu arttırmıştır. Çelik sınıfları açısından bükme açısının artması ile korozyon hızının artmasında en az etkilenen B500C sınıfı çelikler olmuştur. 0 ve 45°'de en yüksek korozyon hızı S220 sınıfı çeliklerdeyken gerilimin daha da arttığı 90 ve 135°'de en yüksek korozyon hızı S420 sınıfı çeliklerde meydana gelmiştir.



Şekil 4.11 Çelik sınıfına göre gerilim-korozyon hızı ilişkisi.

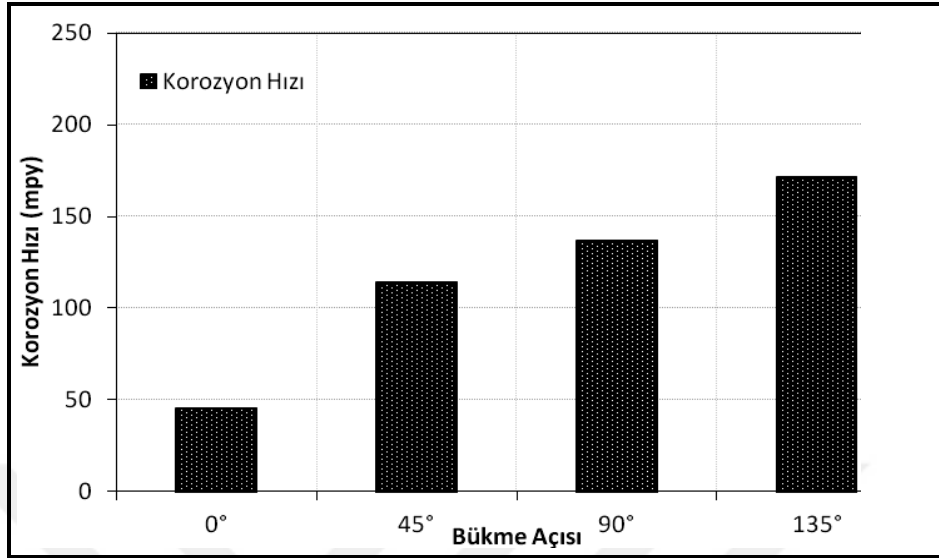
Beton çeşidine göre gerilim-korozyon hızı ilişkisinin verildiği Şekil 4.12 incelendiğinde tüm gerilme durumlarında NB serilerinin korozyon hızı UKB serilerine göre daha yüksektir. Gerilimin olmadığı deformesiz durumda beton çeşidi açısından korozyon hızında UKB serilerde NB serilerine kıyasla %62 oranında bir azalma söz konusudur. Bu fark bükme açısı arttıkça azalmaktadır. 135°'ye gelindiğinde aradaki fark orantısız olarak %20'ye kadar düşmektedir.



Şekil 4.12 Beton çeşidine göre gerilim-korozyon hızı ilişkisi.

Donatıların bükülerek soğuk olarak şekillendirilmesi sırasında oluşan gerilimin korozyon hızını artırıp arttırmadığına anlamak için tüm serilerden bağımsız olarak hesaplanan sonuçlar Şekil 4.13'deki grafikte verilmiştir. Buna göre donatıların bükme

açısı arttıkça korozyon hızı bariz bir şekilde artmaktadır.



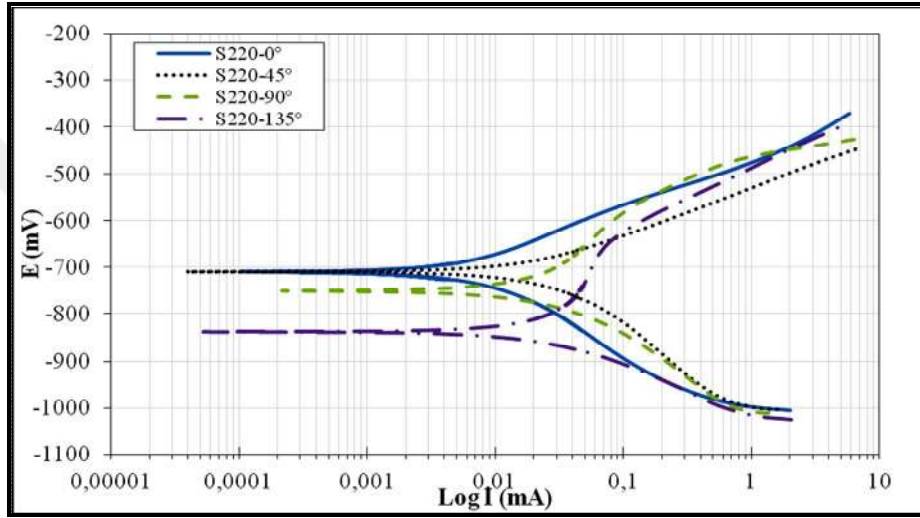
Şekil 4.13 Gerilim-korozyon hızı ilişkisi.

4.3 Elektrokimyasal Korozyon Sonuçları

Korozyona uğrayan metal için anodik ve katodik Tafel eğrileri deneysel olarak belirlenir. Bu eğrileri oluşturmak için, çalışılacak potansiyel aralığı korozyon hızının belirleneceği yöntemle göre seçilir. Korozyon potansiyelinden başlayarak katodik ya da anodik yönde çizilen yarı-logaritmik olan akım-potansiyel eğrileri Tafel eğimleri olarak bilinmektedir. Bu eğrilerin ekstrapolasyonu alındığında kesişen noktadaki potansiyel korozyon potansiyelini ve buna karşılık gelen akım ise korozyon akımını vermektedir (Revie and Uhlig 2008, Kayalı 2011).

Şekil 4.14’de S220 sınıfı düz çeliklerin gerilim durumlarına ait, elektrokimyasal korozyon deneyi sonucu elde edilen tafel eğrileri verilmiştir. Eğriler incelendiğinde gerilim durumunun artması ile birlikte tafel eğrileri katodik eksene doğru kaymıştır. Bu grafiğe bağlı olarak elde edilen korozyon parametreleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Bu çelik sınıfının gerilim durumuna göre korozyon akım yoğunluğu 7.8 ile 43.30 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında değişmektedir. Bu değişim, gerilim ile birlikte gelişmiş gerilim arttıkça korozyon akım yoğunluğu da artmıştır. Korozyon potansiyel değeri de -710 mV’dan gerilimin artmasıyla birlikte katodik davranış göstermiş ve -838 mV değerine kadar

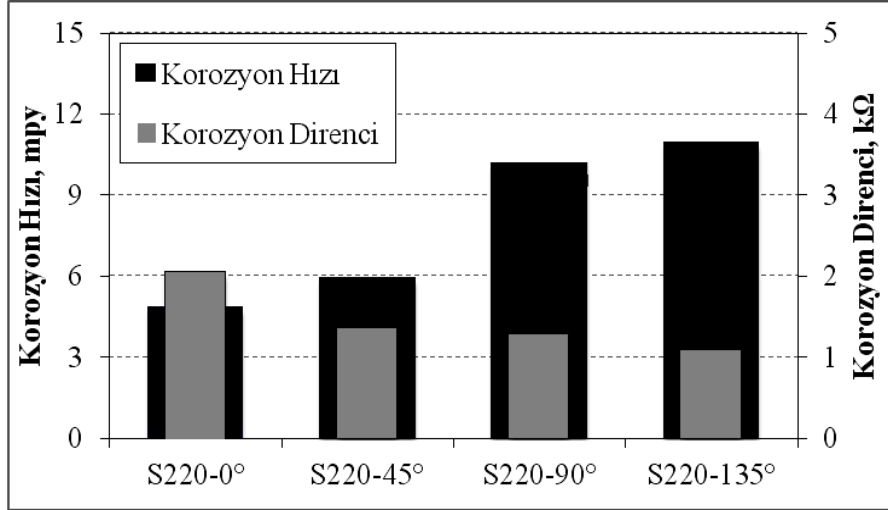
ulaşmıştır. Şekil 4.15’de S220 çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği verilmiştir. Doğal olarak korozyon direncinin azalması korozyon hızının artmasına sebebiyet verecektir. Bu ilişki bu grafikte de gözlenmektedir. Bükme açısına bağlı olarak artan gerilim sonucu S220 sınıfı çeliğin korozyon direnci 2.054 k Ω ’dan 1.08 k Ω değerine gerilemiş, bunun sonucunda gerilimsiz durumda 4.868 mpy olan korozyon hızı gerilimin artmasıyla 10.93 mpy değerine kadar yükselmiştir.



Şekil 4.14 S220 çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon grafiği.

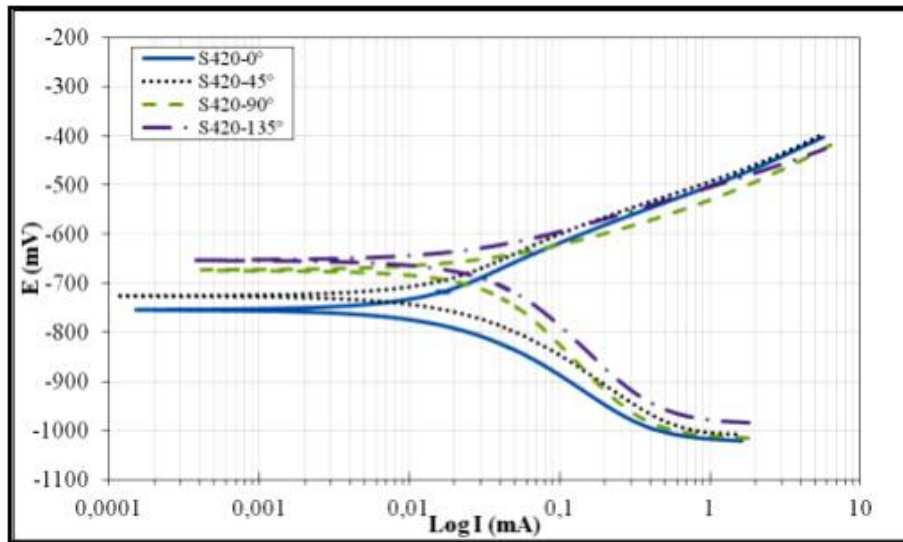
Çizelge 4.2 S220 çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon analizi ile elde edilen korozyon parametreleri.

Numune adı	β_a (mV/Dec)	β_c (mV/Dec)	$\dot{I}_{corr}$ ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (mV)	Korozyon hızı (mpy)	Chi Square	R_p k Ω
S220-0°	144.1	146.7	7.8	-710	4.87	4.45	2.05
S220-45°	117.0	165.6	23.6	-709	5.94	0.21	1.35
S220-90°	502.0	176.7	40.3	-751	10.18	0.19	1.26
S220-135°	776.1	135.3	43.3	-838	10.93	1.01	1.08



Şekil 4.15 S220 çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği.

Şekil 4.16'da S420 sınıfı nervürlü çeliklerin gerilim durumlarına ait, elektrokimyasal korozyon deneyi sonucu elde edilen tafel eğrileri verilmiştir. Eğriler incelendiğinde gerilim durumunun artması ile birlikte tafel eğrileri anodik eksene doğru kaymıştır. Bu grafiğe bağlı olarak elde edilen korozyon parametreleri Çizelge 4.3'de gösterilmiştir. Bu çelik sınıfının gerilim durumuna göre korozyon akım yoğunluğu 18.7 ile $31.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında değişmektedir. Bu değişim, gerilim ile birlikte gelişmiş gerilim arttıkça korozyon akım yoğunluğu da artmıştır. Korozyon potansiyel değeri de -755 mV'dan gerilimin artmasıyla birlikte anodik davranış göstermiş ve -653 mV değerine kadar ulaşmıştır.

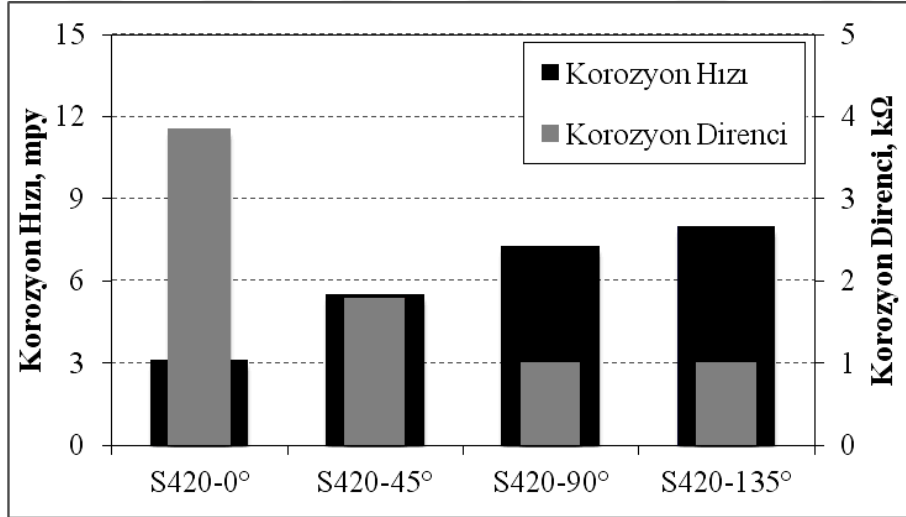


Şekil 4.16 S420 çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon grafiği.

Çizelge 4.3 S420 çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon analizi ile elde edilen korozyon parametreleri.

Numune adı	β_a (mV/Dec)	β_c (mV/Dec)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	E_{corr} (mV)	Korozyon hızı (mpy)	Chi Square	R_p k Ω
S420-0°	202.4	169.4	18.7	-755	3.11	0.61	3.84
S420-45°	197.7	161.5	21.1	-726	5.49	0.22	1.78
S420-90°	84.40	271.4	28.7	-674	7.24	0.22	1.00
S420-135°	100.8	258.1	31.5	-653	7.96	0.14	0.99

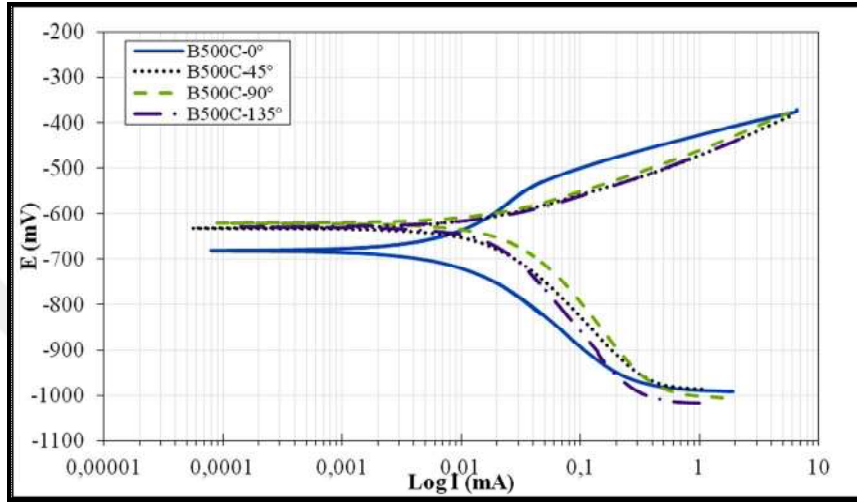
Şekil 4.17’de S420 çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği verilmiştir. Doğal olarak korozyon direncinin azalması korozyon hızının artmasına sebebiyet verecektir. Bu ilişki bu grafikte de gözlenmektedir. Bükme açısına bağlı olarak artan gerilim sonucu S420 sınıfı çeliğin korozyon direnci 3.841 k Ω ’dan 0.998 k Ω değerine gerilemiş bunun sonucunda gerilimsiz durumda 3.106 mpy olan korozyon hızı gerilimin artmasıyla 7.956 mpy değerine kadar yükselmiştir.



Şekil 4.17 S420 çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği.

Şekil 4.18’de B500C çelik sınıfının gerilim durumlarına ait, elektrokimyasal korozyon deneyi sonucu elde edilen tafel eğrileri verilmiştir. Eğriler incelendiğinde gerilim durumunun artması ile birlikte tafel eğrileri anodik eksene doğru kaymıştır. Bu grafiğe bağlı olarak elde edilen korozyon parametreleri Çizelge 4.4’te gösterilmiştir. Bu çelik

sınıfının gerilim durumuna göre korozyon akım yoğunluğu 13.0 ile 23.7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında değişmektedir. Bu değişim, gerilim ile birlikte gelişmiş gerilim arttıkça korozyon akım yoğunluğu da artmıştır. Korozyon potansiyel değeri de -681 mV'dan gerilimin artmasıyla birlikte anodik davranış göstermiş ve -621 mV değerine kadar ulaşmıştır.

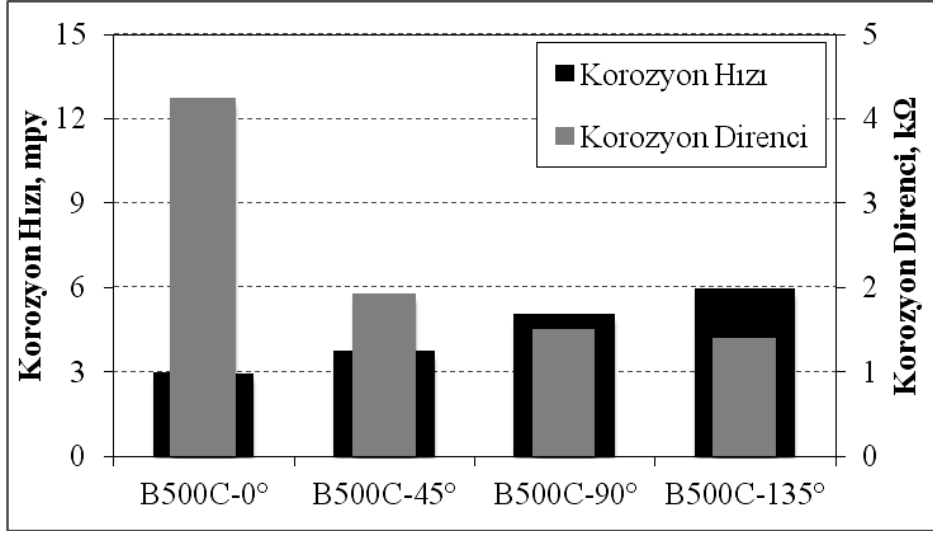


Şekil 4.18 B500C çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon grafiği.

Çizelge 4.4 B500C çelik sınıfının bükme açısına göre Tafel polarizasyon analizi ile elde edilen korozyon parametreleri.

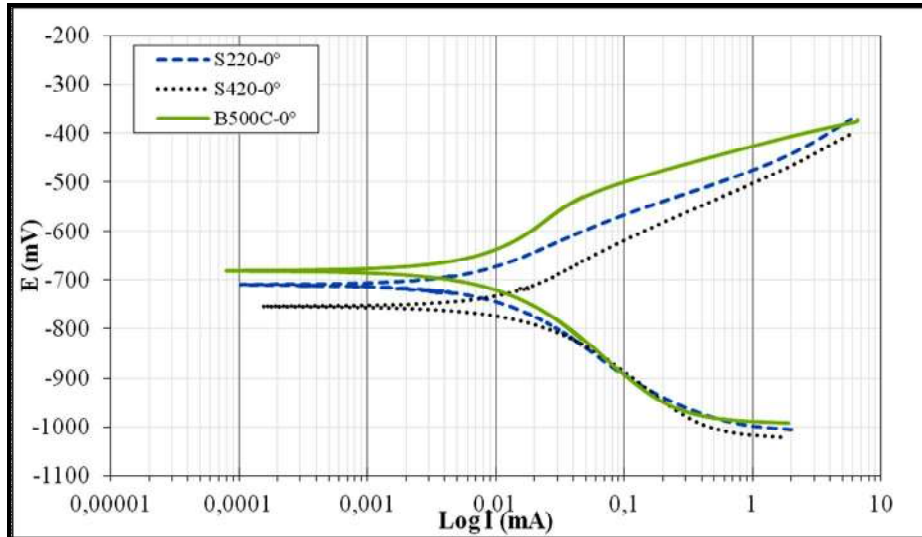
Numune adı	β_a (mV/Dec)	β_c (mV/Dec)	$\dot{I}_{corr}$ ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_{corr} (mV)	Korozyon hızı (mpy)	Chi Square	R_p k Ω
B500C-0°	295.1	225.3	13.0	-681	2.91	0.12	4.24
B500C-45°	87.20	216.5	14.7	-633	3.70	0.12	1.91
B500C-90°	89.10	339.8	19.9	-629	5.01	0.15	1.50
B500C-135°	102.6	266.0	23.7	-621	5.95	0.14	1.39

Şekil 4.19'da B500C çelik sınıfının bükme açılara göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği verilmiştir. Doğal olarak korozyon direncinin azalması korozyon hızının artmasına sebebiyet verecektir. Bu ilişki bu grafikte de gözlenmektedir. Bükme açısına bağlı olarak artan gerilim sonucu B500C sınıfı çeliğin korozyon direnci 4.235 k Ω 'dan 1.388 k Ω değerine gerilemiş bunun sonucunda gerilimsiz durumda 2.914 mpy olan korozyon hızı gerilimin artmasıyla 5.945 mpy değerine kadar yükselmiştir.

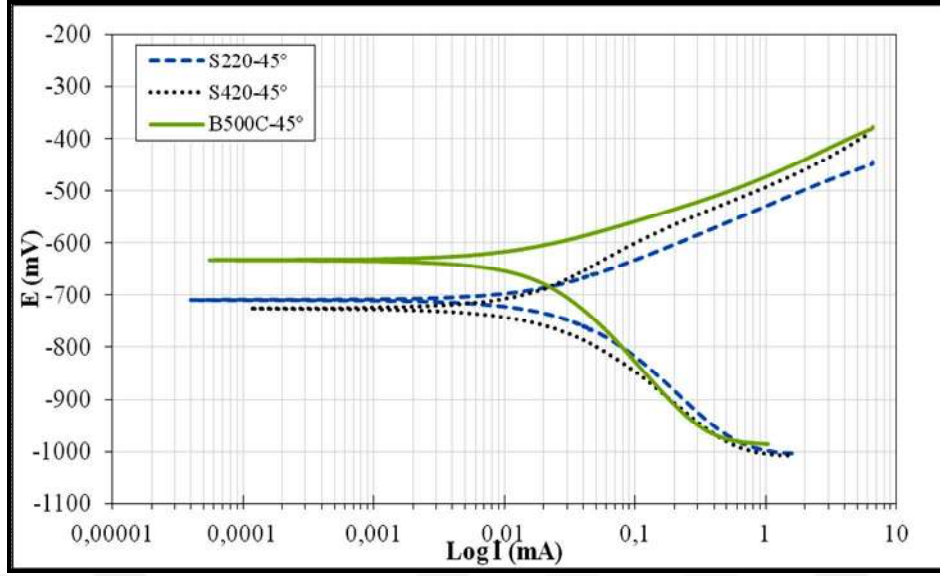


Şekil 4.19 B500C çelik sınıfının bükme açılarına göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği.

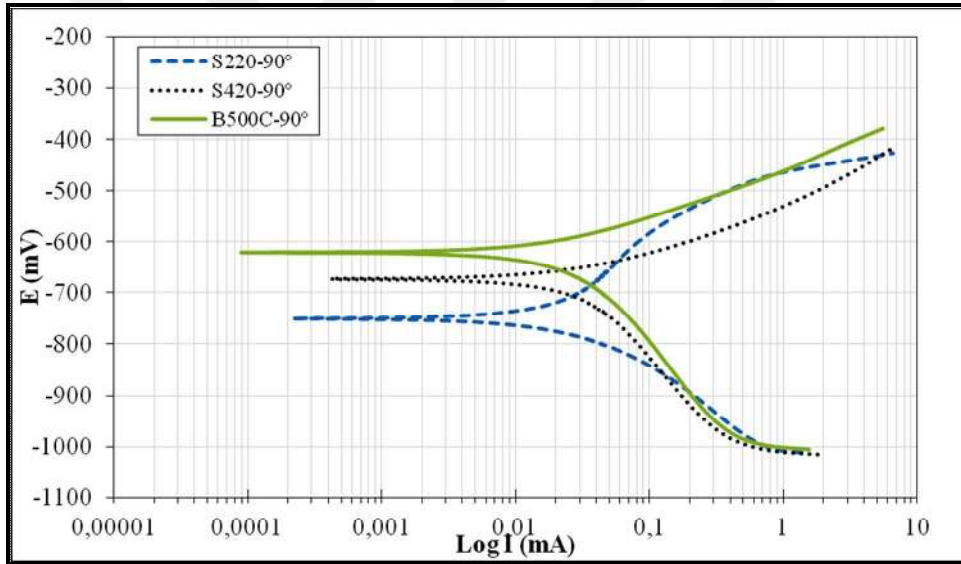
Şekil 4.20 ile 4.23 arasında çelik sınıfları bükme açısına göre oluşan gerilim durumlarının korozyon davranışı sonucu elde edilen tafel eğrileri verilmiştir. Şekil 4.20’de bükülmemiş donatıların tafel eğrilerine bakıldığında anot eksenine en yakın olan çelik sınıfı B500C iken katot eksene en yakın olan S420 sınıfı çeliğe aittir. Bükme açısının artması ile artan gerilimin neticesinde başlangıça oranla en çok etkilenen S220 sınıfı çelikler olmuştur. Gerilimin artmasıyla birlikte S220 çelik sınıfı katot eksene doğru kaymıştır.



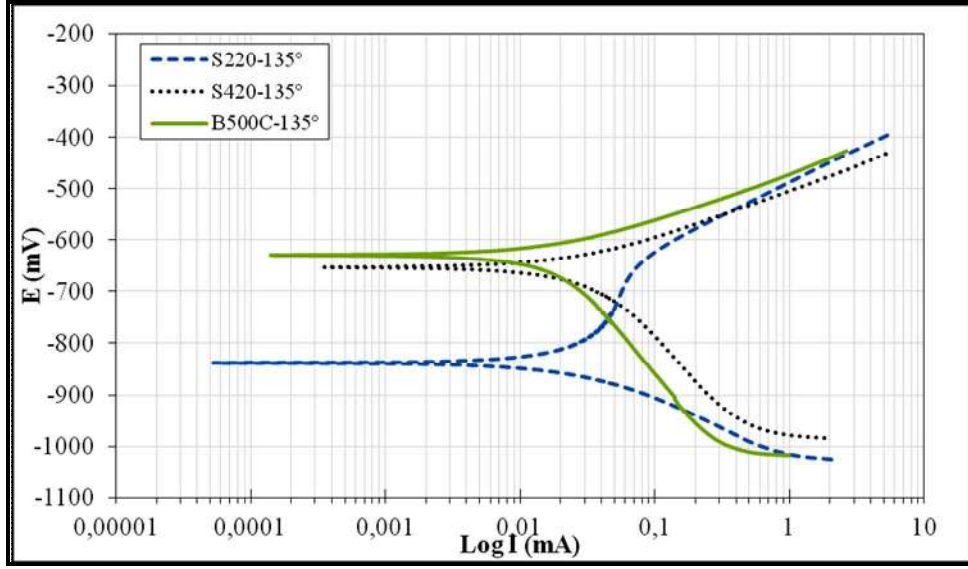
Şekil 4.20 Çelik sınıfının bükülerek deforme edilmemiş duruma göre Tafel polarizasyon grafiği.



Şekil 4.21 Çelik sınıfının 45° bükme duruma göre Tafel polarizasyon grafiği.

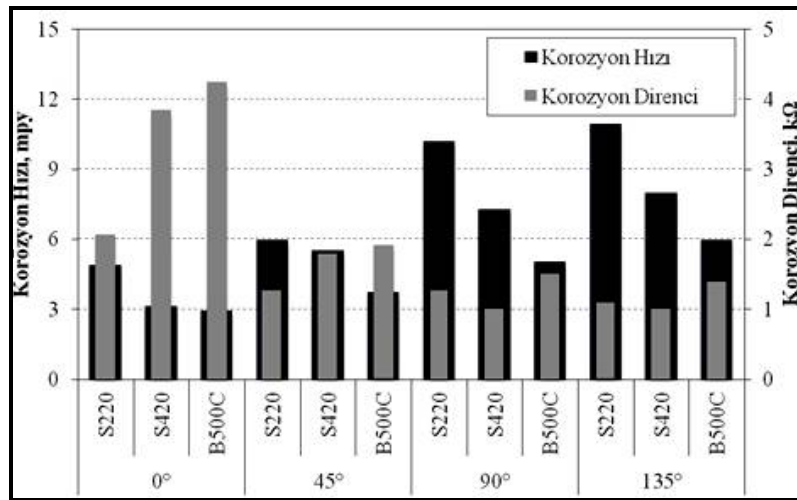


Şekil 4.22 Çelik sınıfının 90° bükme duruma göre Tafel polarizasyon grafiği.



Şekil 4.23 Çelik sınıfının 135° bükme duruma göre Tafel polarizasyon grafiği.

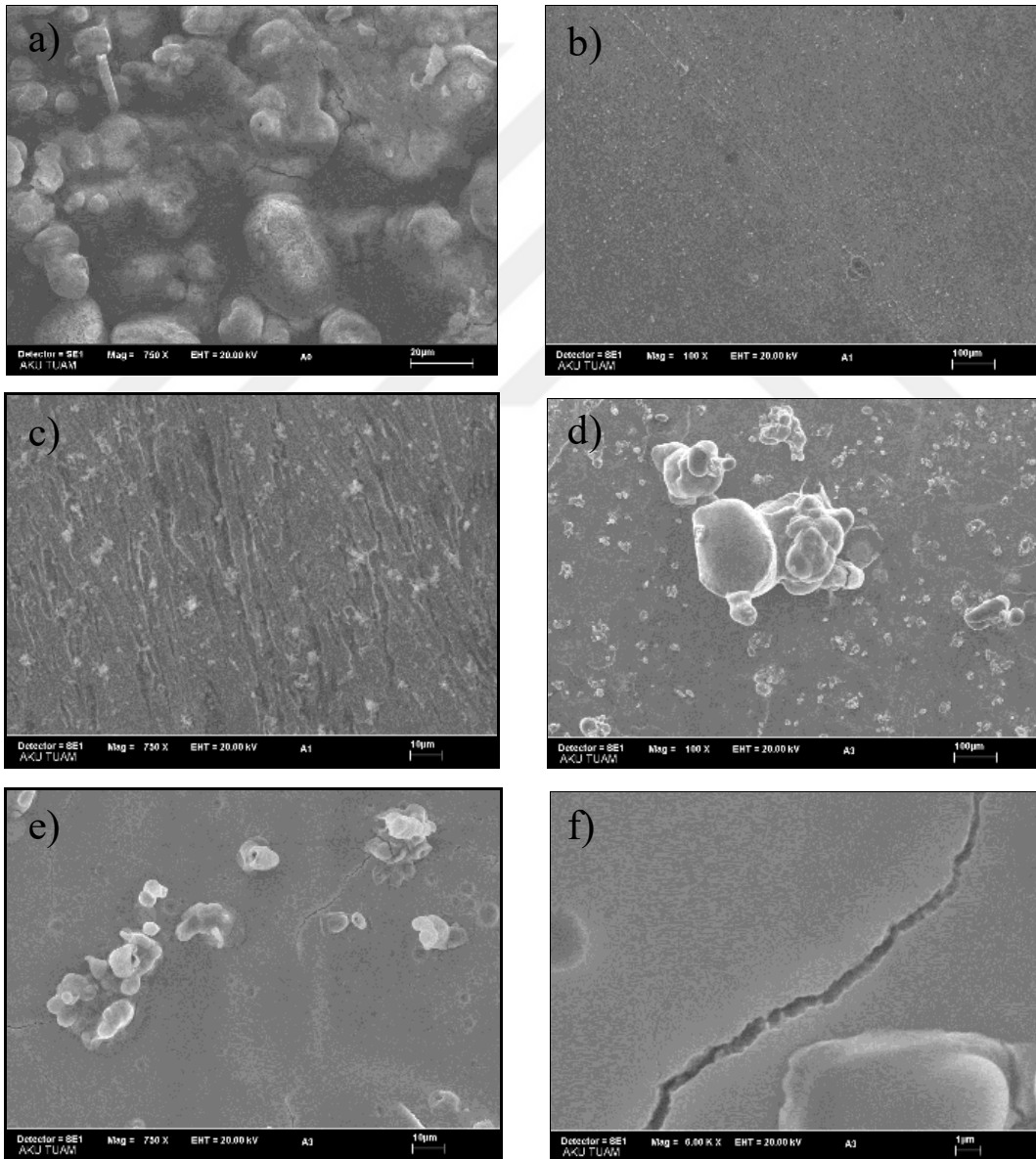
Şekil 4.24'de çelik sınıfının bükme açılara göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği verilmiştir. Korozyon direnci bükme açısının artmasıyla birlikte azalmaktadır. Bununla birlikte korozyon hızı da bükme açısı büyüdükçe artmıştır. Donatılar bükülmeden önce korozyon dirençleri 2-4 k Ω civarında iken bükme açısının artması ve dolayısıyla gerilimin artmasıyla birlikte 1 k Ω seviyelerine kadar gerilemiştir. Korozyon hızlarındaki değişimlere bakıldığında en yüksek korozyon hızı tüm gerilme durumlarında S220 düz çelik sınıfına aittir. Ardından S420 nervürlü çelik gelmektedir. Tüm gerilme durumlarında en yavaş korozyon hızı B500C nervürlü tempcore çeliğe aittir.



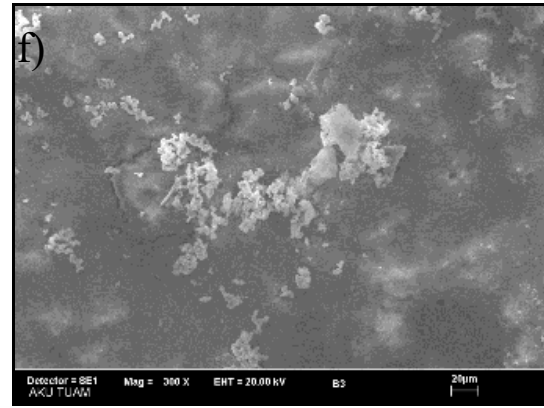
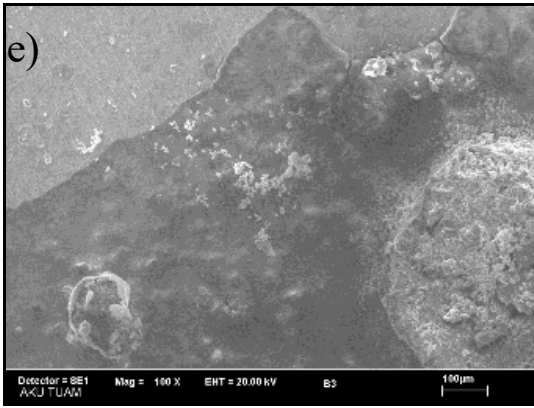
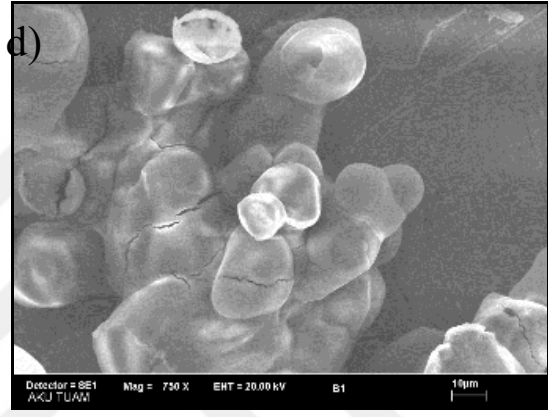
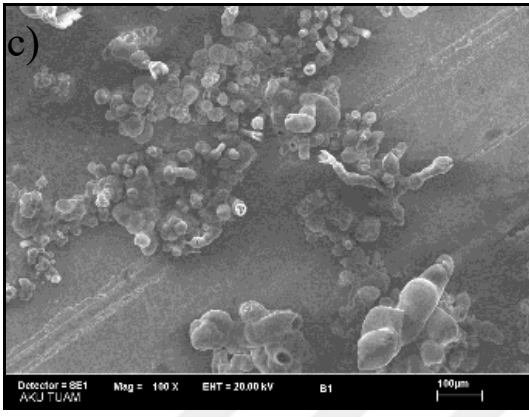
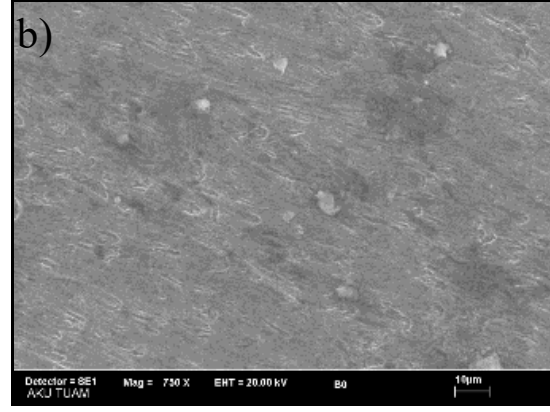
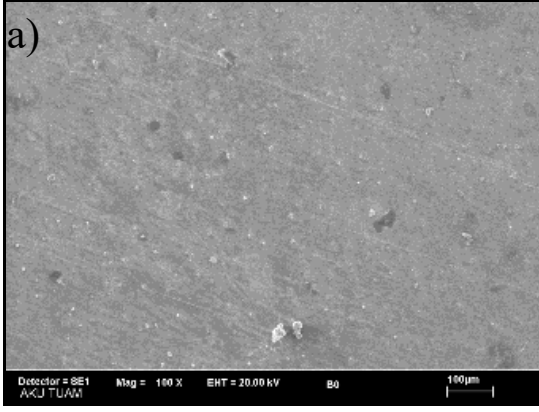
Şekil 4.24 Çelik sınıfının bükme açılara göre korozyon hızı-korozyon direnci grafiği.

4.4 SEM Analizi Sonuçları

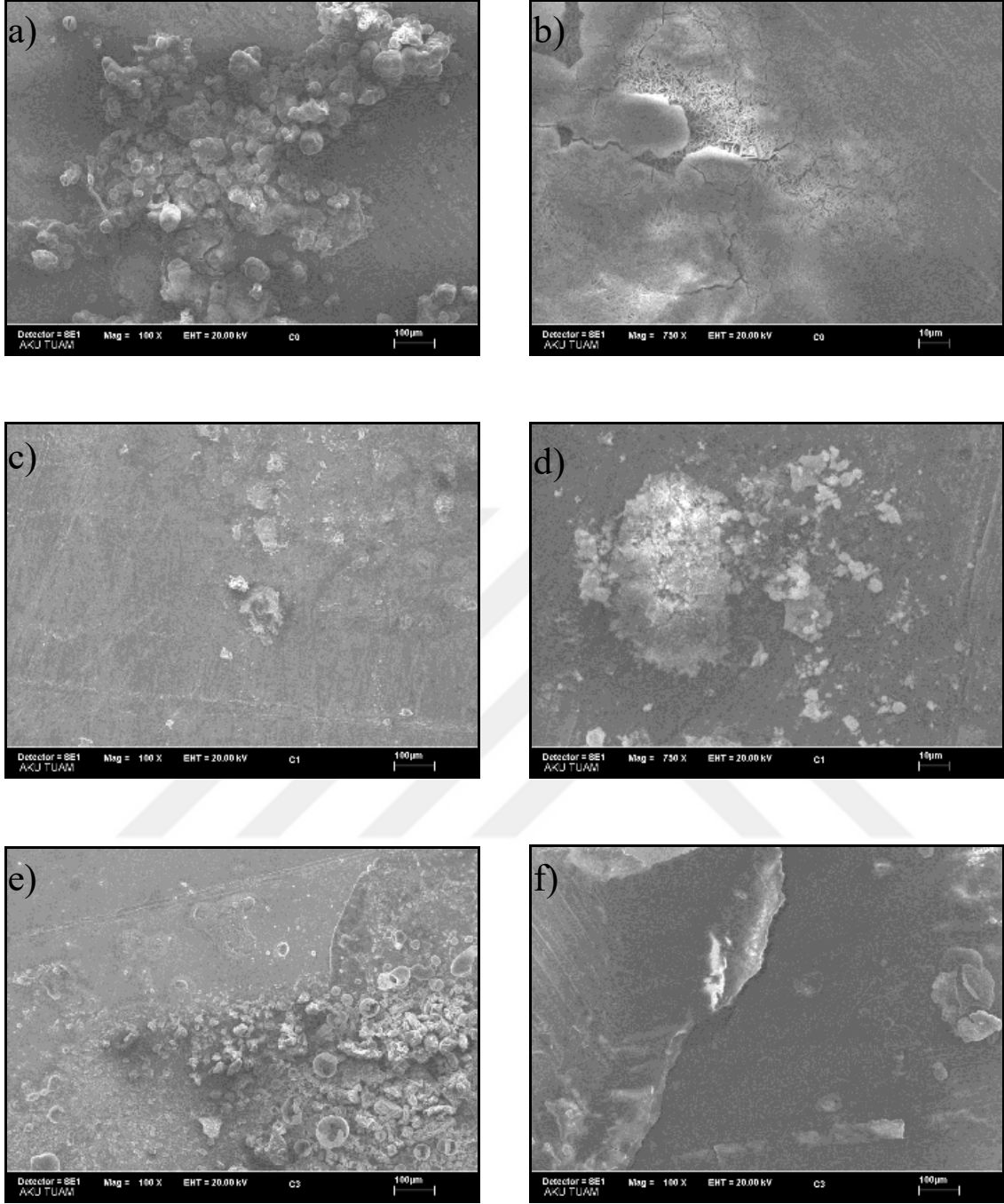
S220, S420 ve B500C sınıfı betonarme çeliklerinin gerilim ve korozyon sonrası oluşan değişimlerin SEM görüntüleri Şekil 4.25-4.27’de verilmiştir. Çelik kesit yüzeyinde oluşan korozyon ve klorür tabakaları görülmektedir. Bunun yanında korozyon tabakasında oluşan gerilmeler sonucunda çatlamlarda bu görüntülerde belirlenmiştir. Şekillerde a ve b bükülmemiş donatı üzerindeki korozyon halini, c ve d 45° bükülmüş donatı üzerindeki korozyon halini, e ve f görüntüleri 135° bükülmüş donatı üzerindeki korozyon halini göstermektedir.



Şekil 4.25 S220 sınıfı betonarme çeliklerine ait korozyon sonrası SEM görüntüleri.



Şekil 4.26 S420 sınıfı betonarme çeliklerine ait korozyon sonrası SEM görüntüleri.

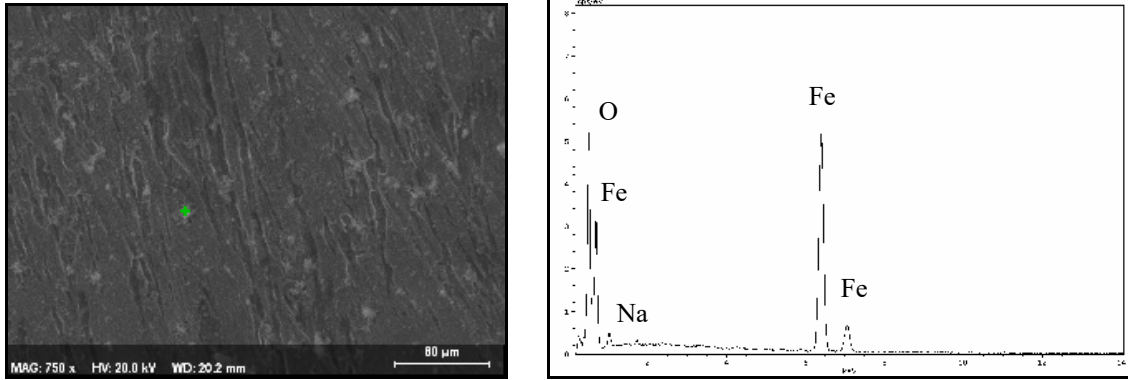


Şekil 4.27 B500C sınıfı betonarme çeliklerine ait korozyon sonrası SEM görüntüleri.

4.5 EDX Analizi Sonuçları

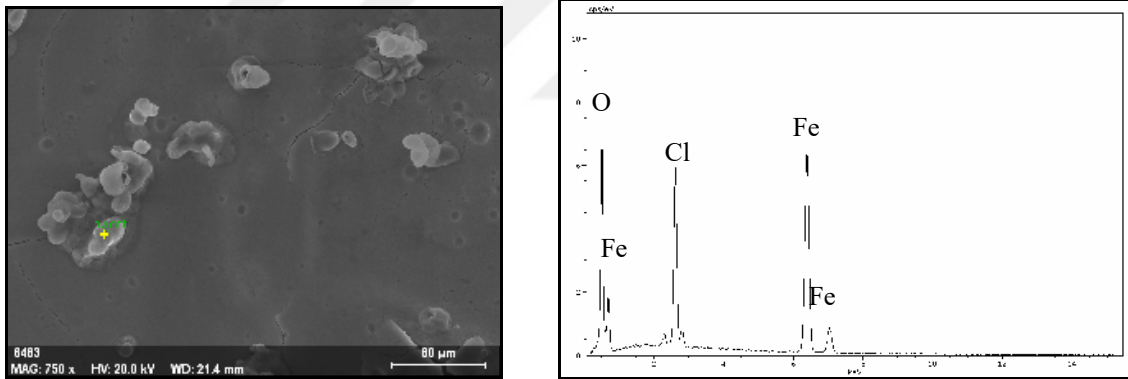
EDX analizi sonucunda korozyona uğrayan numuneler üzerinde elde edilen veriler incelendiğinde Şekil 4.28’de S220 sınıfı çeliğin 45° bükülmüş durumda korozyon deneyi sonrası SEM görüntüsü üzerindeki işaretçinin olduğu noktada %66.03 oksijen,

%30.66 demir ve %3.31 sodyum tespit edilmiştir.



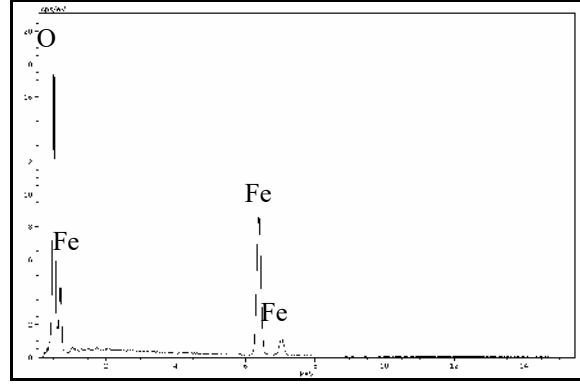
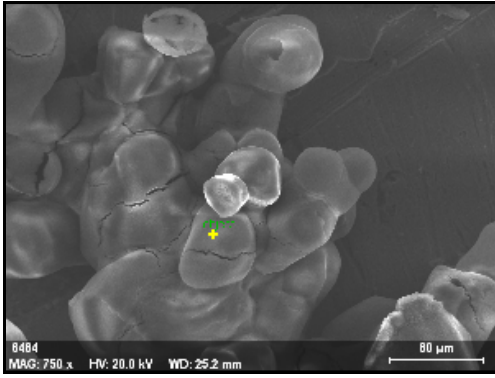
Şekil 4.28 S220 sınıfı çeliğin 45° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi.

Şekil 4.29'da S220 sınıfı çeliğin 135° bükülmüş durumda korozyon deneyi sonrası SEM görüntüsü üzerindeki işaretçinin olduğu noktada %65.27 oksijen, %26.08 demir ve %8.64 klorür tespit edilmiştir.



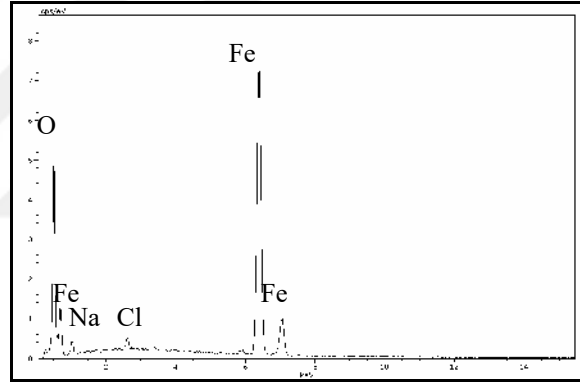
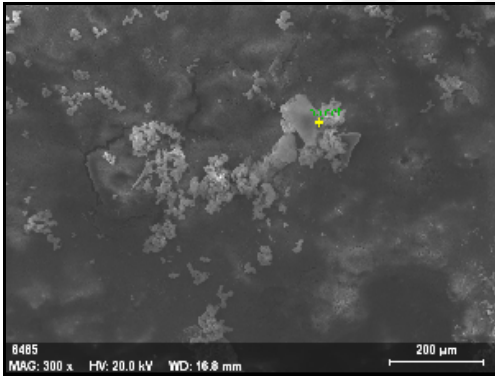
Şekil 4.29 S220 sınıfı çeliğin 135° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi.

Şekil 4.30'da S420 sınıfı çeliğin 45° bükülmüş durumda korozyon deneyi sonrası SEM görüntüsü üzerindeki işaretçinin olduğu noktada %78.40 oksijen ve %21.60 demir tespit edilmiştir.



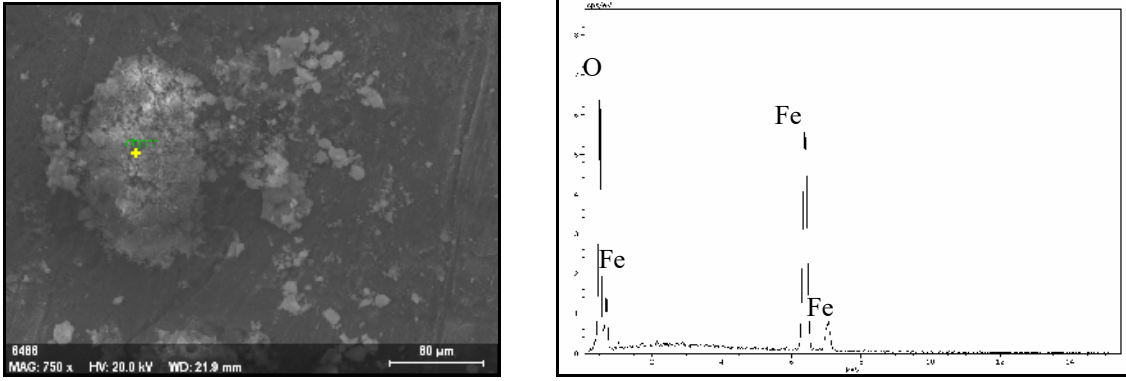
Şekil 4.30 S420 sınıfı çeliğin 45° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi.

Şekil 4.31’de S420 sınıfı çeliğin 135° bükülmüş durumda korozyon deneyi sonrası SEM görüntüsü üzerindeki işaretçinin olduğu noktada %57.99 oksijen, %36.45 demir, %5.02 sodyum ve %0.54 klorür tespit edilmiştir.



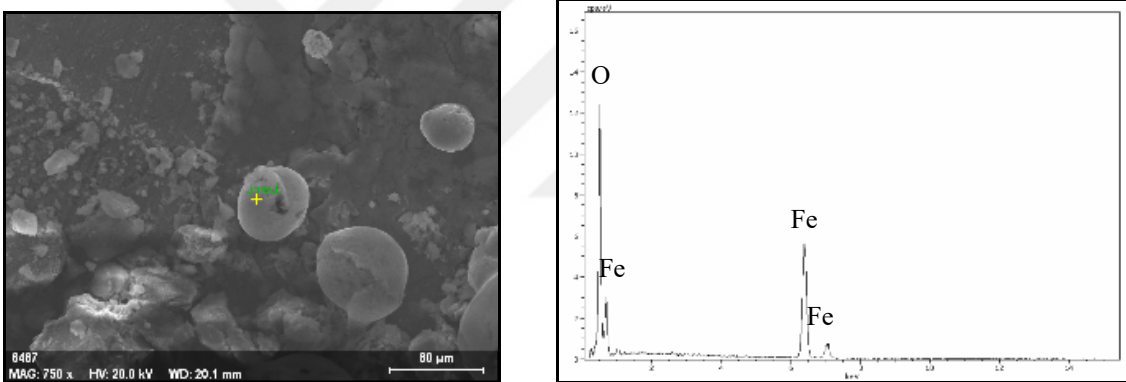
Şekil 4.31 S420 sınıfı çeliğin 135° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi.

Şekil 4.32’de B500C sınıfı çeliğin 45° bükülmüş durumda korozyon deneyi sonrası SEM görüntüsü üzerindeki işaretçinin olduğu noktada %73.40 oksijen ve %26.60 demir tespit edilmiştir.



Şekil 4.32 B500C sınıfı çeliğin 45° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi.

Şekil 4.33’de B500C sınıfı çeliğin 135° bükülmüş durumda korozyon deneyi sonrası SEM görüntüsü üzerindeki işaretçinin olduğu noktada %77.79 oksijen %22.21 demir tespit edilmiştir.



Şekil 4.33 B500C sınıfı çeliğin 135° bükülmüş yüzeyinin korozyon deneyi sonrası EDX analizi.

4.6 Korozyon Deneyi Sonrası Görüntüler

Resim 4.1’de betonarme elemanlarının hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası beton yüzeyinin çatlaması ve bu çatlak üzerinden korozyon mekanizmasını ilerleyerek pas kusması gösterilmektedir. Resim 4.2’de beton içerisinden çıkartılan donatıların temizlenmesi ve Resim 4.3’de ağırlık kaybının belirlenmesinde kullanılan bazı örnekler verilmiştir.



Resim 4.1 Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası bir numune.



Resim 4.2 Beton içerisinden çıkartılan donatıların beton ve pasdan temizlenmesi.



Resim 4.3 Korozyon deneyi sonrası donatı numune örnekleri.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı betonarme çeliklerinin gerilim korozyonlarının araştırıldığı bu çalışmada;

- Normal beton ve %25 uçucu kül katkılı iki beton çeşidinin kullanıldığı serilerde, uçucu kül katkısının korozyon oluşumuna karşı olumlu katkılar sağladığı gözlenmiştir. Yapılan deneylerin sonucuna göre uçucu kül katkılı betonların elektriksel direncinin normal betona göre yüksek ve klorür geçirimsizliğinin ise normal betona göre düşük olduğu belirlenmiştir. Bu özelliklerin hem normal hem de uçucu kül katkılı betonlarda kür süresine bağlı olarak olumlu yönde geliştiği, kür süresi uzadıkça klorür geçişinin azaldığı ve elektriksel direncin arttığı ölçülmüştür.
- Beton ve çeliğin bir arada kullanıldığı hızlandırılmış korozyon deneylerine göre; başlangıç korozyon akımı bükme açısının artması ile birlikte normal beton içerisindeki çeliklerde artış göstermiş, uçucu kül katkılı beton içerisindeki çeliklerde ise en büyük bükme açısına ulaşıldığında artış meydana gelmiştir. Ortalama korozyon akımında ise bükme açısı arttıkça her iki beton içerisindeki çeliklerde artış meydana gelmiştir. Korozyon hızı çeliklerin bükülmesi ile artış göstermiş ve bükme açısının artması ile korozyon hızı da artmıştır. Korozyon süresi gerilimsiz durumdaki çeliklere göre iki kat daha uzundur. Korozyon hızı en düşük olan çelik sınıfı tüm bükme açılarında B500C dir. Korozyon hızı en düşük olan beton ise tüm bükme açılarında %25 uçucu kül katkılı betondur. Beton ve çelik sınıfından bağımsız olarak gerilme durumuna göre korozyon hızının, gerilimsiz durumda 45 mpy, 45° büküldüğünde 114 mpy, 90° büküldüğünde 137 mpy, 135° büküldüğünde ise 171 mpy olmak üzere değişim gösterdiği belirlenmiştir.
- Çelikler üzerinde yapılan elektrokimyasal korozyon sonuçlarına göre; S220 sınıfı çeliklerde bükme açısının artması ile korozyon potansiyeli katodik eksene doğru kaymıştır. Bükme açısının artması ile birlikte korozyon direnci azalmış ve korozyon hızı artmıştır. S420 ve B500C çeliklerinde ise bükme açısı arttıkça korozyon potansiyeli anodik eksene doğru kaymıştır. Bu çelik sınıflarında da

bükme açısının artışı korozyon direncini azaltmış ve korozyon hızını arttırmıştır. Tüm bükme durumlarına göre çelik sınıfları kıyaslandığında en yüksek korozyon direnci ve en düşük korozyon hızını sergileyen B500C'dir.

- Gerek çelikler üzerinde yapılan elektrokimyasal korozyon, gerekse beton içerisindeki çelik üzerinde yapılan hızlandırılmış korozyon deneyleri göstermiştir ki betonarme elemanların içerisinde kullanılan çeliklerin şekillendirilmesinde bükme işlemi korozyon oluşumunda etkili olmaktadır. Bükme açısının artması korozyon hızını da arttırmaktadır. Bu duruma karşı alınabilecek ve ilave masraf gerektirmeyecek önlemler olarak B500C sınıfı çelik kullanmak ve/veya uçucu kül katkılı beton kullanmak önerilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Akman M. S., (1992). Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi. İTÜ Yayınları. İstanbul.
- Alekseev S. N., (1993). Corrosion of Steel Reinforcement, in Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Media. Eds. Mallick, S.K. & Majithia, M., Balkema Publishers. Brookfield.
- Altıneller M., (2008). Betonarme Yapı Elemanlarında Donatı Düzenleme İlkeleri. Sonbahar-Kış Dönemi Meslek İçi Eğitim Kursları.
- ASTM C 1202, (1997). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Society for Testing and Materials. U.S.A.
- ASTM C618-08a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society for Testing and Materials. United States.
- Baradan B., Yazıcı H., Ün H., (2002). Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları. İzmir.
- Boğa A. R., (2005). Uçucu Küllü Betonarme Elemanlarda Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Yöntemlerle Araştırılması. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Boğa A. R., Topçu İ. B., (2012). Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, **31**:258-264.
- Boğa A. R., Topçu İ. B., Öztürk M., (2012). Effect of Fly-Ash Amount and Cement Type on the Corrosion Performance of the Steel Embedded in Concrete. *Materiali in Tehnologije*, **5**:46-511.
- Bülbül Ş., (2009). Yüksek Alaşımlı Çeliklerin %10 H₂SO₄ ve %10 HCl Çözeltileri İçerisindeki Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Celep Z., ve Kumbasar N., (2001). Betonarme Yapılar. Rehber Matbaacılık. İstanbul.
- Choi Y.S., Kim J.G., Lee K.M., (2006). Corrosion Behaviour of Steel Bar Embedded in Fly Ash Concrete. *Corrosion Science*, **48**:1733-1745.

- Çakır A. F., (1997). Betonarme Yapılarda ve İnce Sert Seramik Kaplı Metal Yüzeylerinde Korozyon Kontrolü. 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 11-15 Haziran 1997. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çınar H., (2011). Betonarme Yapılarda Kullanılan Çelik Donatının Sinyal İletiminde Kullanımına Yönelik El Verişlilik Araştırması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Çil İ., (2006). Betonarme Donatısında Elektriksel Yöntemlerle Korozyon Ölçümü (Corrosion Measurement of Rebars by Electrical Methods). Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Sayı: 1., İzmir.
- Çolak E., (2010). İyon Nitrürlenmiş AISI 5140 Çeliğinin Korozyon Davranışının İncelenmesi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Çorbacıoğlu U. C., (2008). Beton Karışım Tasarımının Geçirimliliğe ve Mekanik Özelliklere Etkisi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- DBYBHY, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- Doğan Ü.A., (2008). Beton Birleşim Parametrelerinin Geçirimlilik Özellikleri ve Gömülü Çelik Donatı Korozyonuna Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Doruk M., (1982). Korozyon ve Önlenmesi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, Ankara.
- Eker A., (2009). Korozyon Mekanizmaları. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ekinci E. C., (2005). Bordo Kitap. Üniversite Kitabevi, Elazığ.
- Erbil M., (1984). Korozyon I. Segem, Ankara.
- Erdoğan Ş., (2003). Betonda Donatı Korozyonu-Ölçümü ve İrdelenmesinde Yaygın Olarak Kullanılan Yöntemler ve Teknikler. 5.Ulusal Beton Kongresi.
- Ersoy U., ve Özcebe G., (2004). Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap. Evrim Matbaası, İstanbul.
- Eryürek İ. B., (1993). Hasar Analizi. İTÜ Makine Fakültesi.
- Feng X., Lu X., Zuo Y., Zhuang N., Chen D., (2015). Electrochemical study the corrosion behaviour of carbon steel in mortars under compressive and tensile stresses. *Corrosion Science*, **103**:66-74.

- Gel M. K., (2003). Betonarme Yapılarda Donatıların Korozyonu ve Su Yalıtımı. Türkiye Mühendislik Haberleri.
- Ghaffari P., (2013). Seismic Rehabilitatiton of Columns with Corroded Reinforcing Bars through Practical Interventions. İstanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology , M.Sc. Thesis, İstanbul.
- Gilbert P.T., Shreir L.L., Jarman R.A., Burstein G.T. (Eds.), (1995). Corrosion: Metal/Environment Reaction. third ed., Butterworth-Heinemann Ltd. Linacre House, Jorden Hill, Oxford OX2 8DP.
- Gönen T., (2009). Kendiliğinden Yerleşen Taşıyıcı Hafif Betonun Mekaniksel ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ.
- Görür E. B., (2007). Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Durabilite Özellikleri. Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş.
- Güneyisi E., Özturan T., and Gesoğlu M., (2005). A Study on Reinforcement Corrosion and Related Properties of Plain and Blended Cement Concretes Under Different Curing Conditions. *Cement and Concrete Composites*, **27**:449-461.
- Gürü M., Yalçın H., (2004). Malzeme Bilgisi. Palme Yayıncılık, Ankara, 173-190.
- Haberal Y., (2010). Uçucu Küllü Betonlarda Klor İyonu Geçirgenliğinin ve Donatı Korozyonunun İncelenmesi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- İnci P., (2011). Donatı Korozyonunun Betonarme Yapıların Deprem Performansına Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Jayaraman A., (1999). Axaenic Aerobic Biofilms Inhibit Corrosion of Copper and Aluminum. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **52**: 787-790.
- Jiang L., Liu Z., and Ye Y., (2004). Durability of Concrete Incorporating Large Volumes of Low-Quality Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, **34**:1467-1469.
- Jones D.A., (1996). Principles and Prevention of Corrosion. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

- Kaftan M. A., (2006). Çelik Yapılarda Korozyon Oluşumu ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Kaplan H., Tama Y.S., Ün H., Akyol E., ve Yılmaz S., (2005). Datça Turistik Oteli (Datça Öğretmen Evi) Depremsellik İnceleme Raporu. Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli.
- Kaplan S. A., (2009). Betonarme'ye Giriş. Bilbeyki Yayınları.
- Kayalı Y., (2011). Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Afyonkarahisar.
- Kumbasar N., (2003). Betonarme Elemanlarda Donatı Düzenleme. İMO Seminer Notları, İstanbul.
- Kumru N., (2004). Metalik Malzemelerde Gerilim Korozyonu. Soma Meslek Yüksek Okulu Teknik Bilimler Dergisi, Sayı: 2.
- Kurt E. B., (2007). Silis Dumanının Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Kürklü G., (2005). Mevcut Betonarme Yapıların Deprem Güvenliğinin İncelenmesindeki Teknikler ve Beton Dayanımının Belirlenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- Kürklü G., (2011). Korozyon ve Yüksek Sıcaklık Durumunun Betonarme Çeliklerinin Fiziko-Mekanik Özelliklerine Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Afyonkarahisar.
- Kürklü G., (2014). Metallerde Korozyon Mekanizması ve Hasarları Ders Notu. Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Mailvaganam N. P., (1992). Repair and Protection of Concrete Structures. Chapman & Hall, London.
- Mancini G., Tondolo F., Iuliano L., Minetola P., (2014). Local reinforcing bar damage in r.c. members due to accelerated corrosion and loading. *Construction and Building Materials*, **69**:116-123.
- MEB (Milli Eğitim Bakanlığı), (2011). İnşaat Teknolojisi Donatı Elemanları Çizimi. Ankara.

- MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), (2009). Korozyon ve Katodik Koruma. Kimya Teknolojisi. Ankara.
- Mercan N., (2007). Uçucu Kül Katkısıyla Üretilen Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının Araştırılması. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Miletic S., Ilic M., Ranogajec J., Djuric M., (1997). Fly Ash Useful Material for Preventing Concrete Corrosion. *Studies in Environmental Science*.
- Montemor M. F., Simoes A. M. P., Salta M. M., (2000). Effect of Fly Ash on Concrete Reinforcement Corrosion Studied by EIS. *Cement and Concrete Composites*, **22**:175-185.
- Muralidharan S., Saraswathy V., Merlin Nima S. P., Palaniswamy N., (2004). Evaluation of a composite corrosion inhibiting admixtures and its performance in portland pozzolana cement. *Materials Chemistry and Physics*, **86**:298-306.
- Muthulingam S., Rao B. N., (2015). Non-uniform corrosion states of rebar in concrete under chloride environment. *Corrosion Science*, **93**:267-282.
- Ngala V.T., Page C. L., Page M. M., (2002). Corrosion Inhibitor Systems for Remedial Treatment of Reinforced Concrete. *Corrosion Science*, **44**:2073-2087.
- Niş A., (2011). Investigation of rebar corrosion in plain and steel fiber reinforced concrete under static and dynamic loading. Boğaziçi University, Master of Science, İstanbul.
- Odabaşı T., (2007). Katodik Koruma Sisteminin Tanıtımı. Botaş BTC Proje Direktörlüğü CMT İnşaatı.
- Onaran K., (2006). Malzeme Bilimi. Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Ormellese M., Lazzari L., Goidanich S., Fumagalli G., Brenna A., (2009). A Study of Organic Substances as Inhibitors for Chloride-Induced Corrosion in Concrete. *Corrosion Science*, **51**:2959-2968.
- Özbaş M., (1997). Uygun Tasarım ve Metal Seçimi ile Korozyondan Korunma. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Özgen M. M., (2006). Betonarme Yapılarda Bozulma Süreçleri ve Beton Sınıfının Yapının Durabilitesine ve Maliyetine Etkileri. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- Özkul H., Taşdemir M. A., Tokyay M., Uyan M., (2004). Meslek Liseleri İçin Her Yönüyle Beton. Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Öztekin E., (2001). Donatı Korozyonuna Karşı C30 Kullanımı. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Aylık Yayın Organı, Bülten Sayı **55**, İstanbul.
- Patil S., Karkare B., Goyal S., (2014). Acoustic emission vis-a-vis electrochemical techniques for corrosion monitoring of reinforced concrete element. *Construction and Building Materials*, **68**:326-332.
- Pürsünlü Ö., (2013). Effect of Cold Bonded and Sintered Fly Ash Lightweight Aggregates on Permeability and Corrosion Behavior of Concrete. University of Gaziantep, Civil Engineering, M.Sc. Thesis, Gaziantep.
- Revie R.W., and Uhlig H.H., (2008). Corrosion and Corrosion control. Hoboken New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc.
- Roberge P. R., (2000). Handbook of Corrosion Engineering. The McGraw-Hill Companies Publishing, New York.
- San N. O., (2012). Aerobik Bakterilerin Nikel Alaşımlarının Korozyonuna Etkisinin Araştırılması. Ankara Üniversitesi, Ankara Üniversitesi Biyoteknoloji Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Saran A. G., (2007). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Saraswathy V., Muralidharan S., Thangavel K., Srinivasan S., (2002). Influence of Activated Fly Ash on Corrosion-Resistance and Strength of Concrete. *Cement & Concrete Composites*, **25**:673-680.
- Schweitzer P. A., (1996). Corrosion Engineering Handbook. Marcel Dekker Pres, USA.
- Shi X., Yang Z., Liu Y., Cross D., (2011). Strength and corrosion properties of Portland cement mortar and concrete with mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, **25**:3245-3256.
- Short N. R., Zhou S., Dennis J.K., (1996). Electrochemical studies on the corrosion of a range of zinc alloy coated steel in alkaline solutions. *Surface & Coatings Technology*, **79**:218-224.
- Shreir L. L., Burnstein G. T., Butterworth-Heinemann S. A., (2000). Corrosion Volume I Metal/Environment Reactions. Jordan Hills, Oxford.

- Schroeder R. M., Müller I. L., (2003). Stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement susceptibility of an eutectoid steel employed in prestressed concrete. *Corrosion Science*, **45**:1969-1983.
- Sümer G., (2009). Betonarme Elemanlarda Donatı Düzenleme İlkeleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Şahin F. M., (2002). Betonarmede Çelik Korozyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı Malzeme Programı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Tama Y. S., (2012). Çelik Yapılar Ders Notu. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli.
- TMMOB, (2004). İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi. Betonda Durabilite İçin C30. Kardelen Ofset Ltd.Şti., Ankara.
- Topçu A., (2015). Betonarme 1 Ders Notları. Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Eskişehir.
- Topçu İ. B., Boğa A. R., (2007). Çimento Tipinin Donatı Korozyonuna Etkisi. 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Topçu İ. B., Boğa A. R., Hocaoglu F. O., (2009). Modeling corrosion currents of reinforced concrete using ANN. *Automation in Construction*.
- Tran K. K., Nakamura H., Kunieda M., Ueda N., (2011). Three Dimensional Behaviour of Concrete Cracking Due to Rebar Corrosion. *ScienceDirect*, **14**:419-426.
- TS 708, (2010). Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1, (2009). Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, (2010). Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türker P., (2003). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB/AR-GE, Ankara.
- Uysal M., (2006). CrN, TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin Korozyon Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- Üneri S., (1998). Korozyon ve Önlenmesi. Korozyon Derneği Yayını, Ankara.

- Videla H. A., (1996). Manual of Biocorrosion. Lewis Publishers/CRC Press Incorporated, Boca Raton, FL.
- Yalçın H., Koç T., (1991). Demir Çelik Yapıların Korozyonu ve Katodik Korunması. İller Bankası Yayıncılık, Ankara.
- Yalçın H., ve Koç T., (1998). Mühendisler İçin Korozyon. TMMOB Kimya Mühendisleri Odası.
- Yalçın H., ve Koç T., (2004) Betonarme Demirlerinin Korozyonu ve Önlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, Ankara.
- Yalçınkaya S., (2008). Poli (Piról-ko-o-toluidin)'in Elektrokimyasal Sentezi Karakterizasyonu ve Demirli Malzemeler Üzerinde Korozyon Performansının Belirlenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Adana.
- Yamaç S., (2010). Silis Dumanı Katkılı Betonda Klorür Etkisinde Korozyon Oluşumu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Yaşar H., (1995). Metaller İçin Yüzey İşlemleri. KOSGEB Eğitim Merkezi Yayını, Ankara.
- Yiğiter H., (2008). Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Yüzer N., (1998). Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlarda Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Araştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Zhao Y., Yu J., Jin W., (2011). Damage analysis and cracking model of reinforced concrete structures with rebar corrosion. *Corrosion Science*, **53**:3388-3397.

İnternet Kaynakları

1. <http://www.bilgiustam.com/beton-nedir-retimi-nasil-gereklesir>, (02.05.2014)
2. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Etriye>, (07.05.2014)
3. <http://emlakansiklopedisi.com/wiki/etriye>, (09.05.2014)
4. <http://i.hizliresim.com/qPYXvR.jpg>, (14.05.2014)
5. <http://www.ozdoganlarmetal.com/pil.html>, (18.05.2014)
6. <http://v3.arkitera.com/v1/sektoreletkinlikler/toplanti/toplantil0239.htm>, (02.06.2014)
7. <http://www.angelfire.com/mt/mehmettamirci/korozyon1/cesitler.htm>, (14.09.2014)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatma Merve PEKTAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bolvadin / 04.08.1990
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0. 544. 736 33 68/ fmkilcik@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Bolvadin Anadolu Lisesi, 2008
Lisans : Pamukkale Üniversitesi, 2013
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2016

Çalıştığı Kurum ve Yıl : Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi (2016 – Halen)