<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

AZ ALAŞIMLI İMALAT VE YAPI ÇELİKLERİNİN ZAYIF ASİDİK ORTAMDAKİ AĞIRLIK KAYBINA MİKROYAPI VE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ Met. Müh. Kılıç Vural GÜNGÖRMÜŞ

Anabilim Dalı: METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ Programı: ÜRETİM METALURJİSİ VE TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ

NİSAN 2008

<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>

AZ ALAŞIMLI İMALAT VE YAPI ÇELİKLERİNİN ZAYIF ASİDİK ORTAMDAKİ AĞIRLIK KAYBINA MİKROYAPI VE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Kılıç Vural GÜNGÖRMÜŞ (506051209)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 4 Mart 2008 Tezin Savunulduğu Tarih: 9 Nisan 2008

Tez Danışmanı :	Prof.Dr. M. Kelami ŞEŞEN (İ.T.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri	Prof.Dr. Ercan AÇMA (İ.T.Ü.)
	Yrd.Doç.Dr. Erdem ATAR (G.Y.T.E.)

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin yönetimini üstlenen, her türlü desteği vererek çalışmalarımın tamamlanmasını sağlayan değerli hocam Prof. Dr. M. Kelemi Şeşen'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında hem temel hem de pratik uygulamalardaki bilgi desteğiyle büyük yardımları olan Behiye Yüksel'e teşekkür ederim.

Deneylerin yapılışı ve değerlendirilmesinde büyük katkıları olan Dr. Müh. C. Fahir ARISOY'a, Y.Müh. Alp Ersöz ve Y.Müh. Ali Erçin Ersundu'ya teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında bana her türlü maddi ve manevi fedakarlıktan kaçınmayarak desteğini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

NİSAN 2008

Kılıç Vural GÜNGÖRMÜŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LÍSTESÍ	vi
SEKILLISTESI	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	X
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. ÇELİĞİN KOROZYONU	2
2.1 Beton Çeliklerinin Korozyonu	2
2.1.1 Beton İçerisindeki Çeliğin Korozyon Mekanizması	4
2.1.2 Korozyon Reaksiyonları	5
2.1.3 Korozyonun Oluşumu	8
2.1.4 Korozyon Hızı	9
2.1.4.1 Oksijen Orani	9
2.1.4.2 pH Değeri	10
2.1.4.3 Sicaklik	11
2.1.5 Betonun Yapısı ve Korozyona Olan Etkisi	11
2.1.6 Karbonatlaşma	13
2.1.7 Klorür içerikli Tuzların Korozyona Olan Etkisi	13
2.1.8 Korozyon Sonucu Oluşan Hasar Mekanızmaları	14
2.1.8.1 Klasik Şekilde Guçlendirilmiş Betondaki Hasar Mekanizması 2.1.8.2 Gerilime Maruz Kalan Beton İcerisindeki Hasar Mekanizmaları	14 15
2.2 Çeliğin Bileşiminin ve Metalurjik Yapısının Korozyonla ilişkisi	17
2.2.1 Mikrovapının Celiğin Korozvonuna Etkişi	17
2.2.2 Daldırma Korozyon Modeli	18
2.2.3 Alaşım Elementlerinin Korozyon Davranışına Etkisi	19
2.2.3.1 Krom	20
2.2.3.2 Molibden	20
2.2.3.3 Bakır	21
2.2.3.4 Alüminyum	21
2.2.3.5 Nikel	21
2.2.3.6 Mangan	21
2.2.3.7 Silisyum	21
2.2.3.8 Fosfor	21
2.2.3.9 Titanyum	22
2.2.3.10 Vanadyum	22

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler	23
3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar	24
3.3 Deneylerin Yapılışı	24
3.4 Deney Sonuçları ve İrdeleme	26
 3.4.1 Isıl İşlemlerle Elde Edilen Farklı Mikroyapıdaki Çelikler 3.4.1.1 Martensit Mikroyapıdaki Çelikler 3.4.1.2 Perlit Mikroyapıdaki Çelikler 3.4.1.3 Temperlenmiş Martensit Mikroyapıdaki Çelikler 3.4.1.4 Beton Çelikleri 3.4.2 Mikroyapıların Korozyon Davranışına Etkileri 3.4.3 Farklı Bileşime Sahip Çeliklerin Korozyon Davranışı 	26 26 29 31 33 37 40
4. SONUÇLAR VE İRDELEME	43
KAYNAKLAR EK A EK B ÖZGEÇMİŞ	45 47 50 51

KISALTMALAR

K.E.D	: Karbon Eşlenik Değeri
emk	: Elektro motor kuvvet
HRC	: Rockwell Hardness-C
HV	: Vickers Hardness
A.P	: Oksijensiz korozyondan oksijenli korozyona geçiş noktası

TABLO LÍSTESÍ

<u>Sayfa No</u>

Tablo 3.1 Deneylerde kullanılan çelik numunelerin standartlarda verilen bileşim	
aralıkları	.23
Tablo 3.2 Deneyde kullanılan çelik numunelerin belirlenen % ağırlık kimyasal	
bileşimleri	.24

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sayfa No</u>

Şekil 2.1: Zemine dik beton kolonda korozyon oluşumu ve sonrası [2]
Şekil 2.2: Fe-H ₂ O pH denge diyagramı [5]
Şekil 2.3: Deniz suyu daldırmalı korozyon için korozyon-zaman modeli [15] 19
Şekil 2.4: Alaşım elementlerinin korozyon modeli üzerindeki etkisi [15]22
Şekil 3.1 (a, b, c, d): 900°C'de 1 saat östenitlemeden sonra suda soğutulan çeliklerin
mikroyapı fotoğrafları28
Şekil 3.2 (a, b, c, d): 900°C'de 1 saat östenitlemeden sonra firinda soğutulan
çeliklerin mikroyapı fotoğrafları
Şekil 3.3 (a, b, c, d): Östenitleme ve suda soğutma sonrası 400°C'de 1 saat
temperlenen çeliklerin mikroyapı fotoğrafları
Şekil 3.4: TS 708 IVa Tempcore çeliğinin orjinal halinin yüzeye yakın bölgesinin
mikroyapı fotoğrafı, 331HV
Şekil 3.5: TS 708 IIIa Çeliğinin orjinal halinin yüzeye yakın bölgesinin mikroyapı
fotoğrafı, 230 HV
Şekil 3.6: TS 708 IVa Tempcore beton çeliğinin martensitik ısıl işlemi sonrası
mikroyapı fotoğrafi 420HV ≈ 42 HRC
Şekil 3.7: TS 708 IIIa beton çeliğinin martensitik ısıl işlemi sonrası mikroyapı
fotoğrafi 437HV ≈ 44 HRC
Şekil 3.8: TS 708 IVa tempcore çeliğinin su verme ve temperleme ısıl işlemi sonrası
mikroyapı fotoğrafı, 350 HV ≈ 36 HRC
Şekil 3.9: TS 708 IIIa çeliğinin su verme ve temperleme ısıl işlemi sonrası
mikroyapı fotoğrafı, 363 HV ≈ 37 HRC
Şekil 3.10: TS 708 IVa tempcore çeliğinin östenitleme sonrası yavaş soğutma ile
elde edilen mikroyapısının fotoğrafı, 187 HV
Şekil 3.11: TS 708 IIIa çeliğinin östenitleme sonrası yavaş soğutma ile elde edilen
mikroyapısının fotoğrafı, 177 HV
Şekil 3.12: Farklı mikroyapılara sahip TS 708 IVa tempcore çeliğinin korozyon
davranışı
Şekil 3.13: Farklı mikroyapılara sahip TS 708 IIIa çeliğinin korozyon davranışı 37
Şekil 3.14: Orjinal TS 708 IIIa ve TS 708 IVa kalite beton çeliklerinin korozyon
davranışı
Şekil 3.15: Farklı yapılara sahip AISI/SAE 1040 çeliğinin korozyon davranışı 38
Şekil 3.16: Farklı yapılara sahip EN 42CrMo4 çeliğinin korozyon davranışı 39
Şekil 3.17: Farklı yapılara sahip AISI/SAE 5140 çeliğinin korozyon davranışı 39
Şekil 3.18: Farklı yapılara sahip EN 41Cr4 çeliğinin korozyon davranışı
Şekil 3.19: Su soğutmalı martensit yapılı farklı çeliklerin korozyon davranışı40
Şekil 3.20: Temperlenmiş martensit yapılı farklı çeliklerin korozyon davranışı41
Şekil 3.21: Perlit yapılı farklı çeliklerin korozyon davranışı

SEMBOL LİSTESİ

- Δ**G** : Serbest Enerji Değişimi
- T : Sıcaklık
- **a** : Aktivite
- **F** : Faraday Sabiti
- t : Süre
- P : Basınç
- E : Potansiyel Fark
- ω : Elektrokimyasal hücre tarafından yapılan elektrik işi
- E : Potansiyel Fark ω
- **n** : Gram Elektron Sayısı
- ca : Oksijenli Korozyon aşamasındaki korozyon miktarı
- $\mathbf{r}_{\mathbf{0}}$: Başlangış Aşamasındaki Korozyon Hızı
- t_a : Oksijenli solunum aşamasının toplam zamanı
- **r**_a : Oksijenli solunum aşamasındaki korozyon oranı
- \mathbf{r}_{s} : Sülfat tüketen bakterilerin aktif olduğu aşamadaki korozyon oranı

AZ ALAŞIMLI İMALAT VE YAPI ÇELİKLERİNİN ZAYIF ASİDİK ORTAMDAKİ AĞIRLIK KAYBINA MİKROYAPI VE ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

ÖZET

Yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan inşaat çeliği, uygun atmosfer şartları altında uzun süre boyunca işlevini yerine getirebilir. Ancak içinde bulunduğu ortam deniz kenarında bulunan yapılarda olduğu gibi yüksek klor oranına sahipse ya da sanayi bölgesinde asidik bir ortamdaysa, yüksek hızda çelik korozyonu gerçekleşecektir.

Mevcut tez çalışmasında, korozif ortamlarda gerçekleşmesi olası sorunları ortadan kaldırmak amacıyla, fazla maliyete gereksinim duyulmadan inşaat çeliğine uygulanacak olan farklı tip ısıl işlemler sonucu elde edilecek olan mikroyapıların ve alaşım elementi ilavesinin korozyon davranışına etkileri çalışılmıştır.

Farklı bileşimlere sahip TS 708 IIIa, TS 708 IVa, AISI/SAE 1040, AISI/SAE 5140, EN 42CrMo4 ve EN 41Cr4 Çeliklerine ait numuneler laboratuvar tipi tüp firinda gördükleri isil işlemler sonrasında metalografik işlemlerden geçirilmiştir. Mikroyapıları incelenen ve fotoğrafları çekilen çelik numulerin sertlik değerleri Vickers Sertlik Cihazı ile ölçülmüştür.

Mikroyapıları ve sertlik değerleri bilinen yukarıda belirtilmiş olan çeliklere 1 Molarlık HCl çözeltisi içerisinde, gün aşırı çözeltisinin yenilendiği ve ağırlık kaybının ölçüldüğü daldırma korozyonu testi uygulanmıştır.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar incelendiğinde, perlit mikroyapısındaki çeliklerin martensitik mikroyapıya sahip çeliklere göre zayıf asidik ortamdaki korozyon direncinin daha yüksek olduğu analiz edilmiştir.

Alaşım elementlerinden Krom ve Molibdenin çelik içerisindeki az miktarda varlığının dahi, zayıf asidik ortamdaki korozyon hızını azaltıcı yönde etki yaptığı kütle kaybı testleri sonucu anlaşılmıştır.

EFFECT OF MICROSTRUCTURE AND ALLOYING ELEMENTS ON WEIGHT LOSS BEHAVIOUR OF MICROALLOYED STRUCTURAL STEELS IN WEAK ACID

SUMMARY

Reinforcing steels used in construction sector, outstand long time in normal atmosphere conditions. However, reinforcing steels are exposed to corrosion as a result of such problems; carbonation, ambitions in high chlorine, etc.

Corrosion rate of the reinforcing steel increase in seaside structures having high chlorine content and in highly acidic conditions such as industrial regions.

Purpose of this thesis, to minimize the corrosion rate of reinforcing steels in corrosive conditions by applying low cost heat treatments and addition of alloying elements.

Heat treatment of TS 708 IIIa, TS 708 IVa, AISI 1040 steels, AISI 5140, SAE 42CrMo4 and SAE 41Cr4 steels is done in laboratory type, horizontal tube furnace. After metallographic examination, hardness of these steels measured and microstructure photographs are taken to compare the microstructures of each steel.

Samples of these mentioned steels are exposed to 1 Molar HCl solution through a week. 1 Molar weak acid solution is changed every 24 hours and weight loss of the samples is measured by three digit balance.

According to the result of the experiment, pearlite structure has higher corrosion resistance than martensite structure in weak acid solution. Also steels that contain low amounts of Chromium and Molybdenum, alloying elements, have less tendency to corrode in weak acid solution.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Bütün çelikler kullanıldıkları ve bulundukları ortama bağlı olarak korozyondan etkilenmektedirler. Çeliklerin kimyasal bileşimi ve metalurjik yapısı, çeliklerin korozyon davranışında etkilidir. Bu nedenledir ki, korozyona dirençli çelikler olarak paslanmaz çelikler üretilmekte ve kullanılmaktadır.

Makina yapım çelikleri ve inşaatlarda ve yapılarda kullanılan beton çelikleri alaşımsız veya az alaşımlı olarak ve farklı mikroyapılarla çeşitli ortamlarda kullanılmaktadır. Kullanıldıkları ortamlara bağlı olarak bütün çelikler gibi bu çelikler de korozyona maruz kalabilirler.

Bu çalışmada, makina yapım çelikleri ve beton çelikleri grubunu oluşturan alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerden bir grup çeliğin, farklı mikroyapılar kazandırılarak, zayıf asidik ortamda daldırmalı korozyon davranışları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

2. ÇELİĞİN KOROZYONU

Çelikler kullanıldıkları ve bulundukları ortama bağlı olarak az ya da çok korozyondan etkilenirler. Çeliklerin korozyondan etkilenmelerinde kimyasal bileşimi ve metalurjik yapısı önemlidir. Az alaşımlı çeliklerin korozif ortamlarda korozyona dayanımları pratik olarak yoktur. Bu çelikler korozif olmayan ortamlarda kullanılmak durumundadırlar. Ancak kullanıldıkları her koşulda ve ortamda, korozyondan az ya da çok etkilenebilirler. Makine yapım çeliklerinden üretilen makine parçalarının çalıştığı ortamlarda korozyondan korunması yönünde önlemler alınabilir.

İnşaatlarda ve yapılarda kullanılan beton çeliklerinin beton içerisindeki korozyonu bina ve yapı sağlığı açısından önemlidir. Bu çeliklerin beton içindeki korozyonu önleme ve yavaşlatma konusu da önemlidir.

2.1 Beton Çeliklerinin Korozyonu

Güçlendirilmiş beton 20. yüzyıldan günümüze kadar olan süreçte geliştirilmiş ve yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Çelik ve betonun bir arada kullanımı, mekanik olarak dayanıklılığın yanı sıra uzun süre kalıcı olma özelliğini de optimum düzeye getirmiştir. Beton, çelikten çok daha dayanıklıdır. Çeliğin betonla kaplanması, çeliğe korunaklı bir ortam hazırlar. Beton, çeliğin varlığıyla daha yüksek mukavemete sahip hale gelir. Teorik olarak bu kombinasyon, uzun süreli bir dayanıklılık mekanizması oluşturur. Beton, çeliği korozif ortamdan ve fiziksel dış etkenlerden korur.

Çıplak durumdaki çeliğin korozyona uğrama konusundaki eğilimi çok iyi bilinmektedir. Bu probleme önlem olarak katodik koruma ve boyama yöntemleri geliştirilmiştir. Bahsedilen yöntemler masraflı ve süreklilik istemektedir. Ama çeliğin betonla kaplanması sayesinde; anormal çevre şartları istisna olarak kabul edilirse, uzun süreli dayanıklılığın olduğu ve özel bakım ihtiyacının olmadığı bir kombinasyonun varlığı kabul edilir.

Her ne kadar beton ve çeliğin kombinasyonunun dayanıklılığı teorik olarak kabul görse de, son 40 yıl içerisinde özellikle sert iklim koşullarına sahip bölgelerde alaşımsız inşaat çeliklerinde korozyon problemi görülmektedir. Beton içerisinde bulunan sülfür miktarı çelikte korozyonu meydana getiren ana nedendir. Ama denize yakın yapılar için durum farklıdır. Henüz sülfür etkisini göstermeden ortamdaki klorun etkisiyle çelik içerisindeki paslanma baş gösterir. Neticesinde bu tip yapıların dayanıklılığı azalmış olur [1].

Çeliğin beton içerisindeki korozyonuna sebep olan, çevresel faktörlerden ve çimento teknolojisinden kaynaklanan sebepler aşağıda yer almaktadır.

1. Betonun ideal mukavemetini kazanması için 4 haftalık bir zaman periyodu gereklidir. Çimento üretiminde teknolojinin getirdiği yeniliklerden faydalanma amacıyla bu dört haftalık periyot daha da kısaltılmaya çalışılmaktadır. Beton içerisindeki C₃S bileşiğinin oranının maksimum seviyeye ulaşması ve maksimum seviyede tane incelmesinin sağlanması yukarıda bahsedilen süreç içerisinde sağlanmalıdır. Bunun için de, birim miktardaki çimentoya daha fazla su ilavesi yapılarak istenen mukavemet değerlerine ulaşmak amaçlanmaktadır. Zamandan kazanım sağlayan bu çalışmalar, beton içerisindeki çeliğin korozyonunu hızlandırıcı etki yapmaktadır.

2. İşçilik maliyetlerini düşürmek ve ideal yapı dizaynını elde etmek amacıyla çelik çevresindeki betonun inceltilmesi sonucu betonun koruyucu etkisi azaltılmış olunmaktadır.

3. Çevresel faktörlerin etkisi, betonun korozyona olan etkisinden çok daha fazla olabilir. Özellikle soğuk iklime sahip bölgelerde bulunan barajlarda, köprü benzeri yapılarda, garajlarda klor içerikli tuzların kristalize olması sonucu çok etkili şekilde çelik korozyonu gözlenmektedir. Ayrıca endüstriyel kirlilik, korozyon oranını önemli derecede arttırmaktadır.

4. Son yıllarda artan mimari betonun kullanımı sırasında, koruyucu harç şeklindeki çimentonun kullanılmaması sonucu çelik korozyona karşı dirençsiz bırakılmaktadır.

5. Sahile yakın yerlerdeki yapılar diğer ortamlara göre çok daha fazla klora maruz kalmaktadır.

Beton içerisinde meydana gelen korozyon belirtileri ilk olarak; beton üzerindeki küçük pas lekeleri ve küçük çatlaklar olarak görülür. Çelikte meydana gelen korozyon sonucu pas oluşur ve oluşan bu pas hacimce genleşmeye sebep olduğu için beton yüzeyinde, çeliğin yönüne paralel olacak şekilde çatlaklar oluşturur. Beton korozyonun gelişimi ve hasar oluşumu Şekil 2.1'de gösterilmektedir [1-3].



Şekil 2.1: Zemine dik beton kolonda korozyon oluşumu ve sonrası [2].

Bu tür çatlaklar daha çok nemin yoğun olarak bulunduğu bölgelerde ve toprağa yakın olan temel kısmında olur. Yapının temel kısmında kapiler etkiden dolayı topraktan emilmiş tuz birikmektedir. Eğer bu konuda erken önlem alınmazsa beton içerisindeki çelik yapısı zamanla incelmeye devam ederek güvenlik faktörünü sağlayacak kalınlığın altına düşer ve binayı taşıyamaz hale gelir.

Beton içerisindeki çelikte meydana gelen korozyonu ortadan kaldırmak son derece yüksek maliyetli bir işlemdir ve eski dayanıklılık sağlanamaz. Bu sebeple de çelik fiberli betonun üretimi esnasında bütün önlemler alınmalıdır [1].

2.1.1 Beton İçerisindeki Çeliğin Korozyon Mekanizması

Çeliğin korozyona uğramış olması için içeriğindeki demir atomlarının bünyesinden uzaklaşmış olması gerekmektedir. Demir, korozyon sırasında elektrokimyasal olarak çelikten ayrılır ve su içerisinde çözünüp Fe⁺² şeklinde bulunur. Çeliği çevreleyen beton içerisinde yer alan küçük boşluklarda bulunan su içerisinde çözünme olayı gerçekleşir. Bu çözünme olayının sonucunda çelik ağırlık kaybeder ve kesit alanında azalma meydana gelir.

Eğer korozyona uğrayan çelik beton içerisindeyse, bu çeliğin maruz kaldığı stres kesit incelmesi sonucu artar ve güvenlik faktörünün üzerine çıkar. Zaman içerisinde de çelik, yapıyı taşıyamaz hale gelir.

Su içerisinde çözünmüş olan Fe^{+2} , OH^- ve O_2 molekülleri ile reaksiyona girerek pas oluştururlar. Oluşan pas tabakası çelik ve beton arasında kalan sınırlı alanda birikerek hacimce genleşmeye sebep olur. Betonda, iç kısımdan gelen genleşme odaklı stres sonucunda çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar neticesinde beton, çeliği koruyucu özelliğini kaybetmiş olur [1].

Metallerin sulu ortamlar içindeki davranışları, yani çözünüp çözünmeyecekleri elektrokimyasal korozyon olarak bilinen serbest enerji değişimi ile belirlenmektedir. Serbest Enerji kavramı termodinamiğin birinci ve ikinci kuramlarının aşağıda verilen ortak ifadesinden kolayca geliştirilir:

$$dG = VdP - SdT - \delta\omega'$$
 (2.1)

Korozyon olayının oluştuğu sabit basınç ve sıcaklık koşulu için bu ifade:

$$dG = -\delta\omega' \tag{2.2}$$

şekline indirgenir. $\delta\omega'$ terimi, sistemin dış basınca karşı yaptığı işin dışındaki bütün enerji türlerini kapsar. Elektrokimyasal sistemde ω' , elektrokimyasal hücre tarafından yapılan elektrik işidir. Elektrokimyasal reaksiyon esnasında iletilen elektrik yükü miktarı, 1 gram elektron yükü ile (Faraday, F = 96494 kulon) hücrenin dış devresinden geçen gram elektronların sayısının (n) çarpımıdır. E potansiyel farkı ile çalışan bir hücrenin n gram elektronun iletimi esnasında yaptığı iş nxFxE dir. Bu değeri yukarıdaki ifadede yerine koyarak :

$$\Delta G = -nFE \tag{2.3}$$

bulunur. Potansiyel farkı E, emk olarak adlandırılır. Potansiyel farkın birimi Volt ise serbest enerji değişimi ΔG joule olarak bulunur.

Serbest enerji değişimi reaksiyon eğiliminin ölçüsüdür. Bu kurama uygun olarak korozyon eğilimi de E'nin pozitif değeri ile artar [4].

2.1.2 Korozyon Reaksiyonları

Çeliğin beton içerisindeki korozyonu; kimyasal reaksiyonları ve elektrik akımının akışını içeren elektrokimyasal bir prosestir. Kimyasal ve elektriksel prosesler birbirleriyle bağlantılıdır. Çeliğin beton içerisindeki korozyonunu açıklamak için kimyasal reaksiyonların ve elektriksel proseslerin temel prensiplerini bilmek gerekmektedir. Güçlendirilmiş beton yapıların dizaynı yapılırken çelik korozyonunu optimum seviyede tutmak için bu iki kavram bilinmelidir.

Korozyon prosesi, çeliğin yüzeyinde birbiriyle eş güdümlü olarak iki farklı bölgede gerçekleşen reaksiyon sonucu gerçekleşir. Bu iki farklı bölge arasında devamlılığı olan bir elektrik akımı olmak zorundadır. Korozyon, elektrik üretimi sağlayan kuru pilde olan sisteme benzerlik göstermektedir. Teknik olarak galvanik hücre adını alan bu sistemde galvanik korozyon meydana gelmektedir. Yukarıda bahsedilen çelik üzerindeki bölgeler katodik reaksiyonların olduğu katodik alanlar ve anodik reaksiyonların olduğu anodik alanlar olarak adlandırılır.

Çelikte gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda olduğu gibidir.

Anodik Reaksiyon:

$$2Fe^0 - 4e^- \rightarrow 2Fe^2 \tag{2.4}$$

Fe⁰ : Çelik yüzey üzerindeki metal atomlar

Fe²⁺: Çözeltideki iyonlar

Katodik Reaksiyon:

$$O^{2-} + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH)^-$$
 (2.5)

O²⁻ : Çözünmüş oksijen molekülleri

(OH) : Çözeltideki iyonlar

Çözeltideki demir iyonları hidroksil iyonları ile reaksiyona girerek aşağıdaki reaksiyon zincirinin oluşmasını sağlarlar.

$$Fe^{+2} + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2$$
 (2.6)

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3$$
(2.7)

$$2\mathrm{Fe}(\mathrm{OH})_3 \to \mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3 + 3\mathrm{H}_2\mathrm{O}$$
(2.8)

Anodik reaksiyon sonucu anodik bölgede oluşup, katodik reaksiyonda kullanılmak üzere katodik bölgeye yönelen elektronların akışı ve bu akışa ters yönlü olan, betondaki boşluklar içerisinde yer alan çözeltideki iyonların akışı korozyon akımını oluşturmaktadır. Eğer bu döngünün kesilmesi başarılırsa korozyonun önüne geçilmiş olunur.

Çelikte meydana gelen ağırlık kaybı 2.4 denklemindeki anodik reaksiyondan kaynaklanmaktadır.

Demir atomları iyonlaşarak çelik çevresindeki çözeltiye Fe²⁺ olarak karışırlar. Elektronlar çelik yüzeyinde toplanarak çeliğin elektrik potansiyelinin artmasına neden olurlar. Daha sonra elektronlar çelik üzerindeki düşük potansiyelli katodik bölgeye geçmeye başlarlar. Bu noktada 2.5 reaksiyonu devreye girer ve elektronlar çözünmüş oksijen molekülleri ve su ile reaksiyona girerek hidroksit (OH)⁻ iyonlarını meydana getirirler.

Korozyonun devam edebilmesi için katodik alanda kabul edilen elektron sayısının anodik alandan eksilen elektron sayısına eşit olması gerekir. Diğer bir deyişle, katodik bölgede iyonlaşıp reaksiyona giren her oksijen molekülü için, iki tane demir atomu iyonlaşıp anodik alanda çözünmek zorundadır.

Ağırlık kaybına sebep olan 2.4 denkleminin sürekliliğinin sağlanması için, katodik bölgenin elektronları içerisine çekmeye devam etmesi gereklidir. Eğer katodik bölgede oksijen ve su olmazsa korozyon meydana gelmez [3,4].

Çelik bar içerisindeki elektrik akımı, anottan katoda olan elektron akışının bir sonucudur. Ayrıca yüklü iyonların sayesinde, çelik ile beton arasındaki boşluklardaki sıvı çözeltiden geçen bir dış akım da mevcuttur. Dış akım, katottan anoda geçen negatif yüklü hidroksit iyonlarından ve anottan katoda geçen pozitif yüklü demir iyonlarından oluşmaktadır.

Beton içerisindeki boşluklarda yer alan su, alkali ve kalsiyum içerikli hidroksitlerin seyreltik çözeltisidir. Bu sıvı iyonik akışı sağlamaktadır. Eğer beton içerisindeki boşluklar kuru olursa ve beton yapısı boşlukların birbirine bağlanamayacağı kadar yoğun olursa, boşluklardan iyon akışı zorlaşır. Bu şartlar altında korozyon ya çok az olur, ya da durma noktasına gelir.

Beton içerisindeki elektrik direncinin yüksek olması durumunda yukarıdaki anodik ve katodik reaksiyonlar son derece yavaş olur ve korozyon hızı düşer. Birbirlerinin aksi yönünde hareket eden Fe^{2+} ve OH⁻ iyonları birleştikleri noktada $Fe(OH)_2$ oluştururlar. Bu bileşik diğer hidroksit iyonlarıyla ve hatta oksijenle birleşerek pas oluşumunu sağlar.

Kırmızı pas " Fe_2O_3 " ve siyah pas " Fe_3O_4 " olmak üzere iki tip pas vardır. Pas, korozyon sonucu oluşan kimyasal üründür. Pasın toplandığı yer gerçek korozyonun olduğu yer değil, katod görevi gören bölgedir. Korozyon prosesi tam anlamıyla, demir atomlarının sulu çözelti içerisine demir iyonları olarak geçmesidir.

Pratikte beton içerisindeki çeliğin korozyonu tespit edilirken iki etkene dikkat edilir; çelikte korozyonun olup olmadığı ve oluyorsa hangi oranda gerçekleştiğidir.

Korozyonun varlığı tespit edildikten sonra bu oran tespit edilir ve yıllık pas birikimi tahmin edilerek korozyonun ciddi boyutlarda olup olmadığı anlaşılır [1].

2.1.3 Korozyonun Oluşumu

Anodik ve katodik bölgeler, çelik yüzeyinin üzerinde ya da kimyasal bileşim farkının olduğu herhangi bir metal üzerinde olabilir. Çevresel etkenler ve bölgelere uygulanan stresin büyüklüğü de anodik ve katodik bölgelerin yerini tayin eden faktörlerdir. Bu tip etkenler bazı bölgelerin diğerlerine göre daha pasif ya da aktif olmasını sağlayarak anodik ve katodik bölgelerin belirlenmesini sağlarlar. Daha az aktif olan bölgeler katod olmaya yatkındır.

Kimyasal aktivite farkından ötürü elektrik potansiyeli farkları doğar. Böylece korozyon tetiklenmiş olur. Beton içerisindeki çelikler heterojen mikroyapı dağılımına sahiptir. Ferrit(α -Iron) ve Sementit (F₃C) fazları mikroyapıyı oluşturur. Bu fazlardan ferrit fazı daha aktif potansiyele sahiptir.

Tane sınırlarındaki bölgeler tanelerin iç kısımlarına göre daha aktif potansiyele sahiptir ve anodik alan özelliği gösterirler.

Soğuk deformasyon çeliğin homojen olan yapısını bozar ve tıpkı tane sınırlarında olduğu gibi korozyona olumsuz yönde etki eder. Yüksek gerilimli bölgedeki çelik daha aktif konumdadır ve anot görevi görür. Gerilimsiz kısımlardaki çelik ise katot görevi görür. Soğuk deformasyon daha çok çelik üzerindeki küçük bölgelerde başvurulan bir yöntem olduğundan bölgesel korozyona sebep olur.

Çevresel etkenlerden ötürü korozyon oluşumunda, çelik parçasının farklı bölgeleri arasında ortam farkının olmasının rolü vardır. Su konsantrasyonu fazla olan bölgelerde pas birikimi olur, yani katot görevi görülür. Bu tip korozyonlara sulu hücre korozyonu denir. Nem ya da rutubetin fazla olduğu bölgelerdeki çelik yapılarında, bu tip korozyon oluşumu görülür [1].

2.1.4 Korozyon Hızı

Korozyon oluşumunda aktivite potansiyelinin dışında birçok etkili faktör vardır. Korozyona karşı bir önlemin alınması gerektiği, bu faktörler bir araya getirilip irdelendiğinde ve korozyon oranı tespit edildiğinde anlaşılabilir. Yukarıda bahsedilen faktörlerin başlıcaları aşağıda belirtilmektedir.

2.1.4.1 Oksijen Oranı

Katodik bölge etrafında çözünmüş durumda olan O²⁻ olup olmadığının bilinmesi korozyon oranının kontrolü için önemli bir faktördür. Oksijen iyonu 1.b denkleminde görüldüğü üzere katodik reaksiyonda kullanılmaktadır. Oksijen iyonu olmaması durumunda korozyon durma noktasına gelir.

Diğer bir deyişle, çeliğin dış yüzeyi oksijeni geçirmeyecek bir tabakayla kapatılırsa korozyon engellenmiş olur. Çeliği çevreleyen betonun önemli bir görevide budur.

Çeliğin korozyon prosesinin başlangıcında az miktarda oksijenin difüzyonu gerçekleşir. Bu difüzyon sonucunda anodik ve katodik bölgeler arasında potansiyel fark oluşur. Bu farkın oluşumuna polarizasyon denir. Oksijenin sınırlı miktarda difüzyonu sonucu ortaya çıkan polarize edici etkisine "konsantrasyon polarizasyonu" adı verilir.

Genellikle beton içerisindeki sıvı akışının engellenmesi, iyonik akımın betonun boşluklarında ilerlemesini durdurarak korozyonu sınırlayıcı etkiye sahiptir. Eğer yük taşıyan iyonların hızı düşerse, korozyon reaksiyonları yavaşlar. Bu durum çeliğin anodik ve katodik bölgelerini çevreleyen betonun elektrik direncinin yüksek

oluşundan anlaşılabilir. Bu sebeple, çeliği çevreleyen betonun elektrik direncinin ölçülmesi, korozyon hızı hakkında fikir verebilir.

Diğer bir yandan, çelik içerisinde yer alan alaşım elementleri çeliğin yüzeyinde suda çözünmeyen ince oksit tabakası oluştururlar. Eğer bu film tabakası çelik ve çevresindeki sulu çözelti arasında stabil olarak kalabilirse, çelik elektrokimyasal olarak pasifleştirilmiş olunur.

Bu pasif film tabakası çeliğin korozyonunu engelleyen mekanizmadır. Çeliğe eklenen nikel ve krom stabil bir film tabakası oluşturarak korozyonu önler [3].

2.1.4.2 pH Değeri

Korozyon ortamındaki oksijenin tükenmesi durumunda oksijensiz ortamda çoğalabilen bakteriler devreye girer. Bu durumda oksijen olmamasına karşın korozyon hızında anormal bir artış gerçekleşebilmektedir.

Oksijenin mevcut olduğu korozyonun başlangıç aşamasında sulu çözelti içerisindeki hidroksit "OH" iyonunun konsantrasyonu yeterince arttırılırsa pasivasyon sağlanabilir. Bu durum pH'ın passivasyon üzerindeki etkisiyle ilgilidir. Çelik çevresinde bulunan suyun pH değeri bu sebepten dolayı çok önemlidir. Bu değer Cl⁻ iyonu olmadığı durumlarda 11.5 değerinin üzerindedir.

Bu şartlar altında pasif tabakanın devamlılığı vardır ve korozyon oranı çok düşüktür. PH değeri 11.5'in altına indiğinde bu tabaka etkisini kaybeder. Bazı durumlarda ise çözeltinin pH değerinin 13'ün üzerinde olmasına karşın ortamdaki Cl⁻ konsantrasyonunun fazla olması pasif film tabakasının aktifliğini ortadan kaldırabilir.

Gerçekleşen film tabakasının destabilizasyonu işlemi, bölgesel oyukçuklanma korozyonunun olmasını sağlar. Fe-H₂O sisteminin potansiyel-pH diagramı Şekil 2.2 de gösterilmektedir [5].



Şekil 2.2: Fe-H₂O pH denge diyagramı [5]

2.1.4.3 Sıcaklık

Korozyonun oksijen difüzyonu kontrolü altında yapıldığı durumlarda her 30°C lik sıcaklık artışında korozyon hızı ikiye katlanır. Korozyon sırasında hidrojen çıkışının gerçekleşmesi durumunda ise 30°C lik sıcaklık artışı korozyon hızında 2 katın da üzerinde bir artışa sebep olur. HCl içerisinde korozyona maruz kalan demirin korozyon hızı ise her 10°C lik artış için 2 katına çıkar.

2.1.5 Betonun Yapısı ve Korozyona Olan Etkisi

Çeliğin atmosferdeki korozyonu ile beton içerisindeki korozyonu tamamen farklıdır. Çünkü çeliği çevreleyen beton tabakası kimyasal ortamı tamamen değiştirmektedir.

Betonun korozyona karşı olan temel görevi çeliği dış etkenlerden korumasıdır. Betonun kimyasal ve fiziksel yapısı, içerisindeki çeliğin korozyonunda önemli rol oynar. Fiziksel olarak değerlendirildiğinde, beton içerisindeki boşlukların büyüklüğü, yoğunluğu, iri boşlukların birbirleri ile olan bağlantıları önemli etkenler olarak kabul edilir.

Beton, kaba ve ince tanelerden (kum) oluşan ve sulandırılmış çimento matriksten oluşan yapı şeklidir. Tanecikler kimyasal olarak pasif malzemelerden oluşmasına

karşın çimento; boşluklu yapıları ve bu boşluklar içerisindeki aktif çözeltileri barındırmaktadır. Betonun etkinliği belirlenirken; çimentonun yapısı, beton içerisindeki boşlukların dağılımı ve şekli, ayrıca boşluklardaki çözeltilerin reaktifliği göz önüne alınır.

Beton kompozit bir malzemedir. Tıpkı kompozit malzemelerde olduğu gibi, kompoziti oluşturan farklı malzemelerin her birisinin, maksimum dayanıklılığın sağlanması açısından belirli oranlarda ilave edilmesi gerekmektedir.

Beton içerisindeki su oranı fazla olursa kapiler etki sebebiyle görülen boşluk miktarında artış meydana gelir. Ayrıca optimum oranda su ilave edilen betonlar daha yoğun ve daha dayanıklı olurlar.

Sulandırılmış çimento [Ca(OH)₂]'den oluşan büyük kristallerden ve çok küçük boyutlarda kolloid şeklindeki kalsiyum silikat bileşimlerinden olmak üzere iki tip yapıdan oluşmaktadır. Bu bileşim "C-S-H jel" olarak da adlandırılmaktadır. Bu jelin kompozisyonu kabaca 3CaO.2SiO₂.2H₂O şeklindedir.

Çimento, içeriğinde suda çözünebilen alkali oksitleri (K_2O ve Na_2O) ve alkali sülfatları bulundurur. Beton katılaştıktan sonra, iç kısımlarda oluşan boşluklarda hapis kalan su, boşluklarda sülfat bileşiklerinin oluşumunu sağlar.

Boşluklarda yer alan su asla saf su değildir. İçeriğinde çimentodan kaynaklanan çözünmüş iyonlar içermektedir. Bu sebeple boşluklarda yer alan sular boşluk çözeltisi olarak adlandırılmaktadır. Beton katılaştıktan sonra sulama işlemine tabi tutulur. Bunun sonucunda bu boşluklar yüksek konsantrasyonda alkali ve hidroksit iyonlarını aynı zamanda düşük konsantrasyonda sülfür ve kalsiyum iyonlarını içerir. Alkali iyonları K⁺ ve Na⁺ olmakla birlikte, modern çimentolar genellikle K⁺ içerir.

OH iyon konsantrasyonu oldukça yüksektir. Genellikle 0.5 ve 1.0 Molar aralığında bir değere sahiptir. Bu değerlere sahip hidroksit konsantrasyonları 13 pH değerine sahiptir.

Beton içerisindeki çelik bu çözelti ile temas halinde olduğu için ince bir pasif yüzey oluşumu meydana gelir ve korozyona karşı kısmen de olsa bir koruma sağlanmış olur.

Yeterli miktarda Cl⁻ olduğu taktirde pasif tabakanın stabil özelliğini ortadan kaldırıcı etki oluşur. Beton yapımında kullanılan kumun deniz kumu olmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü bu kum tuz içermektedir. Ayrıca denize yakın ortamlarda bulunan beton yapılarda havadaki nem aracılığıyla klor iyonunun korozyon etkisi görülebilir [1-4].

2.1.6 Karbonatlaşma

Fiziko-kimyasal bir süreç olan Karbonatlaşma ortamın alkalinitesini düşürerek koruyucu oksit tabakasının tahrip olmasına neden olur. Betonun alkalinitesi, hidrate olmuş çimentonun içerdiği Ca(OH)₂ ile sağlanır ve pH değeri 12 civarındadır. Ancak Ca(OH)₂ zamanla havadaki CO₂ ile reaksiyona girerek CaCO₃'e dönüşür ve pH 8'in altına düşebilir. Bu durumda karbonatlaşma meydana gelmiş olur. Atmosferdeki miktarı hacimce %0.03 olan CO₂ nin kırsal bölgelerde bile karbonatlaşmaya olan etkisi söz konusudur. CO₂ konsantrasyonu arttıkça karbonatlaşma oranı artmaktadır. Karbonatlaşma derinliğinin oldukça ince olduğu bilinmesine karşın kusurlu betonda, herhangi bir mekanik zorlama olmaksızın çatlaklar oluştuğundan, karbonatlaşma

2.1.7 Klorür içerikli Tuzların Korozyona Olan Etkisi

Klor içerikli tuzlar düşük alaşımlı çeliklerin korozyonunda önemli role sahiptirler. Özellikle deniz ve okyanus kenarında inşa edilen yapılarda kullanılan çelikler klor iyonlarından kaynaklanan korozyona yoğun olarak maruz kalmaktadır.

Cl⁻ beton içerisine difüzyon, kapiler etki ve adsorbsiyon vasıtası ile girer. Uzun bir süre sonrasında çelik yüzeyinde yoğun olarak Cl⁻ birikimi meydana gelir.

Cl⁻ difüzyonunun hızı, betonun ıslanıp ardından kuruma rejimiyle doğrudan orantılıdır. Bu rejim yapının bulunduğu yere göre değişkenlik gösterir. Rüzgar, güneşe maruz kalma, yapının kullanımı ve şekli önemli faktörlerdir. Dolayısıyla yapıların farklı kısımları da farklı ıslanma ve kuruma rejimine sahiptir.

Beton yapımında kullanılacak olan çimento ve su karışımına katran ilave edilmesi çevresel etkilere karşı betonun direncini arttırır. İlave edilen katran, beton içerisindeki boşlukların çevresini su geçirmez bir tabakayla kaplayarak mevcut boşlukların birbirleriyle bağlantı kurmasını engeller. Boşluk miktarının sınırlı miktarda olması da kapiler etkinin azalmasına yol açar. Bu sayede boşlukların içerisine başta klor olmak üzere diğer korozif elementler giremez ve sertleşmiş çimento bağlayıcı malzeme olarak uzun süre stabil kalır.

Beton direnci, geometriye bağlı kalmaksızın elektriksel direnci gösteren bir malzeme özelliğidir. Birim hücre üzerinde uygulanan potansiyel fark sonucu ortaya çıkan akım değeri olarak kabul edilir. Betonun direnç değeri içeriğindeki neme ve bileşimine göre 10^1 ile $10^5 \Omega$ m aralığında değişmektedir. Boşluklar içerisinde bulunan sıvılardaki iyonlar aracılığıyla akım iletimi gerçekleşmektedir. Beton içerisindeki suyun çimentoya olan oranı arttıkça, direnç değeri azalmaktadır. Nem oranı sabit kaldığı takdirde suyun hidratlama özelliğinden dolayı direnç artar. Ayrıca beton kurutulduğunda ve çimentoda karbonatlaşmanın meydana geldiği durumlarda da direnç artışı meydana gelmektedir.

Deneysel ve teorik çalışmalar göstermektedir ki çimentonun direnci ve Cl⁻ difüzyonu birbiriyle ilişkilidir. Genellikle Cl⁻ difüzyon katsayısı beton direnci ile ters orantılıdır. Büyük yapıların kısmen daha geçirgen olan kısımları diğer bölgelere göre daha yüksek Cl⁻ içeriğine ve daha düşük direnç değerine sahiptir.

Betonun direnci ve güçlendirici çeliğin korozyon direnci arasında bağlantı vardır. Çeliğin yüzeyi üzerindeki anot ve katot bölgeleri arasındaki iyon transferi, korozyon oranını belirleyici faktörlerden birisidir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, beton yapımında katran ilave edilmesi, boşlukların birbirleri ile olan bağlantı yollarını tıkamakta ve kapiler etki ile sağlanan Cl⁻ transferinin önünü kesmektedir. Bu sayede beton içerisindeki klor iyonundan kaynaklanan korozyonun önüne geçilmektedir [2,3].

2.1.8 Korozyon Sonucu Oluşan Hasar Mekanizmaları

2.1.8.1 Klasik Şekilde Güçlendirilmiş Betondaki Hasar Mekanizması

Eski yöntemlere göre güçlendirilmiş beton içerisinde gerçekleşen en bilinen korozyon sonucu, çeliğin kesit alanının azalmasıdır. Bunun sonucunda birim çelik miktarı üzerine düşen yük daha da artmaktadır.

Normalde, beton içerisindeki çeliğin akım yoğunluğu 10 μ A/cm² değerinden daha düşüktür. Ölçülen bu değerin 1 μ A/cm² olması çelikteki incelme hızının 12 μ m/yıl olduğunu gösterir. Eğer ki bu akım yoğunluğu 0.2 ile 0.4 μ A/cm² arasında olursa ihmal edilebilir. Ama bu ihmal durumu söz konusu olduğunda dahi oyukçuklanma korozyonunun gerçekleşme riski bulunmaktadır.

Ayrıca korozyon sonucu oluşan toz şeklindeki pas parçacıkları difüzyon yolu ile betonun dış kısmına çıkarak kahverengi bir tabaka olarak gözükür. Bu tabaka fark edilir edilmez incelenmeye alınmalıdır.

Beton içerisindeki çelikten pas oluşumu sonrası belirgin bir hacim artışı meydana gelir. Bu hacim artışı dış yüzeyde çatlaklara sebep olmaktadır. Yüzeyde oluşan ilk çatlak aynı zamanda çeliğin beton içerisindeki konumunu göstermektedir. Çünkü çatlaklar çelik yönüne paralel bir şekilde uzanmaktadır.

Beton içerisindeki çelik yüzeyinde oluşabilecek 0.1 - 0.2 mm kalınlığındaki pas oluşumu beton yüzeyinde bir çatlak oluşumu için yeterlidir. Bu çatlak oluşumu çeliğin taşıma kapasitesinin aşıldığı anlamına gelmez ve olağan karşılanır.

Oksijensiz ortamlarda da korozyon gerçekleşebilir. Ama diğer paslanmalarda olduğu gibi hacimsel genleşme meydana gelmez. Bu tip paslanmalar siyah korozyon olarak adlandırılır ve teşhis etmesi zor olduğu için çok tehlikeli sonuçlar doğurabilir [1,2].

2.1.8.2 Gerilime Maruz Kalan Beton İçerisindeki Hasar Mekanizmaları

Eski yöntemlerle imal edilen betonlara etki eden aynı korozyon problemleri bu betonlar için de geçerlidir. Ama aynı problemler bu tip beton yapılar için daha büyük sorunlara yol açabilmektedir.

Gerilime maruz kalan beton içerisindeki çelik kirişlerin çapı genellikle eski tip betonlardakine göre daha incedir. Her iki tip için aynı hızda gerçekleşecek olan korozyon hızında çelik çapı ince olan modern betonlarda korozyon daha etkili olacaktır.

Çelik çevresinde imalat hatasından dolayı boşluk oluşma ihtimali daha fazladır. Bunun sonucunda çimento koruyucu görevini göremez. Korozyon tiplerinin büyük çoğunluğu, akma mukavemetinin aşılması sonucu sünek bir şekilde koparak hasar meydana getirmektedir. Uzun süreli korozyon sonucu kesit alan incelmekte ve stres akma mukavetine ulaşana kadar artmaya devam etmektedir. Bu tip hasar sonucu kopmanın meydana geldiği bölgelerde boyun verilen kısım mevcuttur.

Kırılgan hasar tiplerinde ise çok daha yıkıcı etkiler meydana gelmektedir. Bu tip hasarlarda metal kaybı az düzeyde olur. Çelik üzerine çok güçlü çekme mukavemeti uygulandığında küçük bir bölgedeki korozyonun varlığı sonucu meydana gelen hasar tipleri kırılgan hasar tipleridir.

Stres korozyonu çatlakları ve hidrojen gevrekliği olarak adlandırılan hasar mekanizmaları kırılgan bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu tip hasar mekanizmalarında boyun verme gerçekleşmez.

Hidrojen gevrekliğinin ve stres korozyonunun gerçekleştiği ortam şartları birbirinden farklıdır. Hidrojen gevrekliğinin gerçekleşmesi için asidik bir ortama ihtiyaç vardır. Betonun iç kısımları ise yüksek oranda bazik olduğu için bu tip korozyon açıkta kalmış kiriş çelik kısımlarda gerçekleşebilmektedir. Daha çok endüstriyel olarak kirli hava şartlarının olduğu yerlerde hidrojen gevrekliği gerçekleşmektedir.

Aşağıdaki şartlarda hidrojen gevrekliği gerçekleşebilir.

- İnşaatlarda püskürtme işlemi öncesinde çeliği muhafaza amacıyla etrafının ince bir şekilde çimentoyla kaplanması uzun süreli bir koruma sağlamaz.
- Hatalı dizayn sonucu bazı çelik kısımlar açıkta kalabilirler.
- Harçta meydana gelen korozyonlar sonucu çatlaklar oluşur. Bu çatlaklar atmosferle çelik arasında bağlantı yolu oluşturur.

Ayrıca hidrojen gevrekliği sahil kesiminde bulunan betonlarda da meydana gelebilir. Mevcut elektrik kaçağı veya yanlış katodik koruma uygulaması sonucunda yüzey bölgelerde yüksek pH değerine karşın hidrojen birikimi gerçekleşir [1-3].

Stres korozyonunun sebebi tam olarak açıklanamamakla birlikte, oyukçuk şeklinde başlangıç gösterdiği ve çok hızlı bir şekilde ilerlediği bilinmektedir. Oyukçuğun en

dip noktası stresin odaklandığı yerdir. Bu bölge anot görevi görür ve hızlı bir şekilde korozyona uğrayarak kırılgan hasarın oluşmasını sağlar.

Hidrojen gevrekliği yüksek stresin ve katodik reaksiyonun aynı anda mevcut olduğu bölgelerde gerçekleşmektedir. Bu katodik reaksiyon çelik yüzeyinde hidrojen oluşumunu sağlar. Oluşan hidrojen atomları stresin en yoğun olduğu bölgelere difüze olarak çözünürler ve bu bölgelerde hidrojen kırılganlığını meydana getirirler.

Yukarıda bahsedilen katodik reaksiyonun gerçekleşebilmesi için asidik bir ortam gereklidir. Çimentodaki boşluklar bu tip reaksiyonlar için uygun ortama sahip değildir. Asidik ortamlarda gerçekleşen bu reaksiyon aşağıda olduğu gibidir.

$$2\mathrm{H}^{+} + 2\mathrm{e}^{-} \to 2\mathrm{H}^{0} \tag{2.9}$$

Bu reaksiyonda demirin anodik olarak çözünmesi sonrasında 2 e⁻ oluşur ve katodik tarafa transfer olur. Bu sırada iki H⁺ iyonu ile birleşerek H⁰ oluştururlar. Sonrasında Hidrojen atomları H₂ olarak gaz şeklinde atmosfere karışır ya da gaz oluşturmadan yüzeyden uzaklaşarak gider.

Hidrojen atomları tane sınırlarında toplanmakta ve kayma hareketleriyle yer değiştirerek metalin plastik deformasyonuna sebep olmaktadır [4].

2.2 Çeliğin Bileşiminin ve Metalurjik Yapısının Korozyonla ilişkisi

Bugüne kadar yapılan araştırmalar sonucu oluşturulan literatür bilgileri çeliğin kimyasal bileşimi ve metalurjik yapısının korozyona olan etkisi konusunda çelişkili bilgiler vermektedir. Genelde kabul gören etkiler aşağıda özetlenmektedir.

2.2.1 Mikroyapının Çeliğin Korozyonuna Etkisi

Çeliğe uygulanan ısıl işlemler sonrasında farklı mikroyapılar elde etmek mümkündür. İnşaat çeliklerinin kullanım süresi mümkün olduğunca uzun olmalıdır. Bu durumda çeliğin beton içerisindeki kimyasal ortamı ve olası korozif hasar mekanizmaları dikkate alınmalıdır. Diğer bir deyişle fiziksel dayanıklılık uzun vadede tek başına etkili değildir. Çelikler kullanım alanlarına göre farklı ısıl işlemlerden geçerek, verimli kullanım süreleri maksimum hale getirilir. Isıl işlem uygulanmış çelik belirli bir mikroyapı özelliği taşır. Martensit, perlit ve bu iki yapının bir arada olduğu yapıların elde edilmesi mümkündür. Bu yapılar elde edildikten sonra dayanıklılığı arttırmak amacıyla tane küçültmek için ilave ısıl işlemler uygulanabilir.

Pratikte %100 martensit veya %100 perlitik yapı elde etmek mümkün değildir. Bu iki faz sanayide ısıl işlem gören çeliklerde iç içe girmiş durumdadır. Soğutma hızına bağlı olarak perlit / martensit oranı ayarlanabilmektedir.

Herhangi bir mikroyapıda bir arada bulunan martensit ve perlit fazlarının birbirlerine olan hacimsel oranlarıyla içerdikleri karbon oranlarındaki değişim ve diğer alaşım elementlerinin oranlarının değişimi direkt olarak birbiriyle ilişkilidir. Diğer bir deyişle, bu kriterlerden birisi değişirken diğeri de değişir.

Termodinamik olarak karşılaştırıldıklarında martensit fazı karbon atomlarının kararsız olduğu fazdır. Kararsız durumdaki karbon atomları, yüksek olan enerji seviyelerini düşürmek için daha yüksek korozyon eğilimine sahiptirler [9-11].

2.2.2 Daldırma Korozyon Modeli

Genellikle deniz suyunun kullanıldığı daldırmalı korozyon için gerçekleştirilen modelleme sırasıyla dört fazdan oluşur. Bu fazlar Şekil 2.3'de gösterilmektedir.

- 1. Kinetik olarak kontrol edilebilen faz,
- 2. Korozyona uğramış tabaka boyunca gerçekleşen oksijen difüzyonlu faz.

Yukarıdaki iki faz süresince oksijenli korozyon reaksiyonları mevcuttur.

- 3. Sülfür tüketen bakterilerin çoğaldığı faz,
- 4. Oksijensiz ortamda çoğalan bakterilerin baskın olduğu faz.



Şekil 2.3: Deniz suyu daldırmalı korozyon için korozyon-zaman modeli [15].

Yukarıdaki modelde oksijenli korozyondan oksijensiz korozyona geçiş aşamasının pratikte, teorinin aksine daha kesin olmayan eğilimle geçtiği kabul edilmiştir. Bu eğilim kesik çizgilerle ifade edilmiştir.

Şekil 2.3'de gösterilen modelde bazı kısaltmalar kullanılmıştır. Kinetik olarak kontrol edilebilen süreçteki korozyon oranı r_o , oksijenin mevcut olduğu süreçteki maksimum korozyon miktarı c_a , oksijenin korozyonun olduğu ortamda mevcut olduğu süreç t_a , sülfat tüketen bakterilerin büyüme gösterdiği safhadaki korozyon oranı r_a , oksijensiz ortamdaki bakterilerin faaliyet gösterdiği kararlı durum safhasındaki korozyon oranı da r_s sembolü ile gösterilmiştir.

Şekil 2.3'de gösterilen 2 numaralı oksijen difüzyonlu faz süresince, çeliğin kimyasal bileşiminin korozyon hızına etkisi çok azdır. Diğer fazlarda ise kimyasal bileşim, korozyon miktarında önemli bir etkendir.

2.2.3 Alaşım Elementlerinin Korozyon Davranışına Etkisi

Daha önce bu konuda yapılmış olan çalışmalarda daldırma korozyonu yöntemi kullanılarak kütle kaybı yöntemine başvurulmuştur. Ancak bu çalışmalarda teorik bilgi yetersizliği ve ortam sıcaklığı gibi çevresel etkenler göz önüne alınmadığı için

çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. En belirgin örnek olarak, çelik içerisindeki krom miktarının korozyon hızına olan etkisi konusunda gösterilebilir.

Friend, Baudot ve Chaudron ile Birleşik Krallık Korozyon Komitesi, Petersen, Forgesen ve Blekkenhorst tarafından çok sayıda numune üzerinde kapsamlı korozyon testleri yapılmıştır.

Alaşım elementlerinin çeliğe ilavesinin korozyon hızına olumlu ya da olumsuz etkisi ilave miktarıyla lineer bir şekilde değişmemektedir. Bunun yanı sıra bazı elementlerin ilavesi, çelik bünyesinde bulunan diğer alaşım elementlerinin yüzdesine göre korozyon hızını arttıran ya da azaltan etkiye sahiptir [13-15].

2.2.3.1 Krom

Kromun %2.5 oranına kadar ilavesi karbon bileşiminden etkilenmeksizin r_0 değerini sadece ihmal edilebilir seviyede etkilemektedir. Ancak az miktardaki molibden ve alüminyum ilavesi sonrasında Krom bileşiminin artması r_0 değerini düşürür.

Oksijensiz korozyonun başlangıç aşamasında ise içerikte bulunan krom belirgin bir şekilde r_a korozyon hızını azaltıcı etkiye sahiptir.

Tamamıyla oksijensiz korozyon başladığında ise korozyon hızı r_s değerini %2'lik bileşime kadar arttırıcı etkiye sahiptir. Bu aşamada, daha yüksek oranlarda ise korozyon hızını azaltıcı etkiye sahiptir.

2.2.3.2 Molibden

%0.5 e kadar molibden ilavesi alaşımsız çeliğin korozyon direncini arttırır. Bu artış lineer bir artış değildir. Dolayısıyla, yalnız ilave edildiği takdirde % 0.5 lik oranı geçmemelidir. Alaşımsız çeliğe az miktardaki molibden ilavesi sadece korozyonun çok etkili olduğu başlangıç sürecinde etkilidir. Sonraki aşamalarda belirgin bir etkisinden söz etmek mümkün değildir. Ayrıca %1.5 luk Alüminyum ilavesi beraberinde Molibden eklenmesi durumunda korozyon hızını arttırıcı olumsuz bir etkiye sahiptir.

2.2.3.3 Bakır

Korozyonun hızının en yüksek olduğu başlangıç aşamasında önemli bir etkiye sahiptir. Uzun vadede dikkate alındığında ise yine aynı şekilde korozyon hızını arttırıcı etkiye sahiptir.

2.2.3.4 Alüminyum

%1.5 oranına kadar olan alüminyum ilavesi korozyonun başlangıç aşamasında yavaşlatıcı etkiye sahip olsa da, uzun vadede oksijensiz ortamdaki korozyon dikkate alındığında korozyonu hızlandırıcı etkiye sahip olduğu anlaşılır. Alüminyumun yanında molibden ilave edildiği taktirde ise başlangıç aşamasındaki r_0 korozyon hızında artma görülür. Aynı etkileşim oksijensiz korozyon için de geçerlidir.

2.2.3.5 Nikel

Başlangıç aşamasında korozyon hızını az da olsa azaltıcı etkiye sahiptir. Ama sonraki aşamalarda % 2'ye kadar ilavesi korozyon hızını arttırır. %2'den fazla eklenirse az da olsa olumlu etkiye sahiptir.

2.2.3.6 Mangan

Başlangıçta çok az da olsa korozyonu hızlandırıcı etkiye sahiptir. Sonraki aşamalarda ise korozyon hızını düşürür.

2.2.3.7 Silisyum

Başlangıçtaki korozyon hızı için olumlu olduğu söylenebilir. Ama uzun vadeli korozyon hızı ele alındığında ise sadece karbon çelikleri için korozyon hızını azaltıcı etkiye sahip olduğu söyleyebilmek için yeterli bilgi mevcuttur. Diğer elementlerle kombinasyonunun doğurabileceği sonuçlar bilinmemektedir.

2.2.3.8 Fosfor

Çok miktarda ilave edildiği taktirde korozyon hızını büyük ölçüde arttırıcı etkiye sahiptir.

2.2.3.9 Titanyum

Titanyum ilave edilen alaşımsız çelik, korozyonun her aşamasında daha dayanıklı hale gelir.

2.2.3.10 Vanadyum

Yapılan çalışmalar az miktardaki ilavesinin dahi korozyon hızını azaltıcı etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Şekil 2.4'te alaşım elementlerinin ilavesinin korozyon modeli parametreleri üzerindeki etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Alaşım elementlerinin korozyon modeli üzerindeki etkisi [15].

Şekil 2.4'ten anlaşılacağı üzere, alaşım elementlerinin uzun vadeli etkileri kısa vadeli etkilerine göre büyük farklılıklar gösterebilmektedir [15].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, az alaşımlı çeliklerin farklı bileşim ve mikroyapılarının korozyon davranışına etkileri incelenmiştir. Ayrıca ısıl işlemli ve ısıl işlemsiz beton çeliklerinin korozyon davranışları da kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Mikroyapı ve alaşım elementlerinin korozyon davranışına olan etkisinin anlaşılması için seçilmiş, farklı kalitedeki çeliklerin standartlarda belirtilen kimyasal bileşimleri Tablo 3.1'de belirtilmektedir. Bu çeliklerin her birinden üçer tane kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada ısıl işlemli ve ısıl işlemsiz beton çeliği de kullanılmıştır.

Kalite	Çelik	% Ağırlık							
Standartı	Kalitesi	С	Cr	Мо	Mn	Si	Р	S	
TS EN 10080 (TS 708)	III a	0.40 mak					0.050 mak	0.050 mak	
TS EN 10080 (TS 708)	IV a	0.22 mak					0.050 mak	0.050 mak	
AISI/SAE	1040	0.37-0.43			0.60-0.90		0.40 mak	0.50 mak	
EN	42CrMo4	0.38-0.45	0.90-1.20	0.15-0.25	0.50-0.80	0.17-0.37	0.035 mak	0.035 mak	
AISI/SAE	5140	0.38-0.43	0.80-1.05		0.70-0.90	0.15-0.30	0.035 mak	0.04 mak	
EN	41Cr4	0.38-0.43	0.90-1.10		0.70-0.90	0.15-0.30	0.035 mak	0.04 mak	

Tablo 3.1: Deneylerde kullanılan çelik numunelerin standartlarda verilen bileşim aralıkları [16].

Kalite	Çelik	% Ağırlık										
Standartı	Kalitesi	С	Cr	Mo	Mn	Si	Ni	Al	Cu	Р	S	Ceq
TS EN 10080 (TS 708)	708 III a	0,27	0,13	0,01	0,80	0,18	0,10	0,005	0,39	0,026	0,064	0,49
TS EN 10080 (TS 708)	708 IV a	0,18	0,14	0,01	1,23	0,22	0,12	0,005	0,57	0,022	0,053	0,50
AISI/SAE	1040	0,38	0,06	0,02	0,66	0,23	0,09	0,012	0,20	0,011	0,021	0,56
EN	42CrMo4	0,39	1,03	0,20	0,83	0,22	0,10	0,014	0,20	0,007	0,007	0,83
AISI/SAE	5140	0,40	0,85	0,01	0,81	0,24	0,07	0,024	0,10	0,012	0,004	0,76
EN	41Cr4	0,40	1,06	0,02	0,75	0,23	0,07	0,015	0,12	0,013	0,005	0,79

 Tablo 3.2: Deneyde kullanılan çelik numunelerin belirlenen % ağırlık kimyasal bileşimleri.

Yukarıdaki tabloda belirtilen karbon eşlenik değerleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15}$$
(3.1)

3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Bütün ısıl işlemler Heraus marka Labaratuar tipi Yatay Hazneli Tüp Fırın'da gerçekleştirilmiştir. Sıcak Bakalite alma işlemi Metamount marka pnomatik sistemli kalıplama makinasında yapılmıştır. Bakalite alınmış metal numunelerin zımpara ve parlatma işlemleri Metkon-Forcipol 2V cihazında yapılmıştır. Mikro Sertlik ölçümü Shimadzu marka cihazda yapılmıştır. Mikroyapı incelemesi Olympus marka genel amaçlı mikroyapı inceleme cihazında gerçekleştirilmiştir. Ağırlık ölçümlerinde 1/1000 gram ölçebilen A&d Company LTD. imalatı olan hassas terazi kullanılmıştır.

3.3 Deneylerin Yapılışı

1. Her bir çelik tipinden ikişer tane numune alarak Yatay Hazneli Tüp Fırında ısıl işlemler uygulanmıştır. Demir-Karbon denge diyagramından uygun ısıl işlem sıcaklığını tespit etmek için her bir çeliğin içerisindeki Ceq hesaplanmıştır.

2. Toplamda 6 farklı kaliteden olan Çelik numuneler, aşağıda belirtilen ısıl işlemlere tabi tutulmuştur.

i. 900°C de 1 saatlik östenitleme sonrası suda soğutma.

ii. 900°C de 1 saatlik östenitleme sonrası fırında kendi halinde soğutma.

iii. 900°C de 1 saatlik östenitleme ve suda soğutmanın sonrasında 400°C de 1 saat süre ile temperleme.

3. Çalışmada TS 708 IIIa ve TS 708 IVa kalite çelikler ısıl işlem yapılmadan orjinal mikroyapıları ile de kullanılmışlardır. TS 708 IVa kalite tempcore çelikleri haddeleme işleminden sonra su duşundan geçirilerek yüzeyinin martensite dönüşümü sağlanır. Yüzeydeki martensit yapı sıcak iç bölgenin ısısı ile temperlenmektedir. Yani tempcore çeliklerin dış yüzeyi temperlenmiş martensittir. TS 708 IIIa çelikleri haddeleme sonrası doğal olarak soğuduğu için perlitik yapıdadır. Nervürlü olan bu çeliklerle nervürleri kaldırıldıktan sonra düz yüzeyli olarak daldırmalı korozyon testleri yapılmıştır.

4. Deneylerde kullanılan numunelerin her biri daldırma korozyonu numunesi ve mikroyapı incelemesi yapılmak üzere ikiye kesilmiştir.

5. Sıcak bakalitleme işleminden sonra metalografik olarak yüzeyi parlatılmış numuneler, %2'lik nital ile dağlanıp, mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Daha sonra, Vickers Sertlik Ölçme Cihazı ile sertlik ölçümleri yapılmıştır.

6. Kesilen diğer numunelerle, yüzey pürüzleri giderildikten sonra, 1 Molarlık HCl çözeltisi içerisinde daldırma korozyonu çalışması yapılmıştır.

7. Daldırma korozyonunda, numunelerin 1 Molarlık 250 ml HCl çözeltisi içerisinde gün aşırı ağırlıkları ölçülerek ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Ağırlı kaybı testleri her numuneye birer hafta süreyle uygulanmıştır.

3.4 Deney Sonuçları ve İrdeleme

Yapılan ısıl işlem deneyleri ile elde edilen mikroyapıların fotoğrafları, mikroyapının ve alaşım elementlerinin zayıf asidik ortamdaki korozyona olan etkilerinin incelendiği sonuçlar aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

3.4.1 Isıl İşlemlerle Elde Edilen Farklı Mikroyapıdaki Çelikler

Mikroyapı ve sertlik birbiriyle doğrudan ilişkili olduğu için, numunelerin mikroyapı incelemeleri yanında sertlik analizleri de yapılmıştır.

3.4.1.1 Martensit Mikroyapıdaki Çelikler

900°C'de 1 saatlik östenitleme sonrası suda sertleştirilerek martensitik yapı kazandırılan çeliklerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



a. AISI/SAE 1040 çeliği, 704 Hv \approx 60 HRC



b. EN 42CrMo4 çeliği, 712 Hv \approx 61 HRC



c. AISI/SAE 5140 çeliği, 629 Hv \approx 57 HRC



d. EN 41Cr4 çeliği, 706 Hv \approx 60 HRC

Şekil 3.1 (a, b, c, d): 900°C'de 1 saat östenitlemeden sonra suda soğutulan çeliklerin mikroyapı fotoğrafları

Şekil 3.1 incelendiğinde mikroyapılarında keskin köşeleri olan martensit yapısı gözükmektedir.

Yukarıdaki şekillerin açıklama kısmında belirtilmiş olan yüksek sertlik değerleri uygulanan ısıl işlem sonrasında elde edilen mikroyapıların martensit olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

900°C'de 1 saat östenitleme sonrasında yüzey merkezli kafes yapısına sahip östenit fazına geçiş yapılmış olunur. Suda gerçekleştirilen ani soğutma sonrasında faz değişikliği sonucu hacim merkezli kafes yapıya geçilmesi gerekirken, difüzyona fırsat olmadığı için bu geçiş gerçekleşemez. Sunuçta, kararsız bir yapı olan martensit elde edilir.

Martenstit, karbon atomlarının difüzyonsuz geçişten dolayı sıkışıp kaldığı, hacim merkezli tetragonal kafes yapıya sahiptir.

3.4.1.2 Perlit Mikroyapıdaki Çelikler

900°C'de 1 saatlik östenitleme sonrası fırında kendi halinde soğumaya bırakılan çelik numuneler, beklendiği gibi perlit yapısını kazanmıştır. Bu yapıların fotoğrafları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



a. AISI/SAE 1040 çeliği, 167 HV



b. EN 42CrMo4 çeliği, 211 HV



c. AISI/SAE 5140 çeliği, 186 HV



d. EN 41Cr4 çeliği, 201 HV

Şekil 3.2 (a, b, c, d): 900°C'de 1 saat östenitlemeden sonra firinda soğutulan çeliklerin mikroyapı fotoğrafları

Şekil 3.2'de verilen, yavaş soğutma sonucu elde edilen perlit yapıları, martensit yapıya göre çok daha küresel morfolojiye sahiptir. Ölçülen sertlik değerleri de son derece düşük olup, ancak perlit yapısında elde edilebilecek büyüklüktedir.

3.4.1.3 Temperlenmiş Martensit Mikroyapıdaki Çelikler

Östenitleme işleminden sonra suda soğutularak martensit yapısı kazandırılan çelik numuneler, sonrasında 400°C'de 1 saat süre ile temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu çelik numunelerin mikroyapılarının fotoğrafları Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



a. AISI/SAE 1040 çeliği, 394 HV \approx 40 HRC



b. EN 42CrMo4 çeliği, 438HV≈ 44 HRC



c. AISI/SAE 5140 çeliği, 411 HV≈ 41 HRC



d. EN 41Cr4 çeliği, 411 HV \approx 42 HRC

Şekil 3.3 (a, b, c, d): Östenitleme ve suda soğutma sonrası 400°C'de 1 saat temperlenen çeliklerin mikroyapı fotoğrafları

Şekil 3.3'de elde edilen mikroyapılar, ani soğutma sonrası yüksek sertliğe sahip olan martensitik yapının 1 saat süre ile temperleme işlemine tabi tutulması sonucu oluşan temperlenmiş martensittir. Bu mikroyapı martensitik yapıya göre çok daha küresel bir morfolojiye sahip olup, perlitik ve martensitik arası sertlik değerine sahiptir.

3.4.1.4 Beton Çelikleri

İnşaat ve yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan beton çeliklerinden ısıl işlemli tempcore (TS 708 IVa) ve diğer TS 708 IIIa kalite beton çeliği numunelerinin kesitlerinden alınmış mikroyapı fotoğrafları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de verilmiştir. Şekil 3.4'de görülen mikroyapı, beton çelik çubuğu yüzeye yakın bölgesinin tempcore prosesi işlemi ile oluşan, tipik temperlenmiş martensit yapısıdır. Şekil 3.5'de görülen mikroyapı ise geleneksel beton çeliği üretimi ile oluşan tipik perlitik-ferritik mikroyapıdır.



Şekil 3.4: TS 708 IVa Tempcore çeliğinin orjinal halinin yüzeye yakın bölgesinin mikroyapı fotoğrafi, 331HV



Şekil 3.5: TS 708 IIIa Çeliğinin orjinal halinin yüzeye yakın bölgesinin mikroyapı fotoğrafi, 230 HV

Laboratuvarda 900°C'de 1 saatlik östenitleme sonrası suda sertleştirilerek martensit yapısı kazandırılan beton çeliklerinin mikroyapı fotoğrafları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6: TS 708 IVa Tempcore beton çeliğinin martensitik ısıl işlemi sonrası mikroyapı fotoğrafi 420HV ≈ 42 HRC



Şekil 3.7: TS 708 IIIa beton çeliğinin martensitik ısıl işlemi sonrası mikroyapı fotoğrafi 437 $HV \approx 44 HRC$

Laboratuvarda östenitleme işleminden sonra suda soğutularak martensitik yapı kazandırılan TS 708 IVa tempcore ve TS 708 IIIa kalite beton çeliği numuneler sonrasında, 400°C'de 1 saat süre ile temperleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu çelik numunelerin temperlenmiş martensit yapısındaki mikroyapılarının fotoğrafları Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da gösterilmiştir.



Şekil 3.8: TS 708 IVa tempcore çeliğinin su verme ve temperleme ısıl işlemi sonrası mikroyapı fotoğrafı, 350 HV ≈ 36 HRC



Şekil 3.9: TS 708 IIIa çeliğinin su verme ve temperleme ısıl işlemi sonrası mikroyapı fotoğrafı, 363 HV ≈ 37 HRC

Laboratuvarda 900°C'de 1 saatlik östenitleme sonrası fırında kendi halinde soğumaya bırakılan TS 708 IVa Tempcore ve TS 708 IIIa kalite beton çeliği numuneleri beklendiği gibi perlit yapısını kazanmıştır. Bu çeliklerin mikroyapılarının fotoğrafları Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10: TS 708 IVa tempcore çeliğinin östenitleme sonrası yavaş soğutma ile elde edilen mikroyapısının fotoğrafi, 187 HV



Şekil 3.11: TS 708 IIIa çeliğinin östenitleme sonrası yavaş soğutma ile elde edilen mikroyapısının fotoğrafı, 177 HV

3.4.2 Mikroyapıların Korozyon Davranışına Etkileri

Farklı ısıl işleme ve mikroyapıya sahip TS 708 IVa çeliğinin daldırma korozyonundaki davranışı şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12: Farklı mikroyapılara sahip TS 708 IVa tempcore çeliğinin korozyon davranışı

Farklı ısıl işleme ve mikroyapıya sahip TS 708 IIIa çeliğinin daldırma korozyonundaki davranışı şekil 3.13'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Farklı mikroyapılara sahip TS 708 IIIa çeliğinin korozyon davranışı

Yüzeyi temperlenmiş martensit yapıya sahip olan orjinal TS 708 IVa tempcore çeliği ile perlit yapıdaki yüzeye sahip orijinal TS 708 IIIa çeliğinin korozyon eğilimlerinin karşılaştırılması Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Orjinal TS 708 IIIa ve TS 708 IVa kalite beton çeliklerinin korozyon davranışı

AISI/SAE 1040 Çeliğinin farklı ısıl işlemlerle elde edilen mikroyapılarının daldırmalı korozyondaki davranışı şekil 3.15'de gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Farklı yapılara sahip AISI/SAE 1040 çeliğinin korozyon davranışı

EN 42CrMo4 Çeliğinin farklı ısıl işlemlere maruz bırakıldıktan sonra göstermiş olduğu korozyon direnci Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16: Farklı yapılara sahip EN 42CrMo4 çeliğinin korozyon davranışı

AISI/SAE 5140 Çeliğinin farklı ısıl işlemlere maruz bırakıldıktan sonra göstermiş olduğu korozyon direnci Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17: Farklı yapılara sahip AISI/SAE 5140 çeliğinin korozyon davranışı

EN 41Cr4 çeliğinin farklı ısıl işlemlere maruz bırakıldıktan sonra göstermiş olduğu korozyon direnci Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18: Farklı yapılara sahip EN 41Cr4 çeliğinin korozyon davranışı

3.4.3 Farklı Bileşime Sahip Çeliklerin Korozyon Davranışı

Günaşırı yapılan ölçümlerden elde edilen veriler sonucu suda soğutma ile elde edilen martensit yapıya sahip numunelerin zamana göre kütle kaybı eğilimleri Şekil 3.19 da gösterilmektedir.



Şekil 3.19: Su soğutmalı martensit yapılı farklı çeliklerin korozyon davranışı

Şekil 3.20'de ise suda soğutma sonrasında 400°C'de meneviş işlemi görmüş, temperlenmiş martensit yapıya sahip olan numunelerin korozyon davranışı görülmektedir.



Şekil 3.20: Temperlenmiş martensit yapılı farklı çeliklerin korozyon davranışı

Numunelerin firin içerisinde kendi halinde soğumaya bırakılması sonucu elde edilen perlit yapısına sahip numunelerin korozyon davranışları Şekil 3.21'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.21: Perlit yapılı farklı çeliklerin korozyon davranışı

Daldırmalı korozyon testleri sonrasında elde edilen grafikler incelendiğinde, karbon bileşimi bakımından birbirine yakın olan imalat çeliklerinden, yüksek kroma sahip olanlar, diğerlerine kıyasla düşük korozyon hızına sahip oldukları anlaşılmaktadır.

Mikroyapıların korozyon hızına olan etkisini gösteren grafikler incelendiğinde ise en düşük korozyon hızına sahip olan çeliklerin perlit mikroyapısına sahip oldukları görülmektedir. Ayrıca, aynı kalite çeliklerden martensitik mikroyapıya sahip olanların, temperlenmiş martensit ve perlit yapıdaki çeliklere oranla daha yüksek korozyon hızlarına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

4. SONUÇLAR VE İRDELEME

AISI/SAE 1040, EN 42CrMo4, EN 41Cr4, AISI/SAE 5140, TS 708 IIIa, TS 708 IVa kalite çeliklerin ve bu çeliklere uygulanan farklı ısıl işlemlerle elde edilen mikroyapıların 1 Molarlık HCl çözeltisi içerisinde ağırlık kaybı ile belirlenen korozyon davranışları aşağıda belirtilmiştir.

Aynı kalitede farklı mikroyapılardaki çeliklerin korozyon davranışları farklıdır.
 Martensitik mikroyapıya sahip çelikler en fazla korozyona uğramaktadır.

2) Aynı kalitedeki, perlit mikroyapısına sahip çelikler en az korozyona uğrayan çeliklerdir.

3) Temperlenmiş martensit mikroyapısına sahip çelikler martensitik mikroyapıya sahip çeliklere göre daha az, perlitik mikroyapıya sahip çeliklere göre daha yüksek korozyon hızına sahiptir.

4) Perlitik mikroyapıya sahip çelikler; çeliğin soğuması sırasında, bünyesinde bulunan karbon atomlarının yavaş bir şekilde difüzyonu sonucu hacim merkezli kafes yapısındaki demir atomlarının aralarındaki yerini almış olduğu çeliklerdir. Bunun sonucunda, enerji seviyeleri düşüktür. Martensitik mikroyapıya sahip çeliklerde ise, içerisindeki karbon atomları ani soğutma esnasında difüzyon imkanı bulamadıklarından ideal enerji seviyelerinde değillerdir. Bu nedenle martensitik çelikler korozyona daha az dirençlidirler.

5) Perlit miktarı arttıkça yapıdaki stabil özellik de artar. Perlit yapısına sahip numunelerin korozyon hızlarının martensit yapıya sahip numunelere göre daha yavaş olması buna bağlanabilir.

6) Tempcore imalat yöntemiyle üretilmiş olan yapı çeliği, klasik yöntemlerle üretilen yapı çeliğine göre daha yüksek akma ve çekme mukavetine sahiptir. Fakat, yüzeyinin temperlenmiş martensit yapısına sahip olmasından ötürü perlit yapılı yüzeye sahip olan klasik çeliğe göre zayıf asidik ortamdaki korozyon direnci biraz daha düşüktür. 7) Literatürde kısa vadelerde krom ve molibdenin korozyon hızını düşürdüğü belirtilmektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar da literatürlerde verilen bilgilere uygundur. Bileşiminde daha yüksek krom bulunan çeliklerin, korozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, kimyasal bileşiminde molibden bulunan EN 42CrMo4 çeliği, diğer çeliklere göre daldırmalı korozyon testlerinde daha az kütle kaybına uğramıştır.

KAYNAKLAR

- Bentur A., Diamond S. and Berke N.S., 1997. Steel Corrosion In Concrete, pp. 1-82, Syndetio Solutions LLC, Sidney.
- [2] Mietz J., Polder R. and Elsener B. 2000. Corrosion of Reinforcement in Concrete, European Federation of Corrosion Publications, 31, 1-23.
- [3] **B. Elsener**, 2001. Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete, *European Federation of Corrosion Publications*, **35**, 35-50.
- [4] Doruk M, 1972. Korozyon Olayının Elektrokimyasal İlkeleri, ODTÜ Mühendislik Fakültesi, Ankara.
- [5] http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Sect19/FeOpH0.jpg
- [6] G 31-72, 1995. Standart practice for laboratory immersion corrosion testing of metals, ASTM, USA.
- [7] Cebeci E, 1988. Betonda Karbonatlaşma, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Berke N. S. and Escalante E., 1996. Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures, West Conshohocken ASM International, USA.
- [9] http://www.sciencedirect.com, 2004. "Microstructural influence on the electro chemical corrosion behaviour of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution", P.P. Sarkar1, P. Kumar, Manas Kumar Manna, P.C. Chakraborti, Metallurgical Engineering Department, Jadavpur University, Kolkata 700 032, India.
- [10] Uhlig H. H., 1971. Corrosion and Corrosion Control, John Wiley, New York.

- [11] Uhlig H. H., 1948. The Corrosion Handbook, John Wiley, New York.
- [12] http://www.sciencedirect.com 2005 "Non-Faraday Material Loss in Flowing Corrosive Solution", internet, Department of Chemical and Materials Engineering, H.X. Guo, B.T. Lu, J.L. Luo, University of Alberta, Canada.
- [13] http://www.sciencedirect.com, 2005 "Electrochemical studies on the alternating Current corrosion of mild steel under cathodic protection Condition in marine environments", Dae-Kyeong Kima, Srinivasan Muralidharan, Tae-Hyun Haa, Jeong-Hyo Baea.
- [14] http://www.sciencedirect.com, 2005 "Corrosion Inhibition of mild steel by plant extract in dilute HCl medium" Naval Materials Research Laboratory, India.
- [15] http://www.elsevier.com/locate/corsci, 2003. Effect of small compositional changes on marine immersion corrosion of low alloy steels, Robert E. Melchers.
- [16] Topbaş M. A, 1998. "Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı", Prestij yayıncılık, İstanbul.

EK A

Celik Kalitesi	Zaman Gün	Y. Alanı mm ²	İlk Ağırlık ma	Son Ağırlık ma	Kavip mg
y on in tuntoor	1	2107	16001	15930	71
4	2	2107	15932	15835	97
N N N	3	2107	15839	15697	142
ວັ	4	2107	15702	15515	187
42	5	2107	15519	15266	253
E N	6	2107	15271	14910	361
	7	2107	14916	14403	513
	1	2297	15396	15308	88
_	2	2297	15311	15188	123
5	3	2297	15193	15025	168
410	4	2297	15031	14802	229
Z	5	2297	14807	14458	349
ш	6	2297	14462	13961	501
	7	2297	13963	13322	641
	1	2085	15833	15721	112
140	2	2085	15724	15587	137
51	3	2085	15591	15407	184
AE	4	2085	15412	15153	259
S/IS	5	2085	15159	14768	391
AIS	6	2085	14771	14269	502
	7	2085	14275	13601	674
-	1	2052	15602	15471	131
040	2	2052	15473	15305	168
7	3	2052	15309	15070	239
3AE	4	2052	15073	14732	341
31/3	5	2052	14736	14256	480
AIS	6	2052	14261	13598	663
	7	2052	13607	12695	912
	1	1372	29221	29139	82
<u>a</u>	2	1372	29143	29032	111
=	3	1372	29036	28877	159
200	4	1372	28885	28672	213
IS	5	1372	28681	28369	312
•	6	1372	28378	27975	403
	7	1372	27982	27440	542
	1	1522	34465	34371	94
/a	2	1522	34378	34257	121
8	3	1522	34261	34072	189
10	4	1522	34093	33856	237
TS	5	1522	33862	33493	369
	6	1522	33527	33076	451
	7	1522	33081	32439	642

 Tablo A.1: Martensit mikroyapısındaki çeliklerin kütle kaybı ölçümleri

Çelik Kalitesi	Zaman Gün	Y. Alanı mm ²	İlk Ağırlık mg	Son Ağırlık mg	Kayıp mg
	1	1995	15469	15416	53
40	2	1995	15419	15343	76
ž	3	1995	15344	15242	102
SC	4	1995	15246	15111	135
4	5	1995	15114	14938	176
E	6	1995	14939	14691	248
	7	1995	14695	14313	382
	1	2172	15326	15257	69
4	2	2172	15259	15160	99
ċ	3	2172	15163	15046	117
4	4	2172	15049	14899	150
Z	5	2172	14902	14666	236
ш	6	2172	14669	14357	312
	7	2172	14362	13919	443
0	1	2105	16084	15989	95
140	2	2105	15994	15881	113
ů.	3	2105	15887	15738	149
AE	4	2105	15741	15544	197
S/I	5	2105	15549	15300	249
VIS	6	2105	15306	14979	327
4	7	2105	14986	14493	493
0	1	2081	15720	15608	112
040	2	2081	15611	15468	143
, ,	3	2081	15473	15299	174
AE	4	2081	15304	15066	238
S/IS	5	2081	15071	14743	328
AIS	6	2081	14747	14246	501
	7	2081	14251	13532	719
	1	1372	29195	29122	73
Та	2	1372	29131	29044	87
II	3	1372	29053	28947	106
08	4	1372	28956	28805	151
2.7	5	1372	28813	28631	182
μ	6	1372	28642	28388	254
	7	1372	28399	28054	345
	1	1572	36538	36452	86
a	2	1572	36461	36357	104
2	3	1572	36367	36232	135
302	4	1572	36249	36062	187
S	5	1572	36085	35836	249
	6	1572	35874	35573	301
	7	1572	35614	35183	431

 Tablo A.2: Perlit mikroyapısındaki çeliklerin kütle kaybı ölçümleri

Çelik Kalitesi	Zaman Gün	Y. Alanı mm ²	İlk Ağırlık mg	Son Ağırlık mg	Kayıp mg
	1	2035	15469	15407	62
64	2	2035	15407	15316	91
Σ	3	2035	15318	15187	131
SC	4	2035	15192	15021	171
4	5	2035	15025	14802	223
L L	6	2035	14805	14493	312
	7	2035	14497	14059	438
	1	2152	15326	15245	81
-	2	2152	15251	15136	115
L S	3	2152	15138	14990	148
41	4	2152	14991	14794	197
Z	5	2152	14797	14499	298
ш	6	2152	14503	14100	403
	7	2152	14103	13561	542
•	1	2123	16084	15975	109
140	2	2123	15979	15847	132
Ú.	3	2123	15851	15683	168
AE	4	2123	15684	15457	227
VISI/S	5	2123	15461	15120	341
	6	2123	15122	14661	461
4	7	2123	14668	14035	633
•	1	2063	15720	15597	123
040	2	2063	15600	15445	155
	3	2063	15449	15246	203
AE	4	2063	15247	14969	278
S/I	5	2063	14973	14582	391
VIS	6	2063	14583	14029	554
4	7	2063	14041	13237	804
	1	1405	29195	29117	78
а	2	1405	29122	29020	102
	3	1405	29029	28900	129
08	4	1405	28904	28725	179
2	5	1405	28711	28470	241
Ĕ	6	1405	28479	28123	356
	7	1405	28134	27641	493
	1	1541	35708	35616	92
a	2	1541	35625	35504	121
2	3	1541	35514	35358	156
.08	4	1541	35378	35163	215
2.2	5	1541	35186	34885	301
μĔ	6	1541	34911	34479	432
	7	1541	34514	33934	580

 Tablo A.3: Temperlenmiş martensit mikroyapısındaki çeliklerin kütle kaybı

 ölçümleri

EK B

t	Çelik Standartı	1.gün	2.gün	3.gün	4.gün	5.gün	6.gün	7.gün	Ki
	EN 42CrMo4	33	46	67	88	120	171	243	ütle
JSİ	EN 41Cr4	38	53	73	99	152	218	279	ରି ନ
rtei	AISI/SAE 5140	54	66	88	124	187	240	323	ay≵ µ/m
Маі	AISI/SAE 1040	64	82	116	166	234	323	444	2°
_	TS 708 IIIa	61	79	124	155	242	296	421	Ora
	TS 708 IVa	59	81	115	155	227	293	395	n

Tablo B.1: Martensit mikroyapısındaki çeliklerin korozyon hızları

Tablo B.2: Perlit mikroyapısındaki çeliklerin korozyon hızları

Perlit	Çelik Standartı	1.gün	2.gün	3.gün	4.gün	5.gün	6.gün	7.gün	Kütle Kaybı Ora (g/m²)
	EN 42CrMo4	26	38	51	67	88	124	191	
	EN 41Cr4	31	41	54	69	108	143	203	
	AISI/SAE 5140	45	53	70	93	118	155	234	
	AISI/SAE 1040	53	68	83	114	157	240	345	
	TS 708 IIIa	53	63	77	110	132	185	251	
	TS 708 IVa	54	66	85	118	158	191	274	nı

Tablo B.3: Temperlenmiş martensit mikroyapısındaki çeliklerin korozyon hızları

Temperlenmiş Martensit	Çelik Standartı	1.gün	2.gün	3.gün	4.gün	5.gün	6.gün	7.gün	Kütle Kaybı Orai (g/m²)
	EN 42CrMo4	30	44	64	84	109	153	215	
	EN 41Cr4	37	53	68	91	138	187	251	
	AISI/SAE 5140	50	62	79	106	160	217	298	
	AISI/SAE 1040	58	75	98	134	189	268	389	
	TS 708 IIIa	55	72	92	127	171	253	350	
	TS 708 IVa	59	78	101	139	195	280	376	nı

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Kocaeli-Gölcük'te doğmuştur. 2000 yılında Sakıp Sabancı Anadolu Lisesinden mezun olmuştur. 2005 yılında Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde lisans eğitimini tamamlamış, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalı Üretim Metalurjisi ve Teknolojileri Mühendisliği programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2008 yılında bitirme durumundadır. Yüksek Lisans Eğitiminini ilk yılı boyunca Sistem Teknik Endüstri Ltd. Şirketinde Arge Mühendisi olarak, ikinci yılında ise Dökmaş Döküm Malzemeleri Ltd. Şirketinde Dış İlişkiler Sorumlusu olarak çalışmıştır.