

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS

KOROZYONLU BETONARME KOLONLARIN DENEYSEL
KOROZYON SEVİYELERİNİN EŞDEĞER AKIM
YOĞUNLUĞUNA BAĞLI OLARAK TEORİK KOROZYON
SEVİYELERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

Umytjan YANGİBAYEV

Danışman: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2023
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOROZYONLU BETONARME KOLONLARIN DENEYSEL KOROZYON SEVİYELERİNİN EŞDEĞER AKIM YOĞUNLUĞUNA BAĞLI OLARAK TEORİK KOROZYON SEVİYELERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

Umytjan YANGİBAYEV

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

Korozyon ürünlerinin oluşumundan ödün verilmeksizin, istenen korozyon oranlarının elde edilebilmesi için eşdeğer akım kullanılarak korozyonun hızlandırılmasının bilimsel gerekçesi güçlüdür. Uygulanan eşdeğer akım tekniği, beton içerisine gömülü olan donatı çubuklarını belirli sabit oranlarda korozyona uğratma avantajına sahip olsa da, eşdeğer akım tarafından tesir ettirilen korozyon oranı, gerçek korozyon oranını tam olarak yansıtamaz. Teorik ve gerçek korozyon kütle kayıplarının aynı olmamasının gerekçeleri; betonun direnci, donatı çubuğunun bileşimi, betondaki minerallerin elektriksel özellikleri gibi çeşitli faktörlere atfedilmektedir. Bu araştırmanın amacı, yazarların bilgisi dâhilinde olmak üzere, farklı beton basınç seviyelerinde korozyona maruz kalmış 24 betonarme kolon numunelerinin, daha önceden kaydedilmiş olan korozyon akım yoğunluk ölçümleri ile oluşturulan deneysel veriler kullanılarak, hesap edilen teorik korozyon oranı ile gerçek korozyon oranı arasında deneye dayalı bir ilişki kurmaktır. Geliştirilecek olan deneye dayalı model kullanılarak elde edilen deneysel bulguların, literatürde bildirilen teorik bir model kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması planlanmıştır. Böylece, tahribatsız olarak ölçülen eşdeğer akım değerleri kullanılarak, donatı korozyonunun daha sağlıklı değerlendirilebileceği beklenmektedir.

2023, 36 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Betonarme kolon, Eşdeğer akım yoğunluğu, Korozyon

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPARISON OF EXPERIMENTAL CORROSION LEVELS OF CORRODED REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH THEORETICAL CORROSION LEVELS BASED ON EQUIVALENT CURRENT DENSITY

Umytjan YANGİBAYEV

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Atila KUMBASAROĞLU

There is a strong scientific rationale for accelerating corrosion by using an equivalent current to achieve desired corrosion ratios without compromising the formation of corrosion products. Although the applied equivalent current technique has the advantage of corroding the rebar embedded in the concrete at certain constant rates, the corrosion ratio induced by the equivalent current cannot fully reflect the actual corrosion ratio. Reasons why theoretical and actual corrosion mass losses are not the same; it is attributed to various factors such as the resistance of the concrete, the composition of the rebar, the electrical properties of the minerals in the concrete. The aim of this research, to the knowledge of the authors, is to establish an empirical relationship between the calculated theoretical corrosion ratio and the actual corrosion ratio, using experimental data created with previously recorded corrosion current density measurements of 24 reinforced concrete column specimens exposed to corrosion at different concrete compressive levels. It is planned to compare the experimental findings obtained using the empirical model to be developed with the results obtained using a theoretical model reported in the literature. Thus, it is expected that reinforcement corrosion can be evaluated more accurately by using equivalent current values measured non-destructively.

2023, 36 Pages

Keywords: Reinforced concrete column, Equivalent current density, Corrosion

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimime adım attığım ilk günden itibaren desteklerini bir an olsun üzerimizden esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle yolumu aydınlatıp, ufkumu açan çok değerli bilim insanı danışman hocam Doç. Dr. Atila KUMBASAROĞLU' na Bölüm Başkanımız, Sayın Prof. Dr. Hakan YALÇINER' e, Arş. Gör. Ahmet İhsan TURAN' a, Arş. Gör. Alper ÇELİK' e, ve sevgileriyle, dualarıyla beni her zaman cesaretlendiren, destekleyen canım aileme teşekkür ederim.

Umytjan YANGİBAYEV
Ocak, 2023



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
2.1. Korozyon Deneyleri	2
3. KURAMSAL TEMELLER.....	4
3.1. Betonarme	4
3.2. Korozyon ve Mekanizması.....	4
3.2.1. Korozyon reaksiyonları	5
3.2.2. Çevresel etkiler.....	5
3.2.3. Korozyon çeşitleri	11
3.2.3.1. Üniform korozyon	11
3.2.3.2. Galvanik korozyon	12
3.2.3.3. Çatlak korozyon	12
3.2.3.4. Oyuklanma korozyon	13
3.2.4. Korozyon ölçüm yöntemleri.....	13
3.2.4.1. Ağırlık kaybı yöntemi	14
3.2.4.2. Yarı hücre potansiyeli yöntemi	14
3.3. Eşdeğer Akım Yoğunluğu.....	14
3.4. Yapay Sinir Ağları	15
3.4.1. Tanım ve tarihçesi	15
3.4.2. Yapay sinir ağları kullanım alanları	16
3.4.3. Yapay sinir ağları biyolojik yapısı	17
3.4.4. Yapay sinir ağları öğrenme algoritmaları.....	17
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	20

4.1. Materyal	20
4.2. Yöntem	23
4.2.1. Hızlandırılmış korozyon yöntemi.....	23
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	24
5.1. Deneyisel ve Teorik Akım Yoğunluğu Değerleri	25
5.2. Teorik/ Gerçek Korozyon Oranları	27
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	32
KAYNAKLAR	33



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Yapının bulunduğu konuma göre maruz kalabileceği değişik deniz ortamları ve deniz suyu etkisiyle oluşabilen bozulma mekanizmaları	7
Şekil 3.2. Uniform korozyon	12
Şekil 3.3. Galvanik korozyon.....	12
Şekil 3.4. Çatlak korozyonu.....	13
Şekil 3.5. Değişik kesitlerde oyuklanma korozyonu	13
Şekil 3.6. Çok katmanlı yapay sinir ağı nöronu çalışma fonksiyonu.	16
Şekil 3.7. Sinir ağı yapısı	17
Şekil 4.1. Daha önce gerçekleştirilen çalışmada kullanılan numunelere ait kesit özellikleri	22
Şekil 4.2. Betonarme kolonların donatı kafesine bağlanan bakır teller örnek çalışma...22	
Şekil 4.3. Hızlandırılmış korozyon yöntemi (a) ve Paslandırma havuzu (b).....	23
Şekil 5.1. C8 beton basınç dayanımına sahip numunelerin teorik I_{corr} değerleri ile deneysel I_{corr} değerleri karşılaştırılması.....	26
Şekil 5.2. C20 beton basınç dayanımına sahip numunelerin teorik I_{corr} değerleri ile deneysel I_{corr} değerleri karşılaştırılması.....	26
Şekil 5.3. C30 beton basınç dayanımına sahip numunelerin teorik I_{corr} değerleri ile deneysel I_{corr} değerleri karşılaştırılması.....	27
Şekil 5.4. C8 beton basınç dayanımına sahip numunelerin gerçek Korozyon Oranı (%) ile teorik Korozyon Oranı (%) karşılaştırılması	28
Şekil 5.5. C20 beton basınç dayanımına sahip numunelerin gerçek Korozyon Oranı (%) ile teorik Korozyon Oranı (%) karşılaştırılması	29
Şekil 5.6. C30 beton basınç dayanımına sahip numunelerin gerçek Korozyon Oranı (%) ile teorik Korozyon Oranı (%) karşılaştırılması	29
Şekil 5.7. Tüm beton basınç dayanımına sahip numunelerin gerçek Korozyon Oranı (%) ile teorik Korozyon Oranı (%) karşılaştırılması	30
Şekil 5.8. Donatı yüzey alanına bağlı olarak hesaplanan I_{corr} değeri ile gravimetrik çalışma sonucunda elde edilen veriler arasındaki ilişki.....	31
Şekil 5.9. Gözlenen ve tahmin edilen değerlerin regresyon grafikleri (Teorik I_{corr} – gerçek korozyon oranı)	31

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Deniz ortamında yıpratıcı etkiler ve tuz/iyon yoğunlukları	6
Tablo 3.2. Korozyonun deniz ortamına göre riskleri	7
Tablo 3.3. Avrupa Birliği Normalizasyon Komitesi (CEN)' e göre betona çevresel etki sınıfları	8
Tablo 3.4. Betonun maruz kaldığı değişik çevresel etkiler	9
Tablo 3.5. Korozyon mekanizmasının olasılığını belirtme aktivitesini	14
Tablo 3.6. Birleştirme Fonksiyonları	18
Tablo 3.7. YSA modeli aktivasyon modelleri	19

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

A	Donatı yüzey alanı
E_{corr}	Korozyon potansiyeli
D	Donatı çapını
L	Donatı uzunluğunu
I_{app}	Uygulanan akım yoğunluğu
I_{corr}	Eşdeğer akım yoğunluğu
T	Zaman
W_i	Donatının korozyondan önceki ilk ağırlığı
W_f	Donatının korozyon sonrası ağırlığı
W	Demirin atom ağırlığının demirin değerine oranını (27.925 g)
ΔW	Kütle kaybını

Kısaltmalar

ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Avrupa Birliği Normalizasyon Komitesi
FIB	The International Federation for Structural Concrete
TS	Türk Standartları

1. GİRİŞ

Beton ile donatıdan oluşan kompozit yapı malzemesine betonarme denir. Betonarmede matris fazı beton, lif faz ise donatıdan oluşmaktadır. Şartnamelere uygun olarak üretilen beton 12-13 pH değerlerine sahip olmakla birlikte bazik davranış göstermektedir. Betonun bazik özelliği sayesinde içerisine gömülü donatı korozyona karşı korunur durumdadır. Fakat zararlı çevresel etkilerin olması durumunda ise pH seviyesi düşen beton bazik özelliğini kaybederek donatıyı korozyona karşı savunmasız bırakmaktadır. Betonarme yapıda korozyon mekanizmasının ilerlemesinin önüne geçilmediği durumlarda; donatı kesit alanında, beton ve donatının mekanik özelliklerinde, donatı ile beton arasında aderans kuvvetinde azalmalar gözlenmektedir. Artan korozyon oranıyla birlikte ise biriken korozyon ürünleri donatıyı çevreleyen pas payı tabakasını tamamen çatlatmaktadır.

Betonarme yapılarda meydana gelen donatı korozyonu ve etkileri araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışmalarla incelenmektedir. Mevcut literatür incelendiği zaman oldukça uzun yıllar sürecek korozyon oranlarını elde etmek için kullanılan en yaygın yöntemin hızlandırılmış korozyon yöntemi olduğu görülmektedir. Hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak uzun yıllar sürecek korozyon süreçleri aylar içinde tamamlanan deneylerle simüle edilebilmektedir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda elde edilen korozyon oranı değerleri genel olarak Faraday yasasına göre hesaplanan teorik kütle kayıpları ile ilişkilendirilmektedir. Fakat Faraday kanununa göre hesaplanan teorik kütle kayıpları ile gerçek kütle kayıpları değerleri arasında farkların olduğu araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur (Yalciner vd., (2012); Kumbasaroglu vd., (2019)). Araştırmacılar tarafından ortaya konulan bu durumun temel sebebi Faraday yasasının salt donatı kullanılarak elde edilmiş olmasıdır. Donatı yüzey alanının fazla olduğu betonarme elemanların hızlandırılmış korozyon yöntemi ile paslandırma sürecinde, Faraday yasası yerine eşdeğer akım yoğunluğuna bağlı modeller kullanılması ile gerçek korozyon oranına yakın değerler elde edilebilmesi muhtemeldir. Yapılan birçok deneysel çalışmada uygulanan akım yoğunluğu değerinin (I_{app}), korozyon deneylerinin tamamlanmasının ardından tespit edilen eşdeğer akım yoğunluğu (I_{corr}) değerlerine eşit olmadığı belirlenmiştir (Azer. vd.,

2005; Ahmad, 2009). Bu eşitsizliği ortadan kaldırmak ve gerçek eşdeğer akım yoğunluğunu (I_{corr}) tespit etmek amacıyla için birçok modeller önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında, Yalciner vd., (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında korozyona maruz bırakılan 24 adet betonarme kolonunun gerçek korozyon oranı değerleri ile teorik I_{corr} değerleri arasındaki ilişkiler incelenmiş olup modeller geliştirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Korozyon Deneyleri

Mevcut literatür incelendiği zaman korozyona maruz kalmış betonarme yapılarla ilgili birçok çalışma (7-8-9-10-11) yer almaktadır. Bu çalışmalar genel olarak korozyon oranının tespit edilmesi, donatı ve betonun korozyon sonucu değişen mekanik özelliklerinin araştırılması, betonarme elemanların taşıma güçlerinde meydana gelen azalmaların incelenmesi ve betonda meydana gelen çatlakların incelenmesi yönündedir. Tez çalışmasının bu bölümünde ise korozyon oranının tespit edilmesi amacıyla yapılmış deneysel çalışmalar ve elde edilmiş modeller açıklanacaktır.

Auyeung vd. (2000) yapmış oldukları çalışmada 28 MPa beton basınç dayanımına sahip numuneler kullanmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada korozyon oranları ise %0 ve %5.91 arasında değişmektedir. Auyeung vd. (2000) deneysel çalışması sonunda Faraday kanununa göre hesaplanan teorik kütle kaybı ile gerçek kütle kaybı arasında Denklem 2.1’de yer alan ilişkiyi bulmuştur.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.4651xF - 0.5624 \quad (2.1)$$

El Maaddawy vd. (2006) yapmış oldukları çalışmada 35 MPa beton basınç dayanımına sahip numuneler kullanmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada korozyon oranları %0 ile %39.3 arasında değişmektedir. El Maaddawy vd. (2006) deneysel çalışması sonunda Faraday kanununa göre hesaplanan teorik kütle kaybı ile gerçek kütle kaybı arasında Denklem 2.2’ de yer alan ilişkiyi bulmuştur.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.44F \quad (2.2)$$

Yalciner vd. (2012) yapmış oldukları çalışmada 23MPa ve 51 MPa beton basınç dayanımına sahip numuneler kullanmışlardır. Her bir beton sınıfı için 15mm, 30mm ve 45 mm paspayı kullanmıştır. Yalciner vd. (2012) yapmış olduğu deneysel çalışmada %0 ve %18.75 arasında korozyon değerleri elde etmiştir. Yalciner vd. (2012) deneysel çalışması sonunda Faraday kanununa göre hesaplanan teorik kütle kaybı ile gerçek kütle kaybı arasında Denklem 2.3' de yer alan ilişkiyi bulmuştur.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.703F - 0.15 \quad (2.3)$$

Biçer vd., (2018) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada yapmış olduğu deneysel çalışmada 250 x 400 x 2500 mm ölçülerine sahip 25 MPa beton basınç dayanımında tam ölçekli betonarme kirişler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada gravimetrik çalışmalar sonucunda tüm boyuna ve enine donatıların gerçek korozyon oranları elde edilmiştir. Biçer vd., (2018) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonunda Faraday kanununa göre hesaplanan teorik kütle kaybı ile gerçek kütle kaybı arasında Denklem 2.4'de yer alan ilişkiyi bulmuştur.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.0003F^2 - 1.843F + 4580.2 \quad (2.4)$$

Ahmad vd. (1996) yapmış olduğu çalışmada araştırmada Faraday Kanunu'na göre paslandırılan numunelerin gerçek korozyon oranlarının farklı olduğunu belirtmiştir. Elemanlarda gerçek korozyon oranını tahmin etmek için iki farklı model önermiştir.

$$I_{corr} = \frac{(W_i - W_f)}{\pi D L W T} \quad (2.5)$$

Burada I_{corr} Eşdeğer korozyon akımını, W_i donatının korozyondan önceki ilk ağırlığı (gr), W_f korozyon sonrası ağırlık (gr), T süre, D donatı çapını (mm), L donatı uzunluğunu, W demirin atom ağırlığının demirin değerine oranını (27.925 g) göstermektedir. Bu model gravimetrik verileri olduğunda kullanılabilir. Diğer modelde gravimetrik verilere ihtiyaç duyulmayıp bazı katsayılar yardımıyla I_{corr} hesaplanabilmektedir.

$$I_{corr} = 1.95 \ln(I_{app}) + 0.39 \quad (R^2=0.94) \quad (2.6)$$

Denklem 2.6, $I_{app} \geq 0,82 \text{ mA/cm}^2$ için geçerlidir. Burada I_{app} Faraday Kanunu'na göre uygulanan akımı göstermektedir.

Boğa vd. (2020) çalışmasında iki adet betonarme kolonların donatılarını iki farklı yöntemle, sabit akım ve sabit voltaj kullanarak paslandırmıştır. Betonarme elemanda kullanılan donatılarda sabit voltaj altında teorik olarak %5,49 oranında ağırlık kaybı değeri elde edilirken gerçek ağırlık kaybı % 4,44 oranında elde edilmiştir. Sabit akım altında korozyona uğratılan serilerden ise teorik ve gerçek ağırlık kayıpları sırasıyla %10,01 ve 11,68 olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak teorik ve gerçek ağırlık kaybı değerleri her iki korozyon tipinde de birbirine oldukça yakın olarak elde etmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Betonarme

Türkiye mevcut yapı stokunun üretiminin yaklaşık %90 oranında betonarme taşıyıcı sistemine sahip olduğu bilinmektedir. Bu durum beton ve donatının birlikte kullanımı sonucu meydana getirilen betonarme kompozit malzemenin ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Beton yapı malzemesi olarak çimento, uygun boyutlarda agrega, gerektiği durumlarda katkı malzemeleri ve suyun homojen bir şekilde belirli sıra/süre ile karıştırılmasıyla elde edilen yapı malzemesi olarak isimlendirilebilir. Betonlu oluşturan önemli malzemelerden olan çimento; ince kum ve iri agrega taneleri arasında bağlayıcılığı sağlar. İnce yapıdaki agregalar ise iri agregaların kullanılması sonucu meydana gelen boşlukları doldurup beton elemanına etki edecek kuvvetlere karşı koymasına yardımcı olur (Postacıoğlu, 1975). Beton yapısal özelliğinden dolayı çekme dayanımı basınç dayanımına göre oldukça düşük gevrek bir malzemedir. Betonun çekme dayanımı ile basınç dayanımı değerlerinin birbirleriyle olan ilişkisi birçok deneyde incelenmiş olup araştırmacılar tarafından, betonun çekme dayanımının basınç dayanımının % 7 si ile % 17 arasında değiştiği sonucuna varılmıştır (Erdoğan, 2003). Beton yapı malzemesinin taşıyıcı sistemlerde kullanılması betonun zayıf özelliği olan çekme dayanımının, beton içine yerleştirilen donatı sayesinde artırılması sonucu elde edilen kompozit malzeme olan betonarme ile mümkün olmuştur.

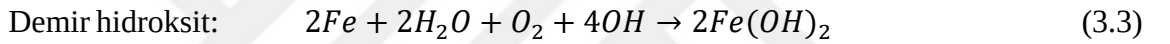
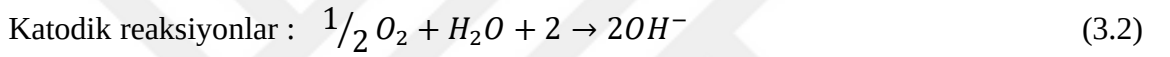
3.2. Korozyon ve Mekanizması

Çevresel etkilerin meydana getirdiği elektrokimyasal etkiyle malzemede meydana gelen tahribata(kesit azalması, malzeme içyapısında bozulmalara korozyon denir. Özellikle metallerde büyük sorunlara yol açan korozyon mekanizması yapılarda yol açtığı emniyet

sorunlarına ek olarak büyük ekonomik kayıpları da beraberinde getirmektedir. Betonarme yapılarda oluşum mekanizması oldukça karışık olan korozyon mekanizmasının oluşum aşamasını genel haliyle ikiye ayırmak mümkündür. Bunlardan ilki kimyasal eriyiklerin meydana getirdiği doğrudan korozyon, diğer mekanizma ise çevresel etkilerin meydana getirdiği elektrokimyasal korozyondur.

3.2.1. Korozyon reaksiyonları

Korozyon mekanizmasının gelişim aşaması ilgili hücrelerinin anot ve katodunda eş zamanlı meydana gelen indirgenme ve yükseltgenme mekanizmaları ile gerçekleşmektedir.



Betonun elektrik direnci ve mevcut iyon oranı çelik donatı korozyonunu doğrudan etkilemektedir. Korozyon sonucu oluşan demir-2 hidroksit ortamda yeterli oksijen bulunması halinde yeniden oksitlenerek demir-3 hidroksit (pas) haline dönüşür.



Oluşan demir-3 hidroksit uygun koşulların bulunması halinde γ Fe_2O_3 halinde demir yüzeyine yapışarak demirin pasifleşmesini sağlar. Eğer ortamda klorür iyonları gibi aktif özellikte iyonlar varsa, korozyon sonucu oluşan demir iyonları klorür ile birleşerek suda kolay çözünebilen demir klorür haline dönüşür ve demir yüzeyinden uzaklaşır. Bu reaksiyonlardan görüldüğü üzere, nötral bir ortamda korozyon olayının yürümesi için mutlaka oksijene ve de suya ihtiyaç vardır.

3.2.2. Çevresel etkiler

Betonarme yapılarda korozyon mekanizmasının meydana gelmesinde beton içyapısına ek olarak çevresel etkilerin de büyük rolü olabilmektedir. Örneğin kıyı yapılarında doğrudan veya dolaylı yollardan korozyona maruz kalan betonarme elemanlarında zamanla fiziksel ve kimyasal bozulmalar meydana gelmektedir. Kıyı yapılarında meydana gelen bu

bozulmaların temel sebeplerini sülfat kaynaklı, karbonik asit kaynaklı, klorür kaynaklı, donma çözülme kaynaklı ve aşınma kaynaklı bozulmalar olarak sıralayabiliriz. Tablo 1’de Türkiye kıyı yapılarında meydana gelebilecek bozulmalara referans olması niteliğiyle deniz suyunun mineral dağılımı ve olası bozulma tipleri gösterilmiştir.

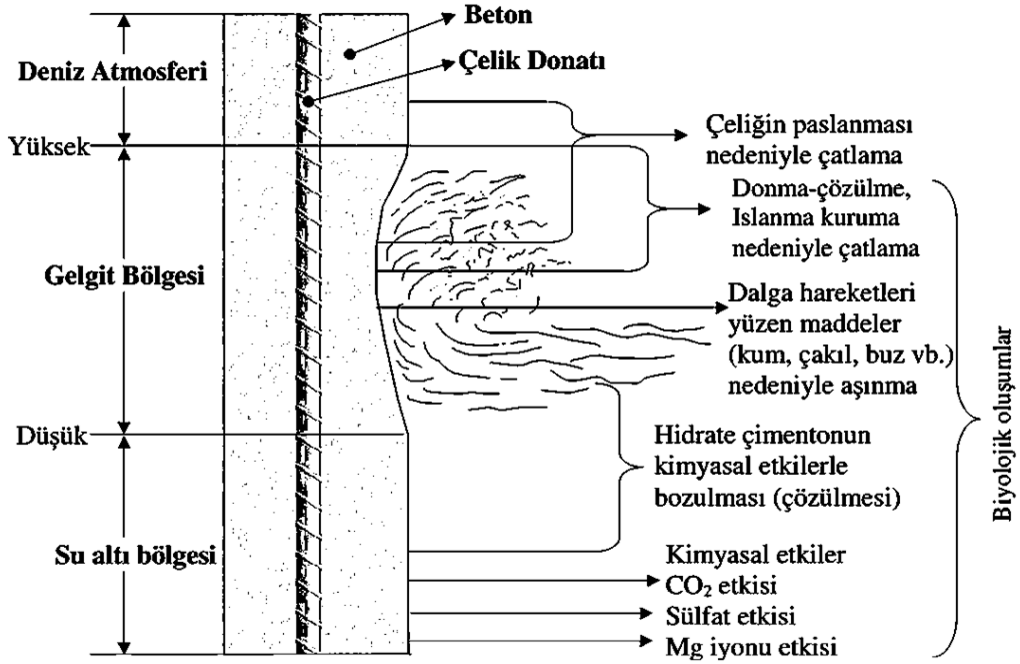
Tablo 3.1. Deniz ortamında yıpratıcı etkiler ve tuz/iyon yoğunlukları

Fiziksel	Kimyasal	Biyolojik	Çelik donatının
- Aşınma	- Sülfat etkisi	etilenme	korozyonu
- Donma – çözülme	- Magnezyum iyonu		
- Islanma - kuruma	etkisi		
	- Karbonik asit		

Deniz	Toplam tuzluluk (%) [*]	Mg+2 (mg/l)	SO ₄ ⁻² (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Ca ⁺ (mg/l)
Karadeniz	1.7	630	1270	8400	5260	250
Marmara	2.6	960	1940	12840	8050	300
Ege	3.8	1400	2830	18770	11770	560
Akdeniz	3.9	1440	2900	19270	12080	580

^{*} Toplam tuzluluk veya az derinde yaz aylarında ölçülen değerlerdir (Akman. 1992)

Deniz suyunun içyapısının pH değeri 7.5 – 8.4 arasında değişmektedir. Ortalama değer 7.8 olarak kabul edilmektedir. Atmosferdeki CO₂ ile denge halinde ortalama pH değeri ise 8.2’dir. Deniz suyunun yüksek miktarda çözünmüş CO₂ içermesi halinde 7.5’in altındaki pH değerlerine de rastlanabilir ki bu durumda betonun daha şiddetli bir etki altında olacağı açıktır.



Şekil 3.1. Yapının bulunduğu konuma göre maruz kalabileceği değişik deniz ortamları ve deniz suyu etkisiyle oluşabilen bozulma mekanizmaları

Tablo 3.2. Korozyonun deniz ortamına göre riskleri

Fiziksel ve kimyasal bozulma mekanizmaları	Deniz ortamına göre riski			
	Deniz atmosferi	Sıçrama bölgesi	Gelgit bölgesi	Sualtı bölgesi
Donatıda klorür korozyonu	Çok	Çok	Çok	Az
Aşınma (dalgalar, yüzen cisimler)	Yok	Çok	Çok	Az
Islanma – kuruma (tuz kristalizasyonu)	Az	Çok	Çok	Yok
Donma çözülme	Az	Çok	Çok	Az
Kimyasal etkilenme	Az	Az	Çok	Çok
Biyolojik etkilenme	Yok	Çok	Çok	Çok

Kıyı yapılarında genel olarak ıslanma – kuruma bölgelerinde inşa edilmiş yapılarda bozulmaların olduğu tespit edilmiştir. Korozyon mekanizmasının durum değerlendirmesinin yapılması amacıyla çeşitli yönetmeliklerde korozyona sebep olan çevre şartları durabilite açısından değişik sınıflara ayıran şartnameler mevcuttur (Örn. CEB-FIB, CEN, EN 206-1). CEB-FIB yönetmeliğinde ilgili çevre şartları ilk aşamada hafif, orta ve şiddetli olmak üzere üç bölüme ayrılmıştır. Hafif etki durumu; (i) konut veya ofis binaları, (ii) bir yıl içinde kısa süre için yüksek neme maruz kalmış olan ortam.

Orta etki durumu; (i) Yüksek rutubet içeren binalar veya geçici sürelerle korozyona yol açabilen buhar varlığı, (ii) Akarsular, (iii) Zararlı gaz içermeyen sert hava koşulları, (iv) Doğal zemin. Şiddetli etki; (i) Düşük oranlarda asit içeren sıvılar, tuzlu veya aşırı oksijenli sular, (ii) Korozyona yol açan gazlar veya topraklar, (iii) Korozyona yol açabilen endüstriyel bölgelerin veya deniz kıyılarının atmosferik koşulları. İlgili CEB-FIB yönetmeliği yapıların dayanım açısından riskleri belirlemek amacıyla faydalı olduğu düşünülmektedir. CEB - FIB' e ek olarak Avrupa Birliği Normalizasyon Komitesi (CEN) çevresel etki koşullarıyla ilgili Tablo 3.3 ' i önermiştir.

Tablo 3.3. Avrupa Birliği Normalizasyon Komitesi (CEN)' e göre betona çevresel etki sınıfları

Etki sınıfı	Çevre koşulları
1	Kuru ortam, örneğin, - Normal konut ve ofislerin iç mekânları. - Rüzgâr, yağmur, don gibi hava koşullarından etkilenmeyen veya zemin ve su etkisinde kalmayan dış cephe elemanları. - Bir yıl içinde kısa bir süre için yüksek neme sahip olan ortamlar (örneğin, yalnızca 3 aydan az süre bağıl nemin %60'ı aşması).
2	a) Don etkisinin olmadığı nemli ortamlar, örneğin - Nemin yüksek olduğu bina içleri. - Açık hava koşullarına, rüzgâra açık dış cephe elemanları. - Zararlı unsurlar içermeyen su ve toprak içinde kalan yapı elemanları. b) Don etkisinin olduğu nemli ortamlar, örneğin, - Açık hava koşullarına, rüzgâra veya zararlı unsurlar içermeyen su ve zemine maruz yapı elemanları.
3	- Don etkisinin ve buz çözücü tuzların bulunduğu nemli ortamlar, örneğin, Don ve buz çözücü tuzlara, açık hava koşullarına veya zararlı unsurlar içermeyen su ve zemin koşullarına maruz kalan elemanlar.
4	a) Deniz suyu ortamı, örneğin - Deniz suyunun sıçrama ve gelgit bölgesindeki veya bazı kısımları suya gömülü bazı kısımları atmosfere açık elemanlar. Deniz kıyılarında tuzlu suya doymun atmosferik koşullarda bulunan elemanlar. b) Don etkisinin bulunduğu deniz suyu ortamı, örneğin - Deniz suyunun sıçrama ve gelgit bölgesindeki veya bazı kısımları suya gömülü bazı kısımları atmosfere açık elemanlar. - Deniz kıyılarında tuzlu suya doymun atmosferik koşullarda bulunan elemanlar.
5	a) Hafif zararlı kimyasal ortam (gaz, sıvı veya katı) b) Orta zararlı kimyasal ortam (gaz, sıvı veya katı) c) Yüksek derecede zararlı kimyasal ortam (gaz, sıvı veya katı)

Ülkemizde ise TS EN206-1 standartlarında betonun değişik çevresel etkilere maruz kalması durumu altında dayanıklılığının sağlanması amacıyla getirdiği öneriler Avrupa Birliği Normlarına benzer şekilde düzenlenmiştir. İlgili tabloda (Tablo 3.4.) verilen etkilerin birden daha fazlasına maruz kalması durumunda etki sınıfları birleşim olarak ifade edilmelidir.

Tablo 3.4. Betonun maruz kaldığı değişik çevresel etkiler

Sınıf gösterimi	Çevrenin tanımı	Etki sınıflarının meydana gelebileceği yerlere ait örnekler
1 Korozyon veya zararlı etki tehlikesi yok		
XO	Donatı bulunmayan beton. Donma - çözülme etkisi ve kimyasal etki haricindeki bütün etkiler Donatı veya gömülü metal içeren beton (Beton çok kuru)	Çok düşük rutubetli havaya sahip Binaların iç kısımlarındaki beton
2 Karbonatlaşmanın sebep olduğu korozyon		
Donatı veya diğer gömülü metal içeren betonun hava ve nem etkisine maruz kalması halinde etki, aşağıda verilen şekilde sınıflandırılır. NOT: Burada söz konusu olan nem şartları, donatı veya diğer gömülü metali saran beton örtü tabakası içerisindeki şartlardır. Ancak çoğu durumda beton örtü tabakası şartlarının betonun içerisinde bulunduğu çevre şartlarını yansıttığı kabul edilir. Bu durumda çevre şartlarının sınıflandırılması yeterli olabilir. Beton ve içerisinde bulunduğu çevre (ortam) arasında bariyer tabaka varsa bu şartlar geçerli olmayabilir.		
XC 1	Kuru veya sürekli ıslak	Bağıl nemin çok düşük olduğu binaların iç kısımlarındaki beton. Sürekli şekilde su içerisindeki beton.
XC 2	Islak, ara sıra kuru	Su ile uzun süreli temas eden beton yüzeyler, çoğu temeller.
XC 3	Orta derecede nemli	Orta derecede veya yüksek rutubetli havaya sahip binaların iç kısımlarındaki betonlar. Yağmurdan korunmuş, açıkta bulunan betonlar.
XC 4	Tekrarlı ıslanma ve kurumaya maruz	XC2 etki sınıfı dışındaki, su temasına maruz beton yüzeyler.
3 Deniz suyu haricindeki klorürlerin sebep olduğu korozyon		
XD 1	Orta derecede nemli	Hava ile taşınan klorürlere maruz beton yüzeyleri.

XD 2	Islak, ara sıra kuru	Yüzme havuzlar, klorürleri içeren endüstriyel sulara maruz betonlar.
XD 3	Tekrarlı ıslanma ve kurumaya maruz	Klorürleri ihtiva eden serpintilere maruz köprü kısımlar, kaldırımlar,

4 Deniz suyundan kaynaklanan klorürlerin sebep olduğu korozyon

Donatı veya diğer gömülü metal içeren betonun deniz suyunda bulunan klorürlere veya deniz suyundan kaynaklanan tuz taşıyan hava ile temas etmesi halinde etki, aşağıda verilen şekilde sınıflandırılır.

XS 1	Hava ile taşınan tuzlara maruz, fakat deniz suyu ile doğrudan temas etmeyen	Sahile yakın yerde bulunan yapılar
XS 2	Sürekli olarak su içerisinde	Deniz yapılarının bazı bölümleri
XS3	Gelgit, dalga ve serpinti bölgeleri	Deniz yapılarının bazı bölümleri

5 Buz çözücü maddenin de bulunduğu veya bulunmadığı donma-çözülme etkisi

Betonun etkili donma/çözülme tekrarlarına, ıslak durumda maruz kalması halinde etki, aşağıda verilen şekilde sınıflandırılır.

XF1	Buz çözücü madde içermeyen suyla orta derecede doymun	Yağmura ve donmaya maruz düşey beton yüzeyler
XF 2	Buz çözücü madde içeren suyla orta derecede doymun	Donma ve hava ile taşınan buz çözücü madde etkisine maruz yol yapılarının düşey beton yüzeyleri
XF 3	Buz çözücü madde içermeyen suyla yüksek derecede doymun	Yağmur ve donmaya maruz yatay beton yüzeyler
XF4	Buz çözücü madde içeren su veya deniz suyu ile yüksek derecede doymun	Buz çözücü maddelere maruz yol bölgeleri.

6 Aşınma etkisi

Eğer beton aşırı mekanik kullanıma maruz kalacaksa, etki sınıfı aşağıdaki gibi verilmelidir.

XM 1	Orta derecede aşınma	Şişme lastikler tarafından kullanılan taşıyıcı zeminler ya da yüzey sertleştiricili sanayi zeminleri
XM 2	Yüksek derecede aşınma	Şişme ya da tam kauçuk lastik donanımlı forkliftler tarafından kullanılan taşıyıcı zeminler ya da yüzey sertleştiricili sanayi zeminleri
XM 3	Çok Yüksek derecede aşınma	Elastomer lastik yada çelik tekerlek donanımlı forkliftler tarafından kullanılan taşıyıcı zeminler

7 Kimyasal etkiler

Betonun, Tablo 6' da verilen tabii zeminler ve yer altı sularından kaynaklanan zararlı kimyasal etkilere maruz kalması durumunda etki, aşağıda verilen şekilde sınıflandırılır. Deniz suyu, coğrafik bölgeye göre sınıflandırılır, bu nedenle betonun kullanılacağı yerde geçerli sınıflandırma uygulanır.

NOT: Aşağıda verilenler şartların bulunması halinde, geçerli etki sınıfının tayini için özel çalışma yapılmasına gerek duyulabilir:

Tablo 6' da verilenler dışındaki sınır değerler, Diğer zararlı kimyasal maddeler, Kimyasal maddelerle kirlenmiş zemin veya su, Tablo 6' da verilen kimyasallarla birlikte yüksek hızda akan su bulunması.

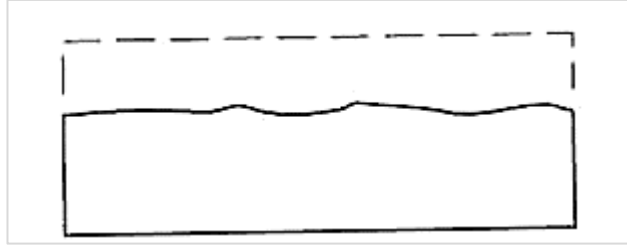
XA 1	Tablo 6' ya göre az zararlı kimyasal ortam
XA 2	Tablo 6' ya göre orta zararlı kimyasal ortam
XA 3	Tablo 6' ya göre çok zararlı kimyasal ortam

3.2.3. Korozyon çeşitleri

Meydana gelecek korozyonun verdiği tahribat yapısı anot ve katotların dağılımına bağlıdır (Gulikers vd., 2005). Anot ve katotların dağılımına bağlı olarak farklı mekanizmaların oluşması korozyona maruz kalan metallerin görünümlerinde de farklılıklara yol açar. Meydana gelen bu farklı tipleri 4 ana başlık halinde özetleyebiliriz.

3.2.3.1. Üniform korozyon

Atmosfere açık ortamda bulunan metallerde meydana gelen korozyon genellikle üniform korozyon meydana gelmektedir. Bu tür korozyon tipinde anot ve katot reaksiyonları ilgili metalin tüm yüzey alanında düzgün bir dağılım göstermektedir. Betonarme yapılarda üniform korozyon genellikle karbonatlaşma reaksiyonları sonucunda beton içerisine klorür iyonlarının nüfuz etmesi sonucu gerçekleşmektedir.

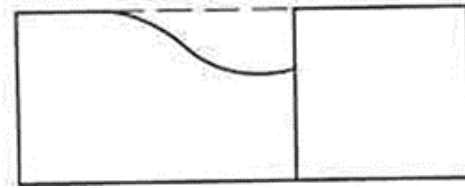


Şekil 3.2. Üniform korozyon

Üniform korozyon tipi diğer korozyon oluşum tiplerine göre en az zararlı olanı olarak nitelendirilebilir. Bu durumun sebebi ise donatının yüzeyinde herhangi bir çukur, kırılma vb. yapı meydana gelmeden donatı kullanılmaya devam edilebilecektir (Onaran, 2009).

3.2.3.2. Galvanik korozyon

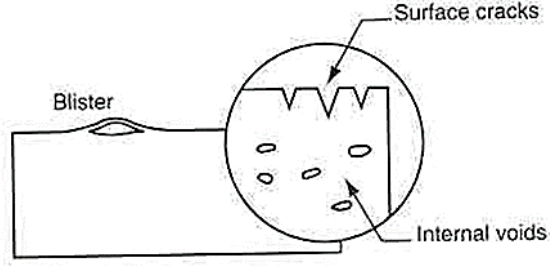
Farklı yapıdaki iki ayrı metal elektrolit içerisinde daldırdıktan sonra bir iletkenle birbirlerine bağlanmalarıyla birlikte galvanik pil oluşmaktadır. Galvanik pil oluşumuyla birlikte oluşan potansiyel fark ile elektron transferi meydana gelir e böylece pilin anot kısmında negatif potansiyelde olan donatı korozyona maruz kalır. Paslanma hızı, anot-katot bölgelerinin arasında yer alan bölgenin potansiyel farkına bağlıdır (Onaran, 2009). Sıklıkla rastlanan galvanik korozyon özellikle inşaat sektöründe uzun süren şantiyelerde donatıların bindirme bölgelerinde meydana gelmektedir.



Şekil 3.3. Galvanik korozyon

3.2.3.3. Çatlak korozyon

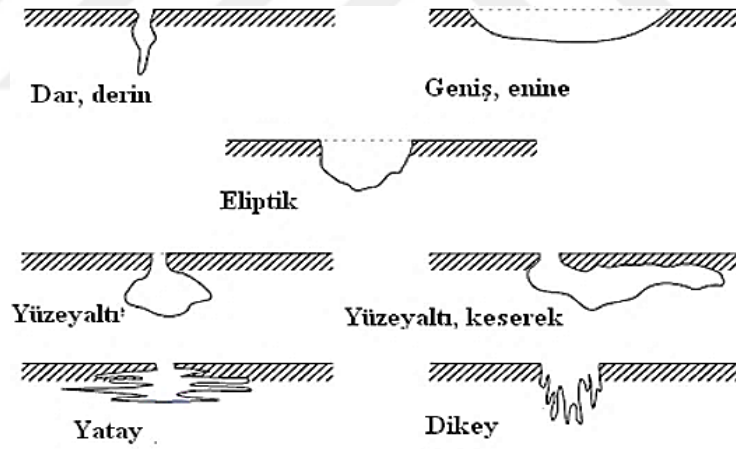
Çatlamış metallerde çatlak yüzeyi ve ortam arasındaki oksijen yoğunluğu farkının meydana getirdiği korozyon tipidir.



Şekil 3.4. Çatlak korozyonu

3.2.3.4. Oyuklanma korozyon

Genellikle silolarda ve borularda meydana gelen korozyon tipidir. Bu korozyon tipinde anot ve katot reaksiyon bölgeleri birbirinden bariz şekilde ayrılmış durumdadır. Korozyon mekanizmaları sonucu oluşan en tehlikeli korozyon tipi olarak gösterilebilir. Bu durumun sebebi ise ilgili donatı delinmelere yol açarak düşük korozyon seviyelerinde dahi tehlikeli olabilmektedir.



Şekil 3.5. Değişik kesitlerde oyuklanma korozyonu

3.2.4. Korozyon ölçüm yöntemleri

Betonarme yapıda meydana gelen donatı korozyonunun ölçümü mevcut yapının performans seviyesinin belirlemede ve müdahale açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yöntemlerin yaygın olarak kullanılanları; ağırlık kaybı yöntemi, lineer polarizasyon ve yarı hücre potansiyeli yöntemidir.

3.2.4.1. Ağırlık kaybı yöntemi

Korozyon oranının tespit edilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri ağırlık kaybı yöntemidir. Korozyona maruz bırakılacak metal korozyon sürecinden önce tartılarak ilk kütlesi kayıt altına alınır. Korozyon sürecinin tamamlanmasının ardından tekrar tartılan metalin kütle kaybı bulunur. Metalde meydana gelen kütle kaybından Denklem 11 yardımıyla korozyon hızı hesaplanır.

$$\text{Korozyon hızı} = \frac{\Delta W}{At} \quad (3.5)$$

Denklem 11’de ΔW kütle kaybını (mg), A metalin yüzey alanını (cm^2) t ise uygulanan zamanı (saat) belirtmektedir.

3.2.4.2. Yarı hücre potansiyeli yöntemi

Amerikan Ulusal Standartları (ASTM C876) tarafından geliştirilen yarı hücre potansiyeli yöntemi betonarme yapılarda kullanılması önerilen bir yöntemdir. Bu yöntemde ölçülen potansiyel değeri sadece korozyon mekanizmasının aktivitesinin olasılığını belirtme amacıyla kullanılmaktadır.

Tablo 3.5. Korozyon mekanizmasının olasılığını belirtme aktivitesini

Yarı – hücre potansiyel değerleri CSE (SCE)	Korozyon olasılığı
$E < -350 \text{ mV}$ (-270 mV)	% 90 güvenirlikle donatının korozyona uğrama olasılığı vardır
$-350 \text{ mV} < E < -200 \text{ mV}$ (-120 mV)	Belirsizlik vardır, kesin bir şey söylenemez
$-200 \text{ mV} < E$	% 90 güvenirlikle korozyon yoktur

3.3. Eşdeğer Akım Yoğunluğu

Eşdeğer Akım Yoğunluğu Bilimsel çalışmalarda genellikle korozyon hızı olarak ifade edilir. Eşdeğer Akım yoğunluğu, birim anot yüzey alanından geçen akım şiddeti korozyon hızını verir. Özellikle katodik koruma hesaplarında korozyon hızı birimi olarak anot akım yoğunluğunun (mA/m^2) veya ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) olarak kullanılması tercih edilir. Birim metal yüzeyinden, birim zamanda geçen akım miktarı doğrudan korozyon hızını verir. Faraday

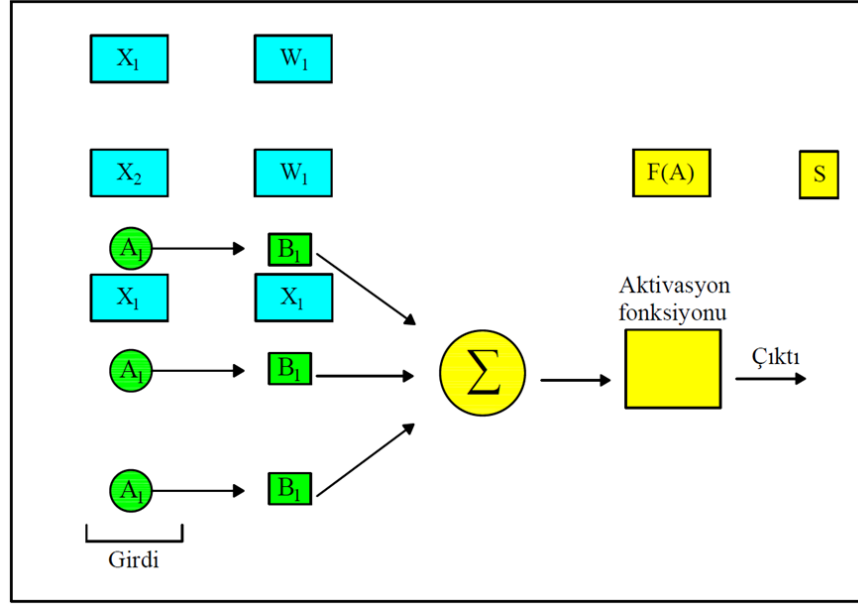
Yasasına göre devreden 1 Faraday akım geçtiğinde anotta 1 eşdeğer gram madde iyon haline geçer. Elektrokimyada korozyon hızı ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) olarak verilir. $1 \text{ mA}/\text{cm}^2 = 10 \text{ A}/\text{m}^2$ dir. Elektrotlarda yürüyen kimyasal reaksiyonların hızı geçen akımdan daha küçük olması halinde polarizasyon olayı meydana gelir. Anot ve katot polarizasyonları hücreden geçen akım yoğunluklarına bağlı olarak artar. Denge halinde bir korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve buna karşılık gelen bir korozyon akımı (I_{corr}) oluşur.

3.4. Yapay Sinir Ağları

Genel tanım olarak Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi yapısal olarak biyolojik sinir sistemi ağ yapısını referans alarak var olan bilgiyi işleme, öğrenilmiş olan veya gruplandırılmış verileri kullanma yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Yapay Sinir Ağları yöntemlerinin gelişiminin bilim insanları tarafından insan beyninin işleyiş mekanizması ve olaylara verilen tepkilerin anlaşılması ile paralellik gösterdiği bilinmektedir. İnsan beyninin çalışma mekanizmasını inceleyen bilim insanları tarafından bu yapının taklit edilerek oluşturulacak sistemlerinin ne denli faydalı olacağı düşünülmüştür (Arena vd. 1998). Kullanılacak bu yöntemde amaç çeşitli durumlar karşısında insan yetilerini makinelere öğretmek ve benzer davranış-tepki vermesini sağlamaktır. Farklı bilimsel çalışmalarda kullanılan bu yöntemler genel olarak örüntü tanıma, sistem tanımlama, robotik, sinyalleri işleme, lineer olmayan denetim alanları gibi birçok uygulama alanında olarak kullanılmaktadır (Abadoğlu vd., 1999).

3.4.1. Tanım ve tarihçesi

1940'lı yılların ilk çeyreğinde Mc Cullogh ve Pitts tarafından başlayan ilk araştırmaların çıktılarını yayınlamış oldukları makale ile duyurmuşlardır. Araştırmaların ilk yıllarında yaşamış oldukları problemler yönetime olan güvenin sarsılmasına sebep olmuştur. 1980'li yıllarda Hopfield tarafından ortaya koyulan yöntem ile yapay sinir ağları kullanımı ile mevcut bilgisayar ortamlarında oldukça karmaşık olan ve zaman alan işlemlerin pratik bir şekilde çözümlenebileceği vurgulanmıştır. Genel olarak yapay sinir ağları yönteminin kullanımının faydalı yönleri lineer olmayan verileri düzenleyebilme, veri girdi ve çıktılarının arasında bağlantı kurabilme, mevcut durumlara uyum sağlayabilecek algoritmalar geliştirme ve hata düzeyini en aza indirecek düzeyde denemelere imkân sağlama olarak belirtilebilir Haykin vd., (1999). Yapay sinir ağlarında teknik açıdan incelenecek olursa girdiler karşılığında çıktı mekanizması Şekil 3.6' da görülmektedir.



Şekil 3.6. Çok katmanlı yapay sinir ağı nöronu çalışma fonksiyonu.

Şekilde gösterilen S değeri girdilerin çıktı ifadesini, F(A) değeri aktivasyon fonksiyonunu, X_i, X₁, X₂ sistemin girdi elemanlarını belirtmektedir. W₁, W₂, W₃ sistemin bağlantılarının vektörel olarak boyutlarını belirtmektedir (Baldi vd., 1989). Temelleri 1950’li yıllarda atılan bilgisayar biliminde yaşanan gelişmeler yapay sinir ağları yönteminin gelişimine zemin hazırlamıştır. Yapay sinir ağları yöntemlerinde yaşanan gelişmelerin kritik süreci Amerikalı Doktor Warren Sturgis Mc Culloch ve matematikçi Walter Pitts öncülük yaptığı 1980’li yıllara dayanmaktadır. Mc Culloch ve Pitts tarafından yapılan çalışmada eşik mantığı modelini dikkate alan bir yöntem önerilmiştir. 1980 yılı öncesinde yapılan araştırmaların dönemi camelot çağı (1890-1969), karanlık çağ (1969-1980) olarak tanımlanabilir. 1980 sonrası yapılan araştırmalar ise Rönesans Çağı (1982 – 1986), Bağlantıcılık Çağı (1988 – 1994) ve Yapay Zekâ Çağı (1998 –) olarak adlandırılabilir.

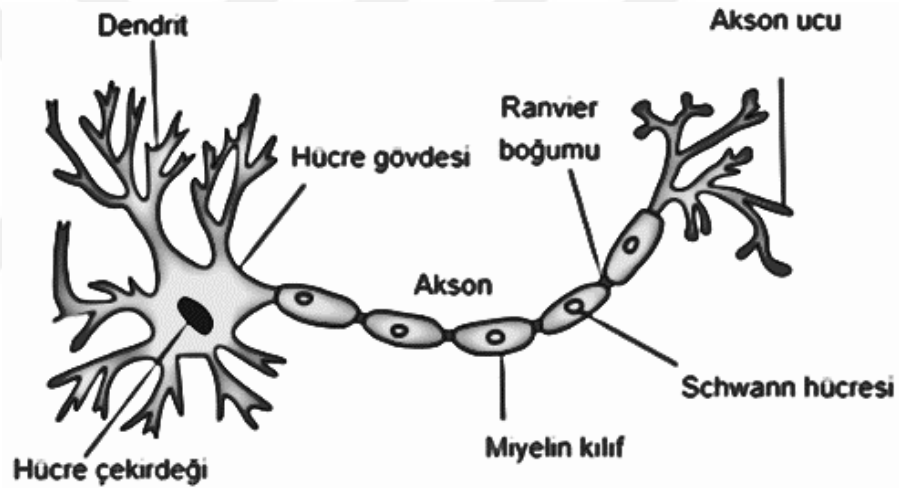
3.4.2. Yapay sinir ağları kullanım alanları

Yapay Sinir Ağları öğrenme algoritmaları sayesinde mevcut geleneksel yöntemlere oranla uzun süreç alan karmaşık problemlerin çözümüne fayda sağlamaktadır. Yapay Sinir Ağları multidisipliner olarak birçok alanda kullanıma sahiptir. Başlıca uygulama alanları; tıp alanında (nöroloji çalışmaları, kan değerlerinde sınıflandırma), otomotiv

sektörü (otonom araç sistemleri, akıllı araçlar, robotik sistemler, devre elemanları), uzak araştırmaları, dijital bankacılık, elektrik sistemleri, savunma sanayisi.

3.4.3. Yapay sinir ağları biyolojik yapısı

Biyolojik sinir ağlarının temel elemanı nöron adı verilen sinir hücreleridir. Bir sinir hücresinin temel elemanları ise hücre gövdesi, dendrit ve aksondan oluşmaktadır. Sağlıklı bir bireyin beyin fonksiyonlarının sağlıklı bir şekilde işlevini yerine getirmesi için beyninin fizyolojik yapısında ortalama 10 milyar adet nöron yer almalıdır. Bu sinir hücreleri yaklaşık 10 bin bağlantı ile komşu sinir hücrelerine aktarılmaktadır. Sinir hücreleri birbirlerine sinaps denilen oluşumlarla bağlıdır. Sinaps; bir hücrenin akson sonuyla diğer hücrenin dendrit kısımlarının birleştikleri noktadır.



Şekil 3.7. Sinir aę yapısı

3.4.4. Yapay sinir ağları öğrenme algoritmaları

Genel olarak yapay sinir ağları 5 ana parametresi vardır. Bölümlerden ilki sinir ağlarında öğrenme aşamasının gerçekleştiği giriş bölümüdür. Giriş verileri ilgili sistemin dışından gelebileceği gibi başka bir aę yapılarının çıktı verisi de olabilir. Giriş verilerinin tümü bir ağırlığa sabittir ve bu veriler sabit olabildiği gibi değişken de olabilmektedir.

Toplama fonksiyonu kavramında mevcut bir aę yapısına gelen giriş verilerinin hesaplanma işlemi yapılmaktadır. Tablo 3.6 'da genel olarak yayın biçimde kullanılan birleştirme fonksiyonları verilmiştir.

Tablo 3.6. Birleştirme Fonksiyonları

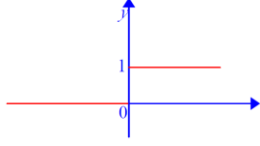
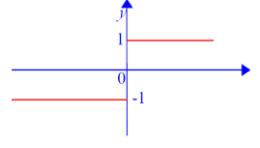
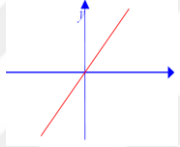
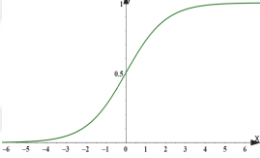
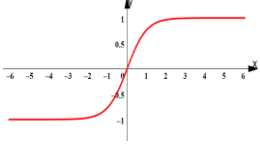
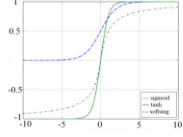
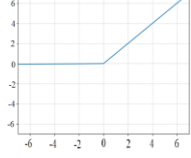
Toplama	Çarpım
$Net_i = \sum W_{ij} I_j$	$Net_i = \prod W_{ij} I_j$
Maksimum	Minimum
$Net_i = \text{Max} (W_{ij} I_j)$	$Net_i = \text{Min} (W_{ij} I_j)$
Çoğunluk	Kümülatif Toplam
$Net_i = \sum \text{Sgn}(W_{ij} I_j)$	$Net_i = \sum (W_{ij} I_j) + Net_{eski}$
Toplama = Nörona giren net girdi	
W_{ij} = i ve j nöronlarının arasındaki bağlantısı ağırlığı	
I_j = Nöronun çıktısı	

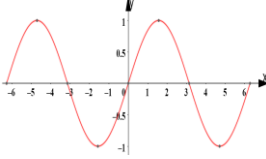
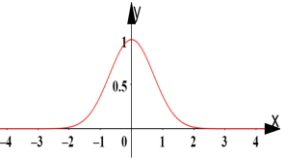
Aktivasyon fonksiyonu tanımı girdi verilerinin alınarak sinir hücresinin çıktı verisini belirleyen fonksiyondur. Çoğunlukta kullanılan aktivasyon fonksiyonları logaritmik sigmoid, tanjant sigmoid, Unistep, Softsign ve lineer fonksiyonlardır. Belirtilen transfer fonksiyonları Tablo 3.7 'de görülmektedir.

Lineer fonksiyon mevcut doğrusal bir kavramı çözmek için kullanılmaktadır. Hücrenin tüm net girdi verileri doğrudan hücre çıkış verileri olarak verir. Lineer aktivasyon fonksiyonu matematiksel formülasyonda $y=v$ olarak belirtilmektedir.

Tanjant sigmoid fonksiyon yaygın kullanılan aktivasyon fonksiyonlarının başında gelmektedir. Bu fonksiyon çift başlıklı fonksiyon olarak da adlandırılmaktadır. Yapısal olarak türevlenebilir bir fonksiyon olduğundan dolayı öğrenme işlemi gerçekleştirebilmektedir. İlgili fonksiyonun dezavantajı olarak x değerlerinde meydana gelen değişimlerin y değerlerinde etkilerinin küçük düzeylerde kalmasıdır. Bir başka anlamda eğim değerlerinin meydana gelen değişimlere göre küçük kalmasıdır.

Tablo 3.7. YSA modeli aktivasyon modelleri

Aktivasyon fonksiyonu	Grafik gösterimi	Formül gösterimi	Çıkış değerleri
Unit Step / Unipolar threshold		$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	$\{0, 1\}$
Sign /Bipolar threshold		$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x \leq 0 \end{cases}$	$\{-1, 1\}$
Identity / Linear		$f(x) = x$	$(-\infty, \infty)$
Sigmoid / logistic		$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	$\{0, 1\}$
TanH		$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	$\{-1, 1\}$
Softsign		$f(x) = \frac{1}{1 + x }$	$\{-1, 1\}$
Rectified Linear Unit / ReLU		$f(x) = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$	$[0, \infty]$

Sinusoid		$f(x) = \sin x$	$[-1, 1]$
Gaussian		$f(x) = e^{-x^2}$	$\{0, 1\}$

4. MATERYAL ve YÖNTEM

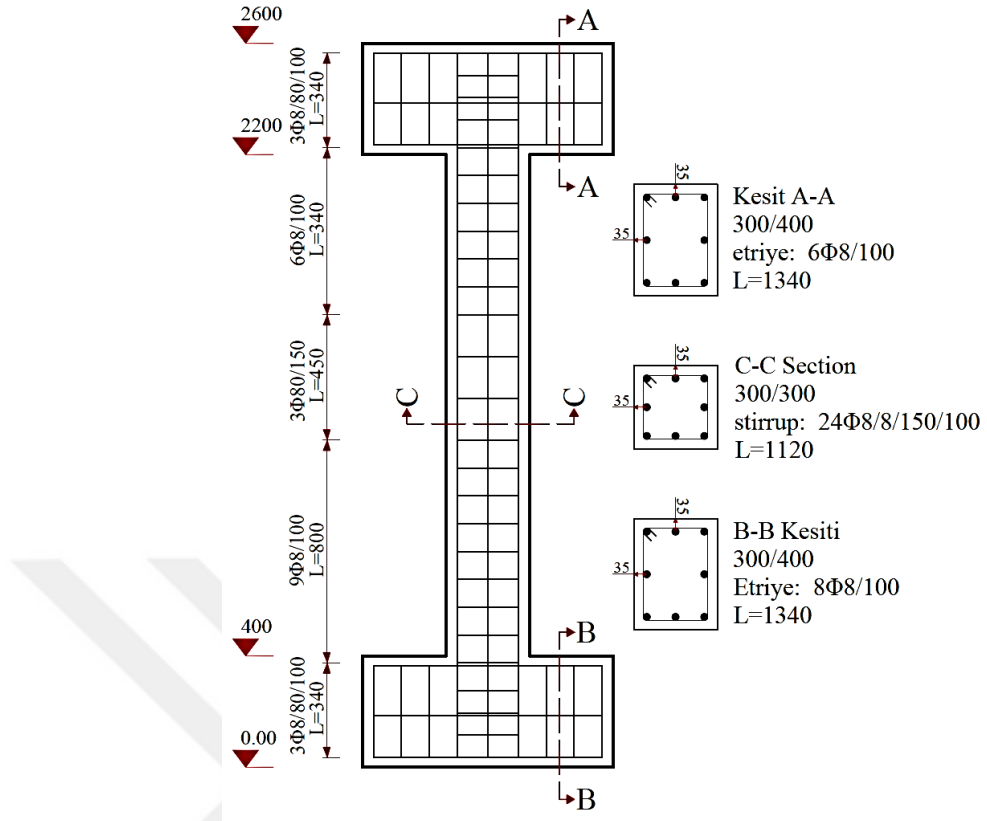
4.1. Materyal

Yalciner vd. (2019) tarafından, 3 farklı beton sınıfı (C8, C20, C30) altında 4 farklı korozyon oranı (%2 %4 %6 %10) için tam ölçekli betonarme kolonlar üzerinde çalışma gerçekleştirmiştir. Yalciner vd. (2019) çalışmalarında yüksekliği 85 cm, genişliği 175 cm boyutlarında olan tam ölçekli bir membran yalıtımlı betonarme paslandırma havuzu tasarlamışlardır. Ürettikleri tam ölçekli 25 adet betonarme kolonlardan beşi referans olmak üzere, geriye kalan 20 adet betonarme kolonu sabit 60 V akım altında hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutmuşlardır. Beton içerisinden çıkartılan donatılara ASTM G2(2003) standartlarına uygun şekilde mekanik ve kimyasal temizleme işlemleri uygulanmış ve ardından gravimetrik çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmada gravimetrik çalışmalar sonucu elde edilen gerçek korozyon oranları değerlerinin teorik korozyon oranları ile karşılaştırmaları Tablo 4.1.' de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Deney numunelerinin teorik/deneysel korozyon oranları

Numune	Teorik Korozyon oranı	Gerçek Korozyon oranı	Deneysel/Teorik Korozyon Oranı
C2	6.78	2.57	0.38
C3	8.19	2.78	0.34
C4	12.18	5.84	0.48
C5	17.02	6.45	0.38
C7	6.51	3.68	0.57
C8	8.04	4.83	0.60
C9	12.03	5.32	0.44
C10	17.01	6.01	0.35
C12	6.50	2.58	0.40
C13	8.02	1.80	0.22
C14	12.02	3.30	0.27
C15	17.35	7.93	0.46
C17	6.50	2.33	0.36
C18	8.00	3.03	0.38
C19	12.03	4.80	0.40
C20	16.87	6.91	0.41
C22	6.50	1.96	0.30
C23	8.01	2.98	0.37
C24	12.00	5.02	0.42
C25	17.00	7.44	0.44
C27	6.50	2.27	0.35
C28	8.00	3.92	0.49
C29	12.01	4.47	0.37
C30	17.01	7.28	0.43

Yalciner vd., (2019) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada kullanılan numunelere ait kesit özellikleri Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Daha önce gerçekleştirilen çalışmada kullanılan numunelere ait kesit özellikleri

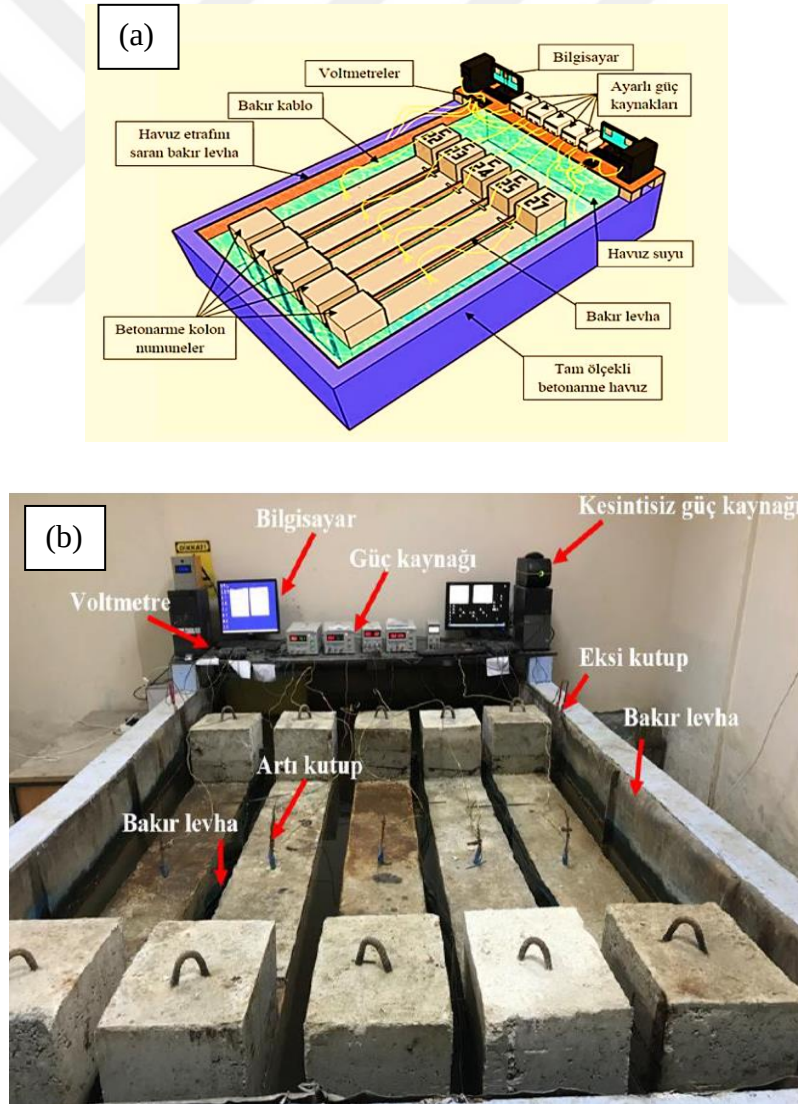


Şekil 4.2. Betonarme kolonların donatı kafesine bağlanan bakır teller örnek çalışma

4.2. Yöntem

4.2.1. Hızlandırılmış korozyon yöntemi

Hızlandırılmış korozyon yöntemi doğal yollarda uzun yıllar sürecektir korozyon seviyelerine kısa sürelerde ulaşmayı hedefleyen bir yöntemdir. Bu yöntemde devrenin elemanları Şekil. 4.3’de görüldüğü üzere devreden geçecek akımı üreten 60 volt 10 amper ayarlanabilir güç kaynağı, sistemden geçen akımların kaydedilmesi için voltmetre ve bilgisayar sistemi, sistemde olası elektrik kesintilerinde devreye girmek üzere ayarlanabilir güç kaynağından oluşmaktadır. Yalciner vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışma kapsamında üretilmiş olup bu tez çalışmasında incelenen kolon numuneleri de hızlandırılmış korozyon yöntemi ile korozyona maruz bırakılmıştır.



Şekil 4.3. Hızlandırılmış korozyon yöntemi (a) ve Paslandırma havuzu (b)

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tez çalışmasının bu bölümünde Yalciner vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı sınıflarda korozyona maruz bırakılmış 24 adet betonarme kolonuna ait eşdeğer akım yoğunluğu değerleri, Faraday kanununa göre hesaplanan teorik korozyon oranları ve gerçekleştirilen gravimetrik çalışmalar sonucu elde edilen gerçek korozyon oranları değerleri arasındaki ilişki incelenecektir. Gravimetrik çalışmalar kapsamında betonarme kolon donatıları ASTM G1-03 (2003) standartlarına uygun şekilde kimyasal ve mekanik yöntemler kullanılarak temizlenmiştir. Kimyasal temizleme için alüminyum bir havuz inşa edilmiş ve içerisine kullanılacak olan su kütlesinin %5'i kadar hidroklorik asit ilave edilerek donatılar 30 dakika boyunca bu karışımda bekletilmiştir. Mekanik temizleme için tel fırça ve taş motoruna özel bir başlık takılarak yapılmıştır. Tartım sonuçlarını etkileyecek tüm beton parçaları donatı yüzeyinden uzaklaştırılmıştır.

Tablo 4.2. Teorik-Deneysel I_{corr} değerleri

Numune	TEORİK I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Deneysel I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Deneysel/Teorik
C2	397.70	280.30	0.70
C3	306.40	196.27	0.64
C4	359.70	324.35	0.90
C5	305.40	213.00	0.70
C7	313.30	346.33	1.11
C8	312.70	340.33	1.09
C9	251.00	212.14	0.85
C10	397.00	266.66	0.67
C12	248.30	181.21	0.73
C13	357.00	156.53	0.44
C14	435.00	225.00	0.52
C15	458.00	371.55	0.81
C17	288.80	202.99	0.70
C18	390.50	278.49	0.71
C19	324.20	242.88	0.75
C20	322.40	242.59	0.75
C22	278.90	165.79	0.59
C23	201.33	176.07	0.87
C24	425.95	332.65	0.78
C25	450.45	361.34	0.80

C27	209.50	138.20	0.66
C28	284.80	262.62	0.92
C29	337.70	230.44	0.68
C30	464.20	369.40	0.80
Ortalama	338.34	254.88	0.76

5.1. Deneyssel ve Teorik Akım Yoğunluğu Değerleri

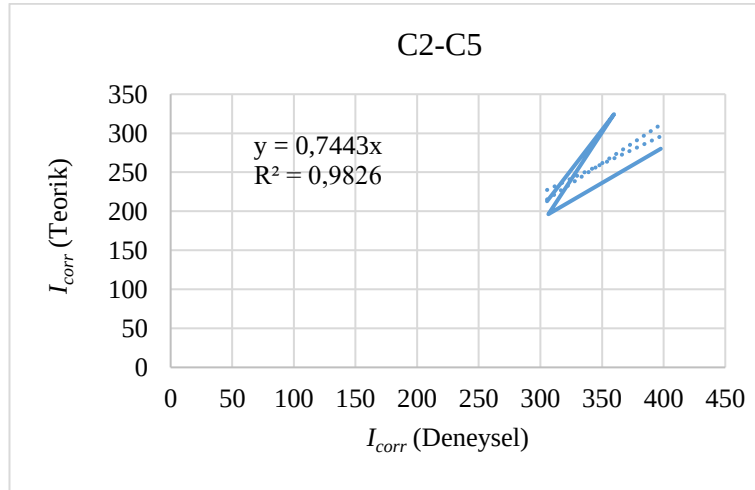
Donatı yüzey alanına bağlı olarak hesaplanan teorik I_{corr} değerleri ile hızlandırılmış korozyon sürecinin tamamlanmasının ardından hesaplanan deneyssel I_{corr} değerleri incelenmiştir. Üç farklı beton sınıfı için elde edilen bu değerler arasındaki ilişkiler aşağıda verilmiştir. Şekil 5.1 'de verilen grafikte C8 beton basınç dayanımına sahip numunelerin teorik I_{corr} değerleri ile deneyssel I_{corr} değerleri arasındaki düşük bir ilişki olduğu görülmektedir. Elde edilen $(I_{corr})_{Teorik} - (I_{corr})_{Deneyssel}$ ilişkileri Şekil 4'de sunulmuştur. Aynı şekilde 3 farklı beton sınıfı ve 4 korozyon oranını kapsayacak şekilde elde edilen söz konusu ilişkiler için 4 farklı model önerilmiştir. Önerilen modeller sırası ile Denklem 5.1, Denklem 5.2, Denklem 5.3 ve Denklem 5.4'de ilgili beton sınıfı ve eksenel yük oranlarına göre sunulmuştur.

$$(I_{corr})_{Teorik} = 0.6273x(I_{corr})_{Deneyssel}, \quad (C20 \text{ ve } \eta = \%20 \text{ için}) \quad (5.1)$$

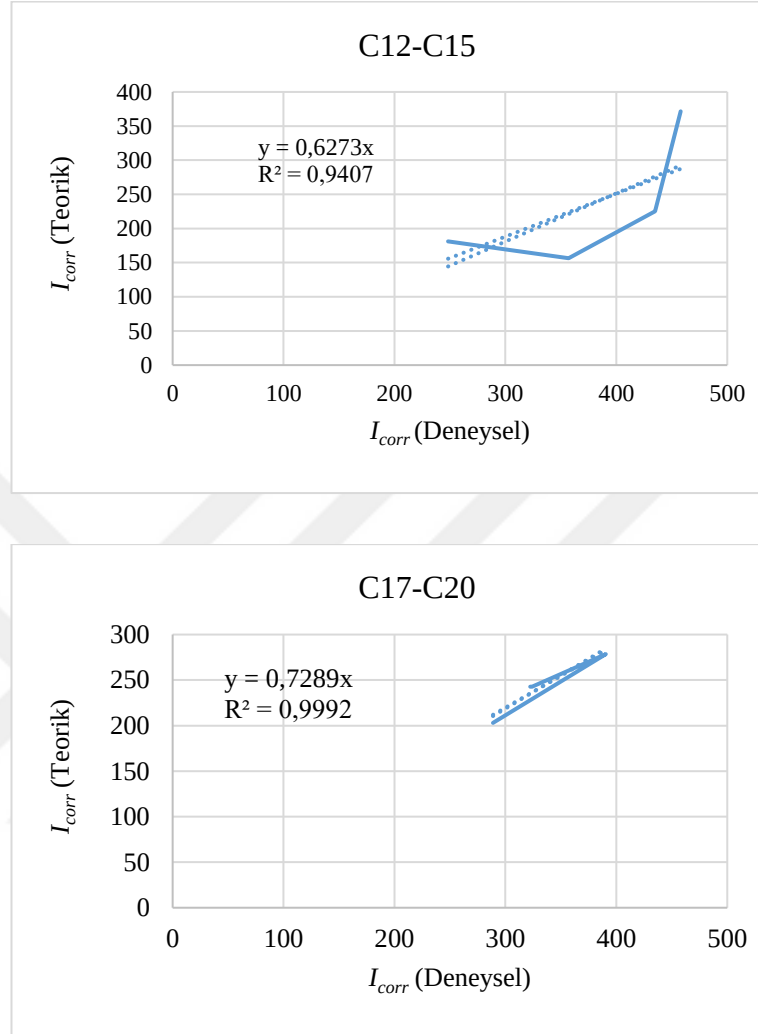
$$(I_{corr})_{Teorik} = 0.7289x(I_{corr})_{Deneyssel}, \quad (C20 \text{ ve } \eta = \%40 \text{ için}) \quad (5.2)$$

$$(I_{corr})_{Teorik} = 0.7682x(I_{corr})_{Deneyssel}, \quad (C30 \text{ ve } \eta = \%20 \text{ için}) \quad (5.3)$$

$$(I_{corr})_{Teorik} = 0.7767x(I_{corr})_{Deneyssel}, \quad (C30 \text{ ve } \eta = \%40 \text{ için}) \quad (5.4)$$

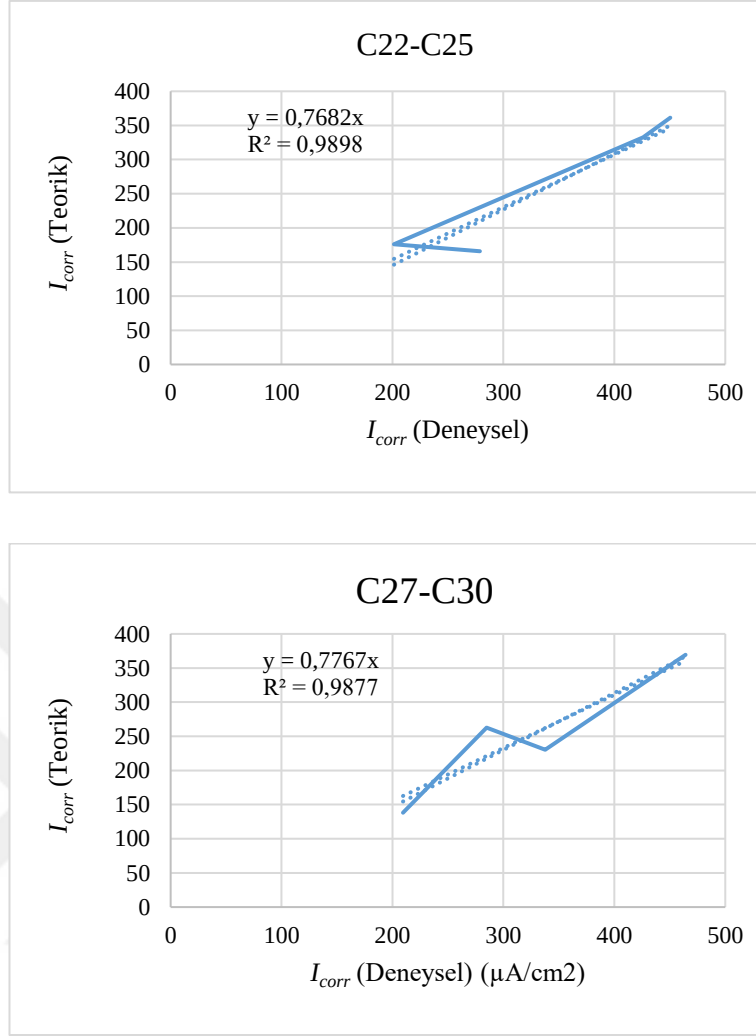


Şekil 5.1. C8 beton basınç dayanımına sahip numunelerin teorik I_{corr} değerleri ile deneysel I_{corr} değerleri karşılaştırılması



Şekil 5.2. C20 beton basınç dayanımına sahip numunelerin teorik I_{corr} değerleri ile deneysel I_{corr} değerleri karşılaştırılması

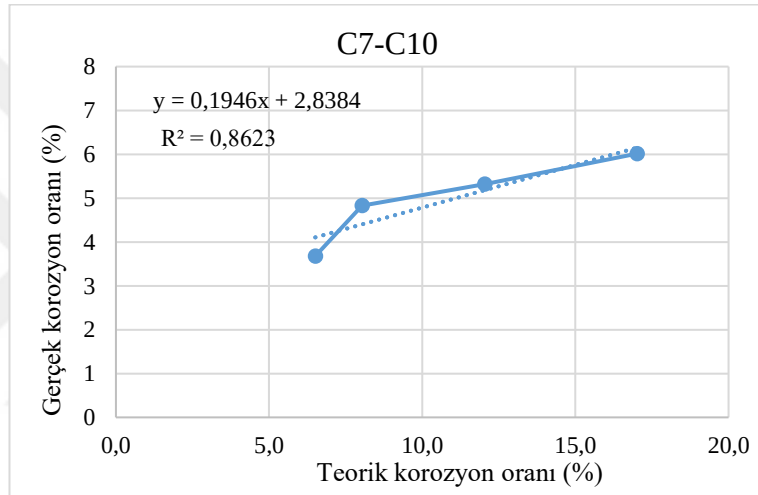
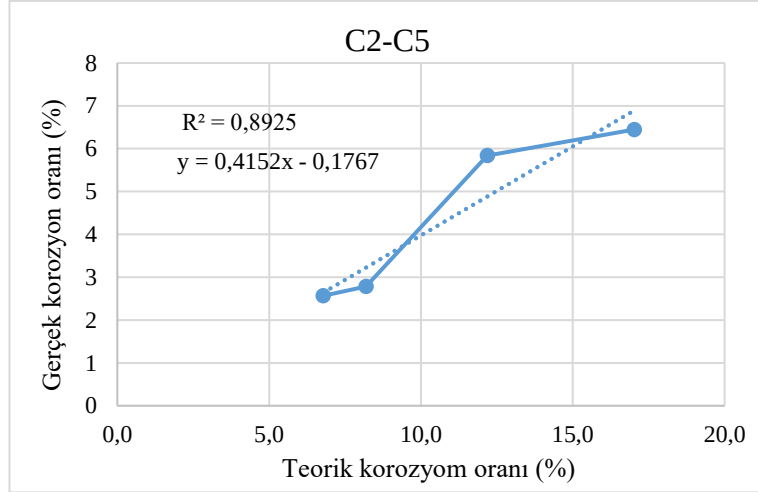
20 MPa dayanımına sahip betonarme kolonlarının teorik ve deneysel I_{corr} değerleri incelendiği zaman elde edilen modelin 8 MPa beton basınç dayanımına sahip numuneler için elde edilen modele göre daha iyi bir performans gösterdiği anlaşılmaktadır. 30 MPa basınç dayanımına sahip kolonların verileri ile elde edilen modelin performansının 8 ve 20 MPa beton sınıfına sahip numunelerden elde edilen modellerden daha iyi yüksek performans sergilediği belirlenmiştir.



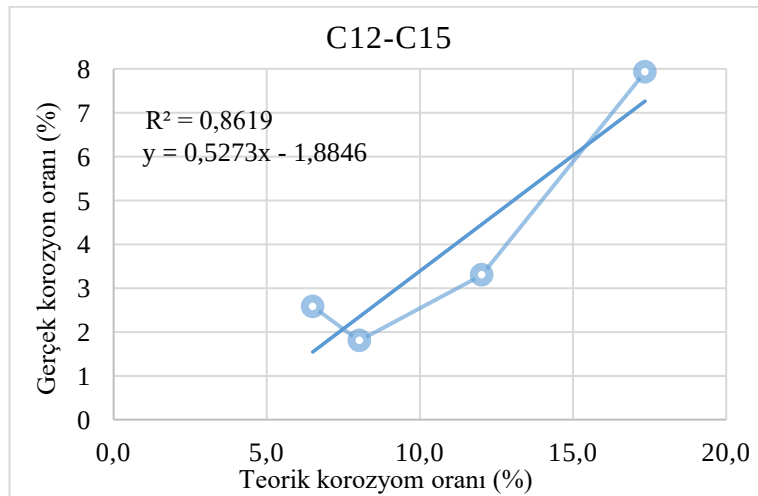
Şekil 5.3. C30 beton basınç dayanımına sahip numunelerin teorik I_{corr} değerleri ile deneysel I_{corr} değerleri karşılaştırılması

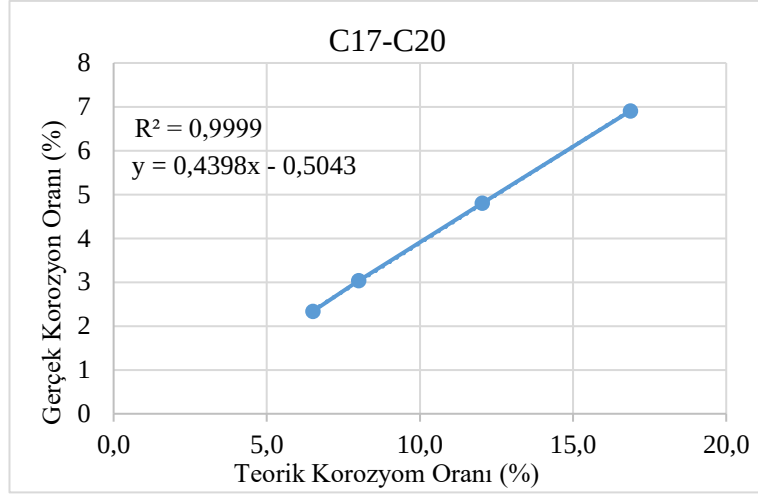
5.2. Teorik/ Gerçek Korozyon Oranları

Deneysel korozyon çalışmalarında sürecin kontrollü bir şekilde ilerlemesi amacıyla Faraday kanununa göre elde teorik korozyon oranları elde edilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde çalışma kapsamında elde edilen teorik korozyon oranı değerleri ile deneysel sürecin tamamlanmasının ardından elde edilen gerçek korozyon oranı değerleri arasındaki ilişkiler sunulmuştur. Bu kapsamda aşağıda verilen grafiklerde beton basınç dayanımına göre paslandırma havuzuna alınan numuneler gruplandırılmıştır.

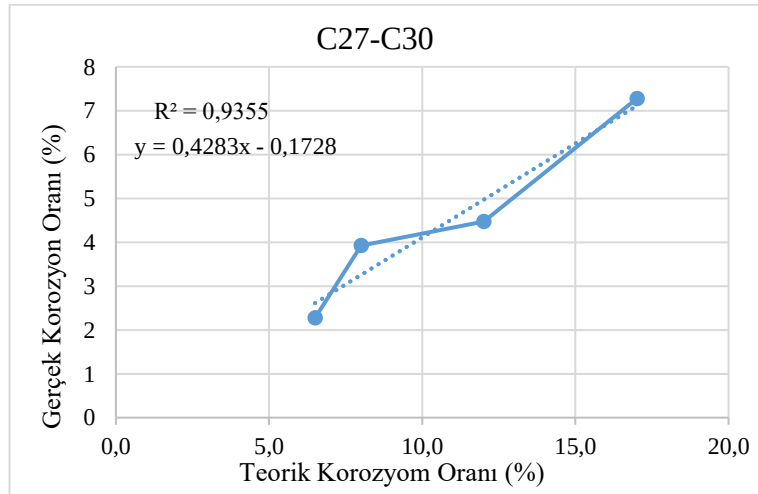
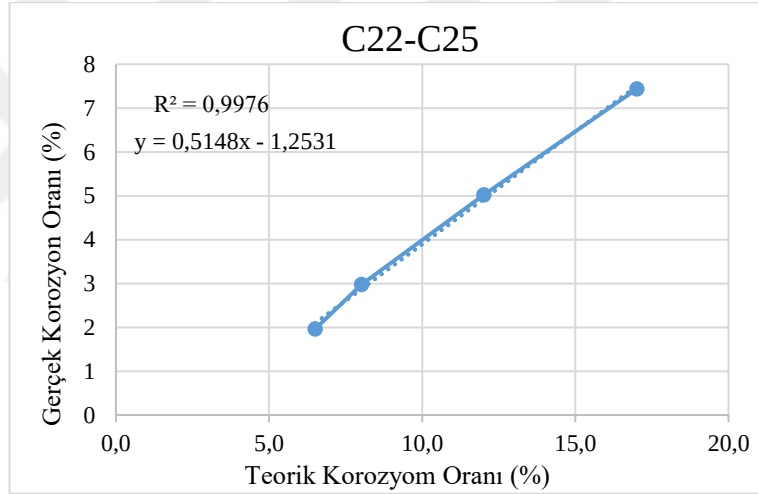


Şekil 5.4. C8 beton basınç dayanımına sahip numunelerin gerçek Korozyon Oranı (%) ile teorik Korozyon Oranı (%) karşılaştırılması





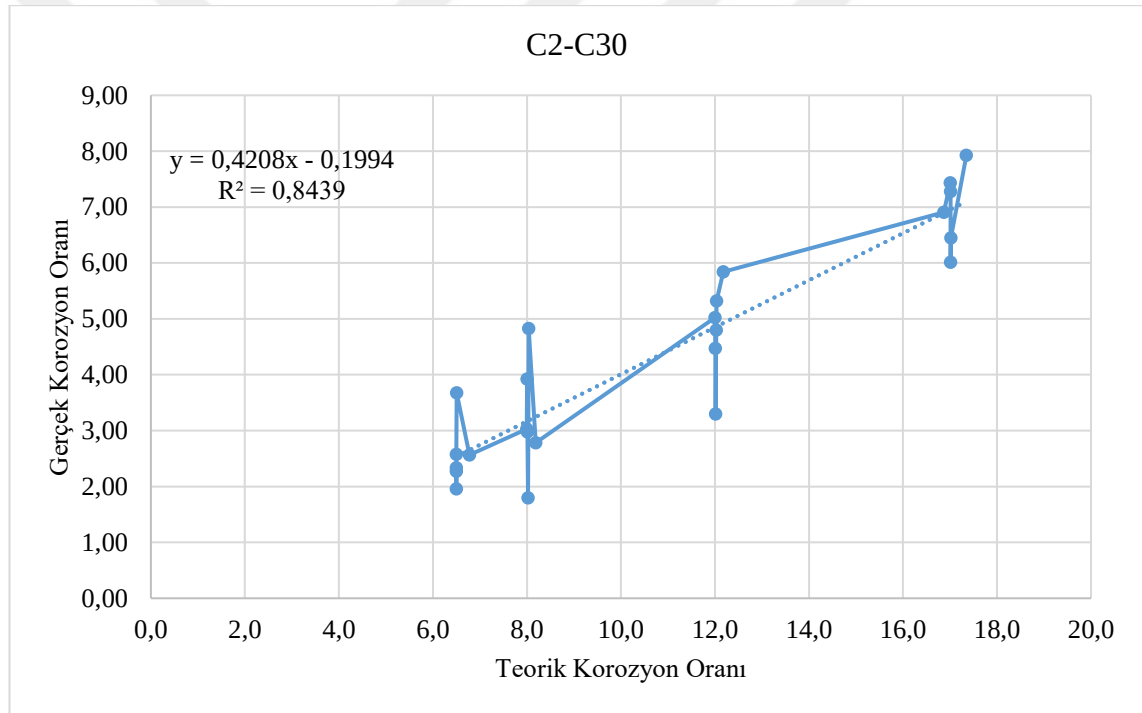
Şekil 5.5. C20 beton basınç dayanımına sahip numunelerin gerçek Korozyon Oranı (%) ile teorik Korozyon Oranı (%) karşılaştırılması



Şekil 5.6. C30 beton basınç dayanımına sahip numunelerin gerçek Korozyon Oranı (%) ile teorik Korozyon Oranı (%) karşılaştırılması

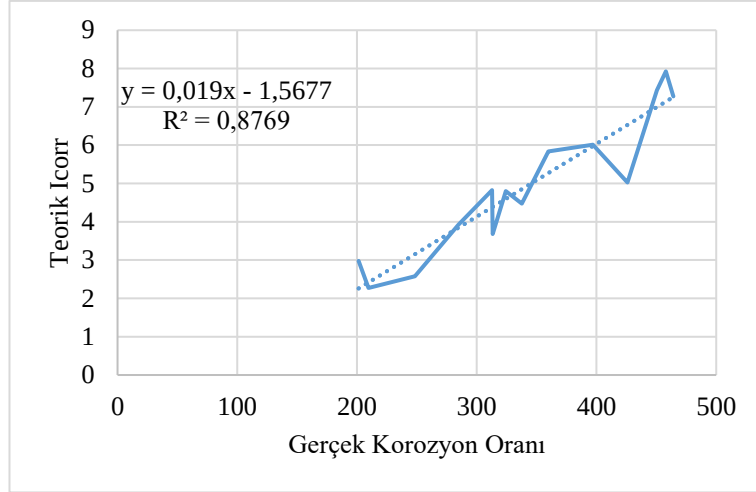
Faraday kanununa göre elde edilen teorik korozyon oranı değerlerinin gravimetrik çalışmalar sonucunda elde edilen gerçek korozyon oranı değerleri arasında yapılan regresyon analizinde elde edilen R^2 değeri 0.84 değerinde elde edilmiştir. Şekil 5.7’de çalışma kapsamında elde edilen teorik korozyon oranı değerleri ile deneysel sürecin tamamlanmasının ardından gravimetrik ölçümler ile elde edilen gerçek korozyon oranı ve I_{corr} değerleri arasındaki ilişkiler sunulmuştur. Sunulan değerler korozyona maruz bırakılmış tüm betonarme kolonları kapsamaktadır. 24 adet deneysel numunelerden, gerçek korozyon oranı için önerilen model, %84,39 gerçeklikle Denklem 5.5’deki gibi hesap edilmiştir.

$$\text{Gerçek korozyon oranı} = 0.4208x(\text{Teorik korozyon oranı}) - 0.1994 \quad (5.5)$$



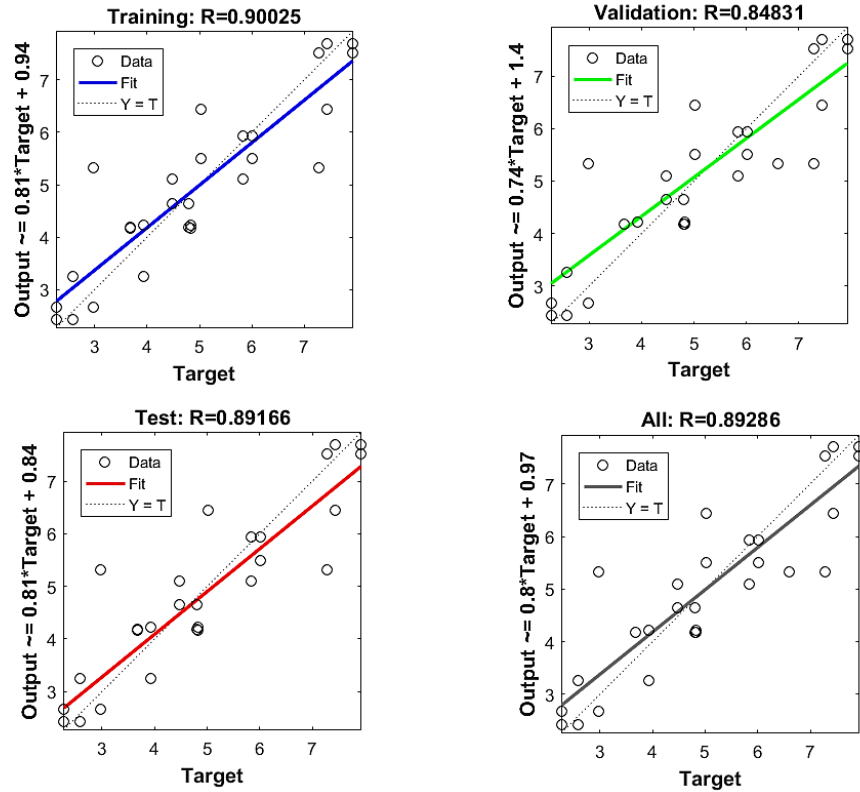
Şekil 5.7. Tüm beton basınç dayanımına sahip numunelerin gerçek Korozyon Oranı (%) ile teorik Korozyon Oranı (%) karşılaştırılması

Donatı yüzey alanına bağlı olarak hesaplanan I_{corr} değeri ile gravimetrik çalışma sonucunda elde edilen veriler arasındaki ilişki Şekil 5.8. 'de sunulmuştur.



Şekil 5.8. Donatı yüzey alanına bağlı olarak hesaplanan I_{corr} değeri ile gravimetrik çalışma sonucunda elde edilen veriler arasındaki ilişki

Teorik I_{corr} değerleri ve gerçek korozyon arasındaki ilişkinin elde edilmesi amacıyla mevcut veriler yapay sinir ağları yöntemi R değeri 0.8928 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.9. Gözlenen ve tahmin edilen değerlerin regresyon grafikleri (Teorik I_{corr} – gerçek korozyon oranı)

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Korozyon mekanizmasının betonarme yapılarda oluşumu, etki tipi, yoğunluğu, hızı vb. parametrelerin kesin olarak bilinmesi oldukça güçtür. Bu kapsamda ilgili parametrelerin tespit edilerek yapının performans seviyesine olan etkilerinin belirlenmesi amacıyla deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Tez çalışması kapsamında C8, C20 ve C30 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerin, Faraday kanununa göre teorik olarak elde edilen korozyon oranı değerleri, gravimetrik çalışmalar sonucunda elde edilen gerçek korozyon oranı değerleri, teorik akım yoğunluğu değerleri ve deneysel akım yoğunluğu değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- 1- 3 farklı beton sınıfına sahip (C8, C20 ve C30) numuneler üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmada elde edilen veriler incelendiği zaman göze çarpan önemli noktalardan ilki beton basınç dayanımına bağlı olarak beton çekme dayanımındaki azalmanın etkisidir. Düşük beton sınıfına sahip (C8) numunelerin diğer beton sınıfına sahip numunelere göre daha düşük korozyon oranlarında betonda çatlakların oluşması korozyon mekanizmasının ilerleyişini etkileyerek teorik modellerin düşük sonuçlar vermesine sebep olmaktadır.
- 2- Teorik ve deneysel akım yoğunluğu değerleri arasındaki ilişki göz önüne alındığında en doğru sonuçların 30 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde olduğu belirlenmiştir. 8 MPa beton basınç dayanımına sahip numunelerde korozyon kaynaklı çatlakların C20 ve C30 beton basınç dayanımına sahip numunelere göre erken sevilere oluşmasının teorik/deneysel I_{corr} değerlerinin düşük değerlerde olmasına yol açtığı düşünülmektedir.
- 3- Teorik akım yoğunluğu ile gerçek korozyon oranı arasındaki ilişkinin, Faraday kanununa göre hesaplanan teorik korozyon oranı ile gerçek korozyon oranı arasındaki ilişkiden daha iyi elde edilmiştir. Yüzey alanı büyük tam ölçekli numunelerde (kolon, kiriş, döşeme, çerçeve) teorik korozyon oranı hesaplamalarında donatı yüzey alanına bağlı olarak elde edilen korozyon oranlarının diğer yöntemlere göre daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ASTM (American Standards for Testing and Materials). (2003) “Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens” G1-03, **West Conshohocken**, PA, 1-9.
- Song H.W. and Saraswathy V. (2007) “Corrosion monitoring of reinforced concrete structures – a review”, **International Journal of Electrochemical Science**, 2, 1-28.
- Elsener. and Bernhard . (2005). “Corrosion rate of steel in concrete-measurements beyond the tafel law”, **Corrosion Science**, 47, 3019–3033.
- Zhu, W. and François, R. (2014) “Corrosion of the reinforcement and its influence on the residual structural performance of a 26-year-old corroded RC beam”, **Construction and Building Materials**, 51, 461–472.
- Bicer, K., Yalciner, H., Balkis, A.P. and Kumbasaroglu A. (2018) “Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers”, **Construction and Building Materials**, 185, 574–588.
- Cavaco, E.S., Neves, L.A.C. and Casas, J.R. (2017) “Reliability-based approach to the robustness of corroded reinforced concrete structures”, **Structural Concrete** 18(2), 316–325.
- Cao, C. and Cheung, M.M.S. “Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures”, **Construction and Building Materials**, 51, 75–81.
- Bazán, A.M., Gálvez, J.C, Reyes, E. and Galé-Lamuela, D. (2018) “Study of the rust penetration and circumferential stresses in reinforced concrete at early stages of an accelerated corrosion test by means of combined SEM, EDS and strain gauges”, **Construction and Building Materials**, 184, 655–667.
- Jinwei, C., Chuanqing, F., Hailong Y. and Xianyu, Jin. (2020) “Corrosion of steel embedded in mortar and concrete under different electrolytic accelerated corrosion methods”, **Construction and Building Materials**, 241(11), 71-79.
- Fu, C., Jin, N., Ye, H., Jin, X. and Dai W. (2017) “Corrosion characteristics of a 4-year naturally corroded reinforced concrete beam with load-induced transverse cracks”, **Corrosion Science**, 117, 11–23.
- Poupard, O., L’Hostis, V., Catinaud S. and Petre-Lazar, I. (2006) “Corrosion damage diagnosis of a reinforced concrete beam after 40 years natural exposure in marine environment”, **Cement and concrete research**, 36, 504–520.
- Andrade, C., Keddah, M., Nóvoa, X.R., Pérez, M.C., Rangel, C.M. and Takenouti, H. (2001) “Electrochemical behaviour of steel rebars in concrete: influence of environmental factors and cement chemistry”, **Electrochim. Acta** 46, 3905–3912.

- Ye, H., Jin, N., Fu, C. and Jin, X. (2017) “Rust distribution and corrosion-induced cracking patterns of corner-located rebar in concrete cover”, *Construction and Building Materials*, 156, 684–691.
- Zhang, R., Castel, A. and François, R. (2010) “Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process”, *Cement and Concrete Research*, 40, 415–425.
- Ye, H., Fu, C., Jin, N. and Jin, X. (2018) “Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: a comparative study of two accelerated corrosion techniques”, *Construction and Building Materials*, 162, 286–297.
- Yuan, Y., Ji, Y. and Shah, S.P. (2007) “Comparison of two accelerated corrosion techniques for concrete structures”, *ACI Structural Journal*, 104, 344.
- Lu, Y., Hu J., Li S. and Tang, W. (2018) “Active and passive protection of steel reinforcement in concrete column using carbon fibre reinforced polymer against corrosion”, *Electrochim. Acta* 278, 124–136.
- Wang, X., Zhang, X.G. and Dai, H. (2013) “Determination of residual cross-sectional areas of corroded bars in reinforced concrete structures using easy-to-measure variables”, *Construction and Building Materials*, 38, 846–853.
- Bazán, A.M., Gálvez, J.C., Reyes, E. and Galé-Lamuela, D. (2018) “Study of the rust penetration and circumferential stresses in reinforced concrete at early stages of an accelerated corrosion test by means of combined SEM, EDS and strain gauges”, *Construction and Building Materials*, 184, 655–667.
- El Maaddawy, T.A. and Soudki, K.A. (2003) “Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete”, *Journal of materials in civil engineering*, 15, 41–47.
- Imperatore, S., Leonardi, A. and Rinaldi, Z. (2012) “Mechanical behaviour of corroded rebars in reinforced concrete elements”, *Mechanics, Models and Methods in Civil Engineering*, Mech, 61, 207–220.
- Xia, J., Jin, W. and Li, L. (2016) “Performance of corroded reinforced concrete columns under the action of eccentric loads”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28, 4015087.
- Abosrra, L., Ashour, A.F. and Youseffi, M. (2011) “Corrosion of steel reinforcement in concrete of different compressive strengths”, *Construction and Building Materials*, 25, 3915–3925.
- Lu, Y., Hu, J., Li, S. and Tang, W. (2018) “Active and passive protection of steel reinforcement in concrete column using carbon fibre reinforced polymer against corrosion”, *Electrochim. Acta*, 278, 124–136.
- Almusallam, A.A. (2001) “Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars”, *Construction and Building Materials*, 15, 361–368.

- Taşdemir, M. A., Özkul, M. H. ve Atahan, H. N. (1999) Türkiye’deki son depremler ve beton, **II. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, İMO**, Adana, 9-19.
- Göksu, C. and İlki, A. (2016) “Seismic behavior of reinforced concrete columns with corroded deformed reinforcing bars”, **ACI Structural Journal**, 113, 1053-1064.
- Ma, Y., Che, Y. and Gong, J. X. (2012) “Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading”, **Construction and Building Materials**, 29, 548-556.
- Di Carlo, F., Meda, A. and Rinaldi, Z. (2017) “Numerical evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns”, **Engineering Structures**, 153, 264-278.
- Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z. and Riva, P. (2014) “Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns”, **Engineering Structures**, 76, 112-123.
- Yang, S. Y., Song, X. B., Jia, H. X., Chen, X. and Liu, X. L. (2016) “Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar”, **Construction and Building Materials**, 121, 319-327.
- Ahmad, S. (2009) “Techniques for inducing accelerated corrosion of steel in concrete” **Arabian Journal for Science and Engineering**, 34(2), 95.
- Boğa, A. R., Koçer, M. ve Öztürk, M. (2020) “Betonarme elemanlarda donatı korozyonunun farklı hızlandırılmış korozyon deney yöntemleri ile araştırılması”, **Uludağ University Journal Of The Faculty Of Engineering**, 25(2), 693-712.