



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DİATOMİT VE ZEOLİT İKAMELİ BETON İÇERİSİNDEKİ DONATI
KOROZYONUNUN ELEKTROKİMYASAL EMPEDANS
SPEKTROSKOPİSİ (EIS) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATİCE DURGUN

HAZİRAN 2015

DÜZCE

KABUL VE ONAY BELGESİ

Hatice DURGUN tarafından hazırlanan “DİATOMİT VE ZEOLİT İKAMELİ BETON İÇERİSİNDEKİ DONATI KOROZYONUNUN ELEKTROKİMYASAL EMPEDANS SPEKTROSKOPİSİ (EIS) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ” isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun 26.05.2015 tarih ve 26140 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye
(Tez Danışmanı)
Doç.Dr. Hüsnü GERENGİ
Düzce Üniversitesi

Üye
(Eş Danışman)
Doç.Dr. Yılmaz KOÇAK
Dumlupınar Üniversitesi

Üye
Doç.Dr. Ender Gökhan GECE
Bursa Teknik Üniversitesi

Üye
Yrd.Doç.Dr. Bekir Çomak
Düzce Üniversitesi

Üye
Yrd.Doç.Dr. Haydar GÖKSU
Düzce Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 05.06.2015

ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Hatice DURGUN’un İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

5 Haziran 2015

(İmza)

Hatice DURGUN

Sevgili Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Hüsnü GERENGİ'ye en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen eş danışmanım Doç. Dr. Yılmaz KOÇAK'a şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında benden yardımını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Mine KURTAY'a, Agata JAZDZEWSKA'ya ve Sibel KAPOĞLU'na, laboratuvar kapılarını açan YİĞİTLER BETON firması ve Laboratuvar sorumlusu Sn.Uğur KILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz saygılarımı, yardımlarını ve desteğini hiç esirgemeyen eşim Hamit DURGUN'a, Kızım Duru Mina DURGUN'a sevgilerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2012.26.HD.037 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiş ve Kaynaşlı Meslek Yüksekokulu Korozyon Araştırma Laboratuvarında yürütülmüştür.

5 Haziran 2015

Hatice DURGUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	1
ABSTRACT	2
EXTENDED ABSTRACT	3
1. GİRİŞ	8
1.1. KOROZYON.....	9
1.1.1. Korozyonun Önemi	9
1.1.2. Deprem ve Korozyon.....	12
1.1.3. Donatı Korozyonu	13
1.1.4. Donatı Korozyonunun Betonarmeye Etkileri	15
1.1.5. Türkiye’de Donatı Korozyonu ile ilgili Lisansüstü Çalışmaları	19
1.2. BETONDA KULLANILAN PUZOLONİK MALZEMELER.....	23
1.2.1. Puzolonik Malzemelerin Kullanılmasının Önemi	23
1.2.2. Zeolit	24
1.2.3. Diatomit	26
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
2.1 MATERYAL	28
2.1.1. Çalışma Elektrodunun Hazırlanması	28
2.1.2. Numunelerin Hazırlanması	31
2.1.3. Deney Düzeneginin Hazırlanması	34
2.1.3.1. Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatının 1 M HCl Çözeltisi İçerisindeki Korozyonu.....	35
2.1.3.2. Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatının 0,5 M H ₂ SO ₄ Çözeltisi İçerisindeki Korozyonu.....	36

2.2.YÖNTEM	36
2.2.1. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Yöntemi.....	36
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
3.1. DİATOMİT VE ZEOLİT İKAMELİ BETON İÇERİSİNDEKİ DONATININ 1 M HCl ÇÖZELTİSİ İÇERİSİNDEKİ KOROZYON ETKİSİNİN EIS YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ	42
3.2. DİATOMİT VE ZEOLİT İKAMELİ BETON İÇERİSİNDEKİ DONATININ 0,5 M H₂SO₄ ÇÖZELTİSİ İÇERİSİNDEKİ KOROZYON ETKİSİNİN EIS YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ	50
3.3. ORTAMIN KOROZYON MEKANİZMASINA ETKİSİ	59
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
5. KAYNAKLAR	65
6. EKLER	73
6.1. BU TEZDEN YAPILAN BİLİMSEL YAYINLAR	73

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. İstanbul hasar tespit raporu sonuçları (%).....	11
Şekil 1.2. Korozyona uğramış kiriş donatısı.....	11
Şekil 1.3. Marmara depremi sonrasında yıkılan binalardan bir kesit.	12
Şekil 1.4. Beton içindeki donatının korozyonu ve pasivasyon tabakası.	13
Şekil 1.5. Anodik ve Katodik Reaksiyonlar	14
Şekil 1.6. Değişik korozyon ürünlerinin demire kıyasla hacim değişimleri.....	17
Şekil 1.7. Donatıda hacim artışı ve betonda çatlak oluşumu.	18
Şekil 1.8. Donatının çatlaması, kapak atması ve paspayı tabakasının dökülmesi evreleri.	19
Şekil 1.9. Türkiye Zeolit Maden Yatakları Haritası.	25
Şekil 1.10. Türkiye Diatomit Maden Yatakları Haritası.....	27
Şekil 2.1. Polimer kaplanmış elektrodun görünüşü.	29
Şekil 2.2. Beton içerisine yerleştirilmiş polimer kaplı elektrodun şematik olarak gösterimi	30
Şekil 2.3. Taze deney numuneleri.....	30
Şekil 2.4. Sertleşmiş deney numunesi.	31
Şekil 2.5. Referans, zeolit ve diatomit ikameli betonların porozitesi	33
Şekil 2.6. Deney düzeneği [(1) Ag/AgCl elektrot, (2) Pt tel, (3) Çalışma elektrodu] ...	34
Şekil 2.7. R(C(R(CR))) devresi.	35
Şekil 2.8. Uygulanan bir potansiyel ve ortaya çıkan akım için AC dalga biçimleri.....	38
Şekil 2.9. X ve Y koordinatları açısından vektör.....	39
Şekil 2.10. Açı (θ) ve Büyüklük ($ I $) açısından vektör	39
Şekil 2.11. Gerçek (I') ve Hayali (I'') koordinatlar açısından vektör.	40
Şekil 3.1. (a), 30. (b), 60. (c), 120. (d) ve 240. (e) gün sonunda elde edilen Nyquist eğrileri.....	44
Şekil 3.2. Beton içerisindeki donatının korozyon mekanizmasını genel olarak gösteren empedans spektrumu.....	46
Şekil 3.3. Ölçüm süresince beton direncinde meydana gelen değişiklikler.....	47

Şekil 3.4. Ölçüm süresince donatı direncinde meydana gelen değişiklikler.	48
Şekil 3.5. Ölçüm süresince potansiyelde meydana gelen değişiklikler.	48
Şekil 3.6. 1 M HCl çözeltisine batırılan beton içinde gömülü donatı çeliğinin 240 gün sonraki görüntüleri.	49
Şekil 3.7. Donatı ve betonun dirençleri (a) ve referans, diatomit ve zeolit ikamli örneklerin potansiyelleri.	51
Şekil 3.8. Donatı çeliğinin 1.(a), 35.(b), 93.(c), 119.(d), 157.(e) günlerde empedans spektrumları.	54
Şekil 3.9. Ölçüm süresince potansiyel değişim.	55
Şekil 3.10. Ölçüm süresince betonun direnç değişim.	55
Şekil 3.11. Ölçüm süresince çelik donatının direnç değişimi.	56
Şekil 3.12. 0,5 M H ₂ SO ₄ çözeltisine batırılan beton içinde gömülü donatı çeliğinin 160 gün sonraki görüntüleri.	58
Şekil 3.13. (a), (b) ve (c) HCl ve H ₂ SO ₄ ortamlarında diatomit, zeolit ve referans beton numunelerdeki donatının zamanla ölçülen korozyon potansiyeli değerlerindeki değişim	60
Şekil 3.14. (a), (b) ve (c) HCl ve H ₂ SO ₄ ortamlarında referans, diatomit ve zeolit ikameli beton numunelerinin direnç değerlerinin zamanla değişimi	62

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Deneyde kullanılan düşük karbon çeliği numunesinin bileşimi.....	29
Çizelge 2.2. Beton numunelerin hazırlanmasında kullanılan malzemelerin kimyasal yapısı ve fiziksel özellikleri.....	32
Çizelge 2.3. Her bir beton grubu için 1m ³ karışıma giren malzeme miktarı.....	32
Çizelge 2.4. Empedans çalışmalarının kullanıldığı alanlar.....	37

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Maksimum genlik
C_{con}	Betonun kapasitesi
C_{dl}	Çift katmanlı kapasite
DC	Doğru akım
E	Doğru akım potansiyeli
E_{corr}	Korozyon Potansiyeli
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
GMSH	Gayri Safi Millî Hasıla
H_2SO_4	Sülfürik Asit
HCl	Hidroklorik Asit
I	Akım
I'	Gerçek Akım
I''	Hayali Akım
J	$\sqrt{-1}$
μA	Mikroamper
μm	Mikrometre
mV	Milivolt
Ω	Ohm
Θ	Radyan biriminden faz kayması
ω	Radyan biriminden saniyedeki frekans
R	Direnç
R_{ct}	Yük Transfer Direnci ($\Omega.cm^2$)
R_{con}	Beton Direnci
R_s	Çözelti Direnci ($\Omega.cm^2$)
SD	Silis Dumanı
Z	Empedans (Ω)
Z'	Hayali Empedans
Z''	Reel Empedans
ZT	Zeolitik Tüf

ÖZET

DİATOMİT VE ZEOLİT İKAMELİ BETON İÇERİSİNDEKİ DONATI KOROZYONUNUN ELEKTROKİMYASAL EMPEDANS SPEKTROSKOPİSİ (EIS) YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Hatice DURGUN
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Hüsnü GERENGİ
Eş Danışman: Doç. Dr. Yılmaz KOÇAK
Haziran 2015, 73 sayfa

Korozyon genel anlamda, malzemenin bulunduğu ortamda özelliklerini kaybederek parçalanması ve kullanılamaz hale gelmesi olarak tanımlanmaktadır. Korozyon olayı endüstrinin her bölümünde kendini göstermektedir. Teknolojinin bütün alanlarında metallerin kullanılması, inşaat sektörünün hızlı bir şekilde çelik konstrüksiyona yönelmesine neden olmaktadır. Dünya nüfusundaki hızlı artışın metal üretimiyle paralellik göstermesi, korozyona uğrayan cihazların bozulması veya arızalanması sonucu endüstriyel üretimin azalması, korozyon ürünü malzemelerin insan sağlığı ve çevre açısından son derece zararlı olduğunun iyice anlaşılması ve yeraltı maden yataklarının hızla tükeniyor olması gerçeği de korozyonun önemini arttırmaktadır.

Betonarme yapıların en önemli dezavantajlarından biri donatı korozyonudur. Donatıda meydana gelen korozyon, kesit kayıplarının yanında donatı-beton aderansında da zamanla azalmaya neden olmaktadır. Bu çalışmanın amacı, katkı malzemesiz (referans), %20 zeolit ve %20 diatomit ikameli beton numuneler içerisindeki nervürlü donatının, sanayide en çok kullanılan 0,5 M H₂SO₄ ve 1 M HCl asit içerisindeki korozyon mekanizmasını ortaya koymaktır. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) yöntemi kullanılarak ölçümler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda %20 zeolit ikameli beton numunelerindeki beton ve donatı dirençlerinin; %20 diatomit ikameli ve referans betona göre daha fazla olduğu, dolayısı ile daha az korozyona uğradığı saptanmıştır. Ayrıca, beton numunelerinin ve içerlerindeki donatının HCl ortamına kıyasla H₂SO₄ ortamında daha çok fiziksel ve elektrokimyasal değişime uğradıkları görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Betonarme, Diatomit, Donatı, Korozyon, Zeolit

ABSTRACT

INVESTIGATION CORROSION OF REINFORCEMENT IN DIATOMITE AND ZEOLITE SUBSTITUTED CONCRETE WITH ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY (EIS) METHOD

Hatice DURGUN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüsnu GERENGI

Co Adviser: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

June 2015, 74 pages

Corrosion, in general, is defined as the disintegration of the properties in a material which consequently renders it unusable. Corrosion can be seen in every branch of industry. The use of metal in every field of technology has rapidly steered the construction industry in the direction of steel construction. The precipitous increase in the world population shows parallels with metal production. It is thoroughly understood that the deterioration of equipment or its malfunction due to corrosion results in the reduction of industrial production and that the by-products of corroded materials are extremely harmful to human health and the environment. In addition, the fact that underground mineral deposits are rapidly running out further increases the significance of corrosion.

One of the major disadvantages of reinforced concrete structures is the corrosion of the steel reinforcement. Corrosion occurring in the reinforcement, over time, leads to reduction of the steel-concrete bond and to section losses. The aim of this study was to reveal the corrosion mechanism in ribbed reinforcement within additive-free (reference), 20% zeolite-doped and 20% diatomite-doped concrete samples, through exposure to 0,5 M H₂SO₄ and 1 M HCl, the most commonly used acids in industry. Measurements were carried out using Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). Results of the experiments showed that the resistance of the 20% zeolite concrete sample and reinforcement was greater than that of the 20% diatomite and the reference concrete samples and accordingly, the 20% zeolite sample was found to have undergone less corrosion. In addition, more physical and electrochemical changes were seen in the concrete samples and reinforcement in the H₂SO₄ medium compared to the HCl.

Keywords: Concrete, Corrosion, Diatomite, Reinforcement, Zeolite

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION CORROSION OF REINFORCEMENT IN DIATOMITE AND ZEOLITE SUBSTITUTED CONCRETE WITH ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY (EIS) METHOD

Hatice DURGUN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hüsnu GERENÇİ

Co Adviser: Assoc. Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

June 2015, 73 pages

1. INTRODUCTION:

Reinforced concrete is an excellent construction material due to its technical, economic and ecological advantages. However, corrosion of the reinforcing steel in concrete has become a major problem in construction (Akinyemi ve Alamu 2009, Ismail ve Ohtsu 2006). The main causes of reinforcing steel corrosion are reaction with various aggressive agents, such as atmospheric carbon dioxide and chloride ions, and chemical attack throughout the service life of the concrete (Poursaeve ve diğ. 2010). In ordinary Portland cement, these harmful effects can be reduced by substitute pozzolans (Tae 2012). Under a corrosive environment, concrete properties can be improved by using pozzolans such as zeolite and diatomite (Karakurt ve Topçu 2011, Karakurt ve Topçu 2012, Ikotun ve Ekolu 2010).

Zeolite is an important pozzolan. There are numerous publications on the properties and use of zeolite (Mertens ve diğ. 2009, Najimi ve diğ. 2012, Worrell ve diğ. 2000, Hasanbeigi ve diğ. 2012, Uzal ve diğ. 2012, Ahmadi ve Shekarchi 2010). Zeolites form a large family of crystalline aluminosilicates which have been widely used as additives in construction since ancient times. Zeolites are microporous crystalline solids with a well-defined structure consisting of a three-dimensional network of silicon-oxygen (SiO_4) and aluminum-oxygen (AlO_4) tetrahedra and offering large, internal and external surface areas, (Castaldi ve diğ. 2008). The high surface area is the basis of the high reactivity.

Previous works on the pozzolanic reactivity of zeolites have shown that zeolitic minerals are able to react with lime, produce cementitious phases and improve concrete properties (Perraki ve diğ. 2010).

Diatomite (kieselguhr) is a pozzolanic material containing high amounts of natural amorphous silica (silicon dioxide, SiO₂). Diatomite is a sedimentary rock composed of the fossilized skeletons of unicellular fresh-water plants known as diatoms. Diatoms are honeycomb silica structures that give diatomite useful characteristics such as high absorptive capacity, high surface area, high permeability, small particle size, chemical stability, excellent grindability, low thermal conductivity and low bulk density (Cong ve diğ. 2012, Elden ve diğ. 2010, Ergun 2011). Due to these properties, diatomite can be used as a pozzolanic material for partial replacement of cement in the production of concrete.

Corrosion was a significant phenomenon when the August 17 and November 12, 1999, Duzce earthquakes occurred in Turkey. Extensive research was carried out by Uygur (Uygur 2006) on the results of this earthquake damage. Building collapse was reported to be as high as 80% due to the low mechanical properties of the concrete and steel bars. It was shown that even one year of atmospheric pollution could cause serious corrosion production on steel bars, decreasing their area and damaging the bar-concrete surface. Corroded steel bars lose their ductility and can easily fail in a brittle manner. Moreover, it was concluded that using corroded steel bars in a structure could result in vital failures during dynamic loads such as earthquakes.

This research presents the results of an experimental investigation of corrosion in the steel reinforcement of concrete samples having three different substituents: 20% diatomite, 20% zeolite, and a reference without zeolite or diatomite. All concrete specimens were subjected to 0,5 M H₂SO₄ for 160 days and to 1 M HCl for 240 days. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) measurements were performed to analyse the corrosion process of these systems.

2. MATERIAL AND METHODS:

Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) is a method that has been successfully used for corrosion rate measurements for the past 30 years. This electrochemical measurement technique is operated by alternative current (AC) and is used in nearly every sector because it provides extensive information about the electrochemical structure of a system (Cogger ve Evans 1999). In recent times, EIS has been widely used to determine the corrosion rate of the reinforcement inside concrete (Sobhani ve Najimi 2013, Bragança ve diğ. 2014). Because EIS contributes less damage to the working electrode as compared to electrochemical measurements performed by using direct current sources (Bereket ve Gerengi 2014), the same sample can be used repeatedly for EIS measurements (Gerengi ve diğ. 2012). This method, via a suitable equivalent circuit, measures the electrical response of the metal/solution interface within the specified frequency range and enables the determination of the electrochemical parameters required to evaluate the corrosion mechanism (Nace 1999).

The Gamry Instrument Potentiostat/Galvanostat/ZRA was used for the EIS measurements. Electrochemical potential values were obtained from the Open Circuit Potential slope drawn by Gamry software. The applied AC amplitude signal was equal to 10 mV over a frequency range of 0.01 Hz up to 100 kHz. Resistance values were calculated using the electrical circuit model $R(C(R(CR)))$.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS:

The process of corrosion in the concrete samples in the solution of 0,5 M H₂SO₄ and 1 M HCl were determined based on changes in three electrochemical parameters: corrosion potential (E), resistance of the concrete (R_{con}) and resistance of the embedded steel (R_{ct}). For each environment, determination of results was based on the average values obtained from five samples of three types of concrete: diatomite, zeolite and the reference. All three types of concrete reacted in similar ways under the corrosive environment. However, it was possible to identify the zeolite as the most resistant type of concrete. The addition of 20% zeolite or diatomite significantly influenced the transport of the solution into the concrete by changing the size of the pore channels. Low porosity values were obtained in the zeolite compared with the diatomite samples. It can be concluded that the porosity of cement has an important influence on corrosion indicator values.

Analysis of Nyquists plots allow calculation of resistance and potential values using equivalent electrical circuit model mentioned above, and the same circuit was used in determining the effect of an aggressive environment on concrete samples studied by Gurten et al. (Gurten ve diğ. 2005). They were using the same circuit model and obtained similar tendencies of steel bar behaviour. Obtained Nyquists plots shapes for two different environments were similar.

The results indicated that porosity plays a very important role in reinforcing concrete. Consequently, it was determined that the 20% zeolite-doped concrete samples had higher concrete and reinforcement resistance compared to the 20% diatomite-doped and the reference concrete, i.e., they showed less corrosion. Comparisons revealed that the concrete samples and the steel inside them exhibited many more physical and electrochemical changes in the 0,5 M H₂SO₄ environment than in the HCl environment.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK:

In this study, the measurements of the potential and resistance of concrete and steel rebars were investigated using the EIS technique, and the following conclusions were drawn:

- Porosity is the main factor controlling the initiation of corrosion in concrete. The porosity increases the rate of diffusion of water and electrolytes throughout the concrete and makes the concrete more susceptible to cracking.
- Nowadays, the main reason for the corrosion of concrete is the destruction of the rebars due to acid rain resulting from environmental pollution.
- It can be assumed that acid rain is one of the main sources of chemical degradation of concrete, because of including carbon dioxide, sulphates and chlorides, which are responsible for carbonation, crystallization, recrystallization and loss of strength.
- The chemical composition and porosity of the concrete influence the steel bars only in the initial stages of corrosion.
- Concrete is susceptible to attack by sulphuric acid produced either from sewage or from sulphur dioxide present in the atmosphere of industrial cities. This is due to the high alkalinity of cement concrete, which can be attacked by other acids as well. Sulphuric acid is particularly corrosive because of the sulphate ion

participating in the sulphate attack, in addition to the dissolution caused by the hydrogen ion.

- In order to stabilise the resistance of the steel bars, the pores can be blocked by corrosion products, making the process of steel deterioration by aggressive acid molecules more difficult.

1. GİRİŞ

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin uygun oranlarda karıştırılması ile üretilen başlangıçta plastik kıvamlı olup zamanla çimentonun hidratasyonu sonucu sertleşen yapı malzemesidir. Betonun zaman içinde yapısal ve mimari karakteristiklerini koruması gerekmektedir. Dayanıklılık olarak ifade edilen bu olay betonun fiziksel, kimyasal veya fizikokimyasal etkilere karşı direnç göstermesi şeklinde tanımlanmaktadır (Şimşek 2007).

Betonarme yapılar zaman içinde değişik nedenlerle dayanım ve dayanıklılığını kaybedebilir. Beton içindeki çelik donatının korozyonu sonucu betonda çatlak ve bozulmalar oluşabilir. Soğuk iklimlerde ise donma-çözülme etkisi altında benzer bozulmalar ortaya çıkabilir. Bunların dışında, diğer durabilite problemleri nedeni ile betonda çeşitli sorunlar oluşabilir. Betonarme yapıların tasarımında önceliğin dayanımdan çok durabiliteye göre yapılması anlayışı çağımızda giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle donatı korozyonuna bağlı çatlakların betonarme yapının durabilitesini olumsuz biçimde etkilediği ve performansını azalttığı bilinmektedir (Nowak ve Collins 2000, Taban 2010).

Türkiye'nin hemen her yerinde ve diğer ülkelerde her an kendiliğinden yıkılarak can ve mal kaybına neden olabilecek çok sayıda betonarme binanın bulunduğu şüphesizdir. Betonarme veya ön gerilmeli beton yapılarda çelik, beton içine gömülü olarak kullanılmaktadır. Doğru tasarlanmış geçirimsiz, kaliteli bir beton, çelik donatıyı fiziksel ve kimyasal olarak korozyondan korumaktadır. Fiziksel koruma zararlı maddelerin donatıya ulaşmasının engellenmesiyle, kimyasal koruma ise yüksek pH'lı bir ortam oluşturulması ile gerçekleşmektedir. Ancak yoğun olarak çevresel etkilere maruz yapılarda kısa sürede korozyon gelişimleri söz konusu olabilmektedir. Özellikle deniz yapılarında ve kimyasal madde üreten tesislerde daha hızlı gelişebilen korozyon problemi, nispeten uzun zamanlarda klorürlere ve karbondioksit etkisine maruz diğer yapılarda da ortaya çıkmaktadır (Yiğiter 2008).

Beton dayanımını artırmak üzere kullanılan betonarme demirlerindeki korozyon sadece metalin değil beton yapının ömrü açısından da önem taşımaktadır (Ülger 2006). 20.yy'dan sonra hızla artan betonlaşma, günümüzdeki betonarme hasarlarının da önemini giderek artırmaktadır. Bilinçsiz yapılaşma, buzlanmaya karşı aşırı tuz kullanımı gibi betonarme korozyonunun yıkıcı etkisini artırmış ve depreme bile gerek kalmadan yapılar çökmeye başlamıştır. Gerek stratejik açıdan gerekse hayati açıdan önemi olan yapıların bu tür hasarlar sonucu zarar görmesi ve yeniden yapmak için sarf edilecek paraların ve zamanın büyüklüğü yapı hasarlarının göz ardı edilmemesi gereken ciddi problemler olduğunu göz önüne sermektedir (Üncü 2006).

Bu çalışma, elektrolit ortamda betonarme yapıların adım adım nasıl korozyona uğradığını göstermektedir. EIS yöntemi ile yapılan ölçümler sayesinde donatının korozyon hızı belirlenebilmektedir. Bu doğrultuda elde edilen veriler sayesinde betonarme yapılardaki korozyon, kritik noktaya geldiğinde acil müdahale olanağı bulunmaktadır. Bu ölçüm metodu modüler hale getirilerek bütün betonarme yapıların anlık (on-line) korozyon durumu ölçülebilir.

Bu çalışmada amaç, diatomit ve zeolit ikameli beton numunelerin sırasıyla 1 M HCl ve 0,5 M H₂SO₄ içerisinde nasıl korozyona uğradığını elektrokimyasal olarak ortaya koymaktır. Ayrıca bu çalışma ile donatının korozyon hızı belirlenmekte, hangi elektrolit ortamın donatı üzerinde daha korozif etkide bulunduğu tespit edilmektedir.

1.1. KOROZYON

1.1.1. Korozyonun Önemi

Korozyon, metal veya metal alaşımlarının kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda bulunduğu ortam şartlarında bozulmasıdır (Gerengi ve Kurtay 2013).

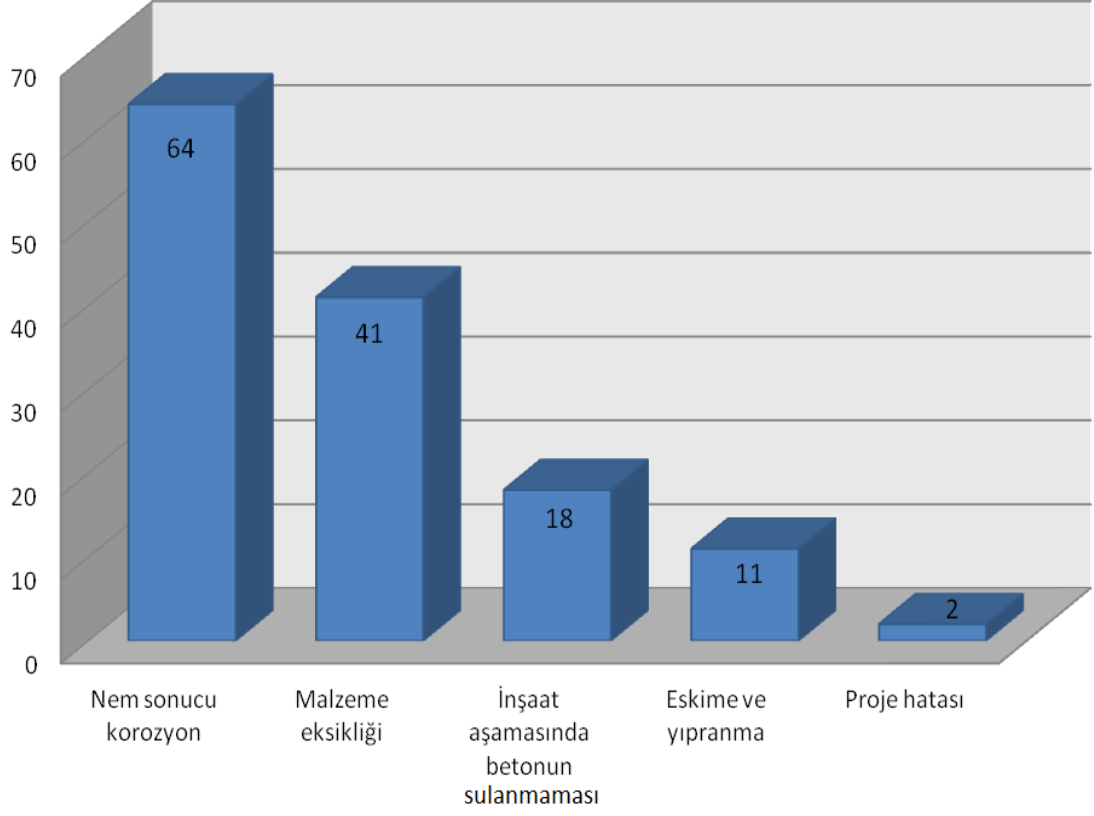
Korozyon nedeni ile malzemeler istenmeyen değişimlere uğrayarak maddi ve sağlık yönünden zararlara neden olmaktadır. Son yıllarda ekonomik ve sosyal açıdan büyük önem kazanan korozyon ile ilgili araştırmalar artmaktadır. Korozyon miktarıyla doğru orantılı olarak, mevcut betonarme yapıdaki donatı ve beton arasındaki aderans olumsuz yönde etkilenmekte, yapı elemanlarının dayanımlarında önemli düşüşler söz konusu olmaktadır. Ülkemizdeki mevcut yapılarda, deprem güvenliği açısından büyük risk oluşturan etkenlerin başında donatı korozyonu ve bunun neden olduğu dayanım ve

aderans kayıpları gelmektedir (Demirtaş 2008).

Türkiye'deki korozyon kayıplarının GSMH'nin % 4.36'sına eşit olduğuna araştırmalar sonucu ulaşılmıştır (Yüzer 2003). 2012 yılında Türkiye'de Gayri Safi Yurtiçi Ar-Ge harcamasının Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (GSYİH) içindeki payının % 0,92 olduğu göz önünde bulundurulacak olursa, konunun önemi açıkça anlaşılmaktadır (TUIK 2014). Betonarme yapılarda, korozyondan kaynaklanan hasarlar ve bu hasarların onarımı için ayrılması gereken bütçenin büyüklüğü, korozyon için alınması gereken önlemlerin önemini ortaya koymaktadır.

Su, sulu ortamlar, atmosferik çevre ve değişik kimyasal madde ortamları söz konusu etkilerden bazıları olabilir. Yüksek sıcaklık altında çalışan sistemlerdeki metalik malzemeler de bulunduğu koşullardan etkilenerek korozyona uğramaktadır (Erbil 2012). Sonuç olarak; metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmadığı gibi, normal koşullar altında da korozyona uğrayabilir (Ülger 2006).

İzmit depreminde yıkılan binaların % 67'sinde korozyon görüldüğü söylenmiştir. 58 bin vatandaşımızın hayatını kaybetmesine, 122 bin vatandaşımızın yaralanmasına ve 411 bin binanın yıkılmasına veya ağır hasar görmesine neden olan 1999 depreminde korozyondan dolayı oluşan zararın maddi boyutu kabaca 168 milyar TL civarındadır. İstanbul ve körfezde kontrol edilen yapıların beton mukavemetleri çok zayıftır. Zayıf betonlar, korozyon (paslanma) problemi yaratmıştır (Şekil 1.1). İstanbul'u depremden daha fazla tehdit eden konu korozyondur. Kontrol edilen binalarda kullanılan demirler neredeyse erimiştir (Şekil 1.2) (Koç 1999).



Şekil 1.1. İstanbul hasar tespit raporu sonuçları (%) (Demirtaş 2008).



Şekil 1.2. Korozyona uğramış kiriş donatısı (Doğan 2009).

1.1.2. Deprem ve Korozyon

Deprem; iki ayrı sebeple yapıda korozyon oluşumuna neden olmaktadır. Birincisi, magnitudü düşük olan depremlerde yapıda bulunan hatalı malzeme kullanımı ve tasarımındaki hatalar ile oluşan kılcal çatlaklardan donatıya çeşitli elementlerin difüzyonunu kolaylaştırması sonucu korozyon oluşumuna sebep olmasıdır. Ayrıca bu etkinin yapı ömrü boyunca defalarca tekrarlanıyor olması da küçük bir depremle bile büyük yapıların yıkılmasına sebep olabilir. İkincisi, daha önce herhangi bir şekilde donatısı korozyona uğramış yapılar, olabilecek orta büyüklükteki bir depremde kullanılmayacak derecede hasar görebilmesidir. Deprem riski olan bölgelerdeki korozyon oluşumu, yapının deprem bölgesinde olmasından dolayı göreceği sismik kuvveti arttırmaktadır (Doğan 2009).

Betonarme demirlerinin korozyonu sonucu demir yalnız çürümekle kalmaz, korozyon ürünlerinin meydana getirdiği hacim büyümesi nedeniyle betonda iç gerilmeler olur. Bunun sonucunda beton çatlar, hatta parçalanabilir. Bu durum bütün yapı için tamir edilmesi mümkün olmayan son derece tehlikeli bir sonuç doğurur. Özellikle köprü, viyadük gibi yapılarda korozyonun maddi zararları yanında yaşam tehlikesi de söz konusu olmaktadır (Şekil 1.3) (Hoşhan 1994).

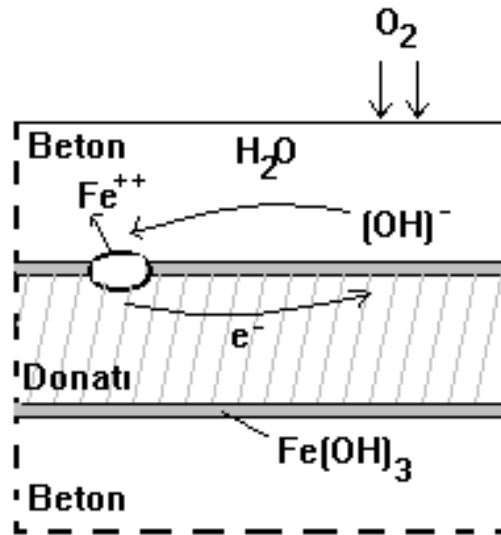


Şekil 1.3. Marmara depremi sonrasında yıkılan binalardan bir kesit (URL-1).

Betonun alkalın olması çeliğin aşınmasını önlemektedir. Alkalılık, asitliğin karşıtıdır. Her ne kadar metaller alkalınlar tarafından korunsun da, asitte aşınmaktadırlar. Beton bileşiminde çözünebilir kalsiyum, sodyum ve potasyum oksitleri, yüksek yoğunluğu olan mikroskobik gözenekleri bulunmaktadır. Yapısındaki oksitlere su eklendiğinde, kesinlikle alkalın olan hidroksitler oluşmaktadır. Gözenek suyunun bileşimi, iyonların hareketleri ve gözeneklerdeki gazlar, betonarme yapıların aşınmaya olan hassasiyetini analiz etmede oldukça önemli bir faktördür. Alkalın durumu, çeliğin yüzeyinde pasif bir tabaka oluşumuna sebep olur. Betondaki çelikte oluşmuş tabaka muhtemelen yarı metal oksit/hidroksit ve yarı betondaki mineraldir (Broomfield 1997).

1.1.3. Donatı Korozyonu

Betonarme bir yapının hava ile teması sonucunda beton içerisindeki su ve O_2 miktarı korozyonun oluşmasına neden olabilecek seviyededir. Çeliğin korozyonu, elektrokimyasal süreç ile açıklanabilir (Şekil 1.4.). Çelik yüzeyinde oluşan farklı elektrokimyasal potansiyele sahip anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin oluşturduğu elektrolit ile birleşir, donatının kendisi de elektronları ileten elektriksel iletken görevini görür (Aköz 2012).



Şekil 1.4. Beton içindeki donatının korozyonu ve pasivasyon tabakası (Aköz 2012).

Pasif tabaka bozulduğunda çeliğin yüzeyindeki pas görünmeye başlamaktadır. Aşınma klorür atağı ya da karbonasyon olsa da kimyasal tepkimeler aynıdır. Betondaki çelik

yıprandığında, gözenek suyunda çözülür ve elektronlarına ayrılır.

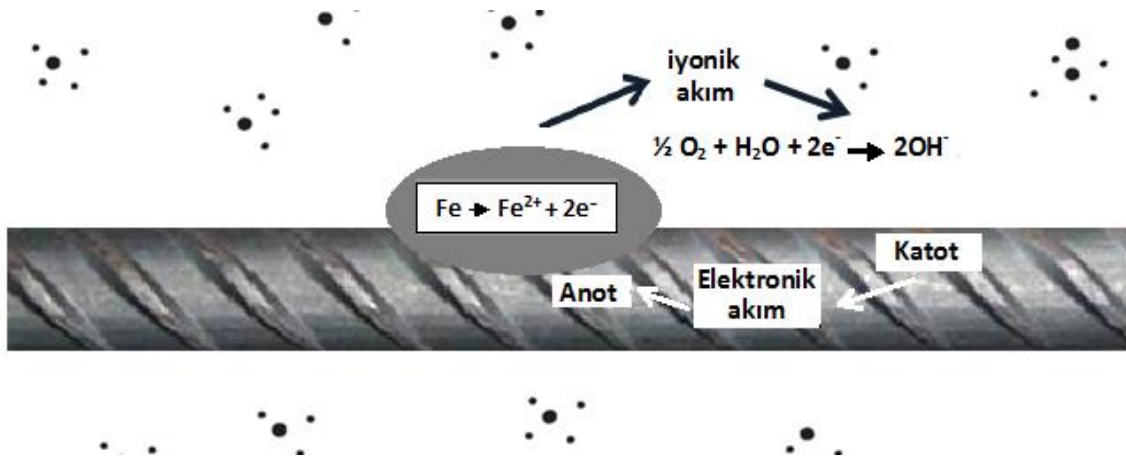


Anodik tepkimelerdeki iki elektron çeliğin yüzeyindeki elektriksel nötralityi korumak için başka bir yerde tüketilmek zorundadır. Diğer bir deyişle, çelik bölgesinde kurulmak için geniş miktarlarda elektrik yüklemesi imkânsızdır. Bir başka kimyasal tepkimede de elektronları tüketmek zorundadır. Bu tepkime su ve oksijen tüketir:



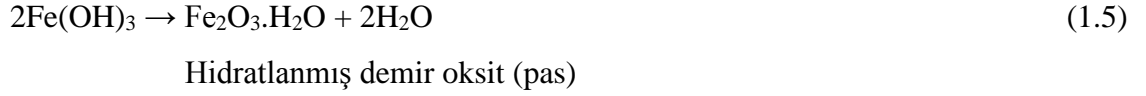
Denklem 1.1 ve 1.2 anodik ve katodik reaksiyonlar korozyon oluşum sürecindeki sadece ilk evredir.

Hidroksil iyonların katodik tepkimede meydana geldiği fark edilmektedir. Bu iyonlar katottaki klorür iyonları ve karbonasyon etkilerini engelleyerek, yerel alkaliniteyi artırır ve bu nedenle pasif tabakaları güçlendirir (Şekil 1.5). Aşınmanın gerçekleşmesi için su ve oksijenin gerekliliği göz önünde bulundurulmalıdır. Anodik ve katodik tepkimeler pas yaratımı sürecinde sadece ilk adımlardır. Bu tepkime çifti aşınmayı anlamak için önemlidir.



Şekil 1.5. Anodik ve Katodik Reaksiyonlar (Broomfield 1997).

Demirin su gözeneginde çözülmesiyle (eşitlikteki demir iyon Fe^{2+} çözülebilir) betonda çatlama ya da şişme görülmektedir. Paslanmanın oluşması için daha fazla aşamanın gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu birkaç yolla ifade edilebilir; biri aşağıda gösterilen demirli hidroksitin demir hidroksit haline gelmesi ve sonrada sulu demir oksit ya da paslanma haline gelmesidir:



Susuz demir oksit Fe_2O_3 , tam olarak yoğun olduğunda yerini aldığı çeliğin iki katı bir hacme sahip olmaktadır. Sulandığında şişip daha geçirgen bir hale gelmektedir. Bu, beton ara yüzeyindeki çeliğin artışının ikiden, on kata kadar olduğu anlamına gelmektedir. Betondaki çeliğin ve çubuktaki kırmızı/kahverengi kırılğan ince pasın ve beton çatlaklarında görülen pas lekelerinin olağan aşınması sonucunda gözlemlediğimiz üzere, kırılmaya ve şişmeye sebep olmaktadır (Broomfield 1997).

1.1.4. Donatı Korozyonunun Betonarmeye Etkileri

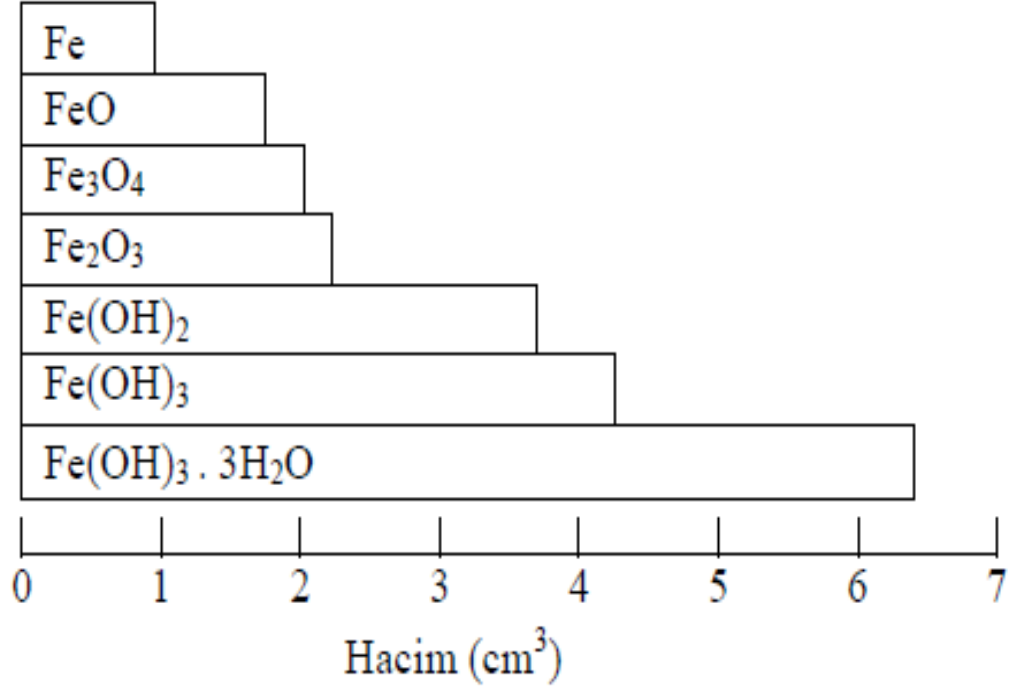
Korozyon, Türkiye de 17 Ağustos ve 12 Kasım 1999'da meydana gelen depremlerde önemli bir yer teşkil etmektedir. Depremin etkileri üzerine geniş çaplı bir araştırma yürüten Uygur, bina yıkımlarının yaklaşık %80'ine beton ve çelik donatıların sahip olduğu, düşük mekanik özelliklerine dayandığını ortaya koymuştur (Uygur 2006). Normal atmosferde 1 yılda ortaya çıkan etkilenme bile; çelik donatılarda hatırı sayılır bir korozyona, alanında küçülmeye ve donatı-beton yüzeyinde hasara neden olmaktadır. Paslanmış çelik donatılar, duktilitesini kaybeder ve kırılğan özellik kazanır. Bu nedenle, yapılarda korozyona uğramış çelik kullanımı; depremler gibi dinamik yüke maruz kalındığında hayati yıkımlara neden olmaktadır.

Betonarme; betonun çekme dayanımını ve yük taşıma kapasitesini artırmak, aynı zamanda çok katlı yapı elemanı üretmek amacıyla TS 708'e uygun çeliğin betondan sıyrılmayacak bir biçimde birleştirilmesiyle oluşan ve beraber çalışan kompozit yapı malzemesidir. Donatı ile betonun birleşimine yani yapışmasına aderans denir. Betonla donatının aderansını zayıflatan en büyük faktörlerden birisi de korozyondur. Korozyon miktarıyla doğru orantılı olarak, mevcut betonarme yapıdaki donatı ve beton arasındaki aderans olumsuz yönde etkilenmekte, yapı elemanlarının dayanımlarında önemli düşüşler söz konusu olabilmektedir (Şimşek 2007, Demirtaş 2008).

Betonarme elemanlarda meydana gelen korozyon, yapının güvenliğini hiç şüphesiz tehdit eden ve hatta sona erdiren bir durumdur. Özellikle depremlerden sonra hasar gören yapılar incelendiğinde, donatıların korozyon sebebiyle büyük kesit kayıplarına uğradığı, hatta bazı betonarme elemanlarda donatıların tamamen yok olup sadece izlerinin kaldığı görülmüştür. Bu durum, yıkımın esas sebepleri arasında donatı korozyonunun ilk sıralarda yer aldığını açıkça göstermektedir (Çil 2006).

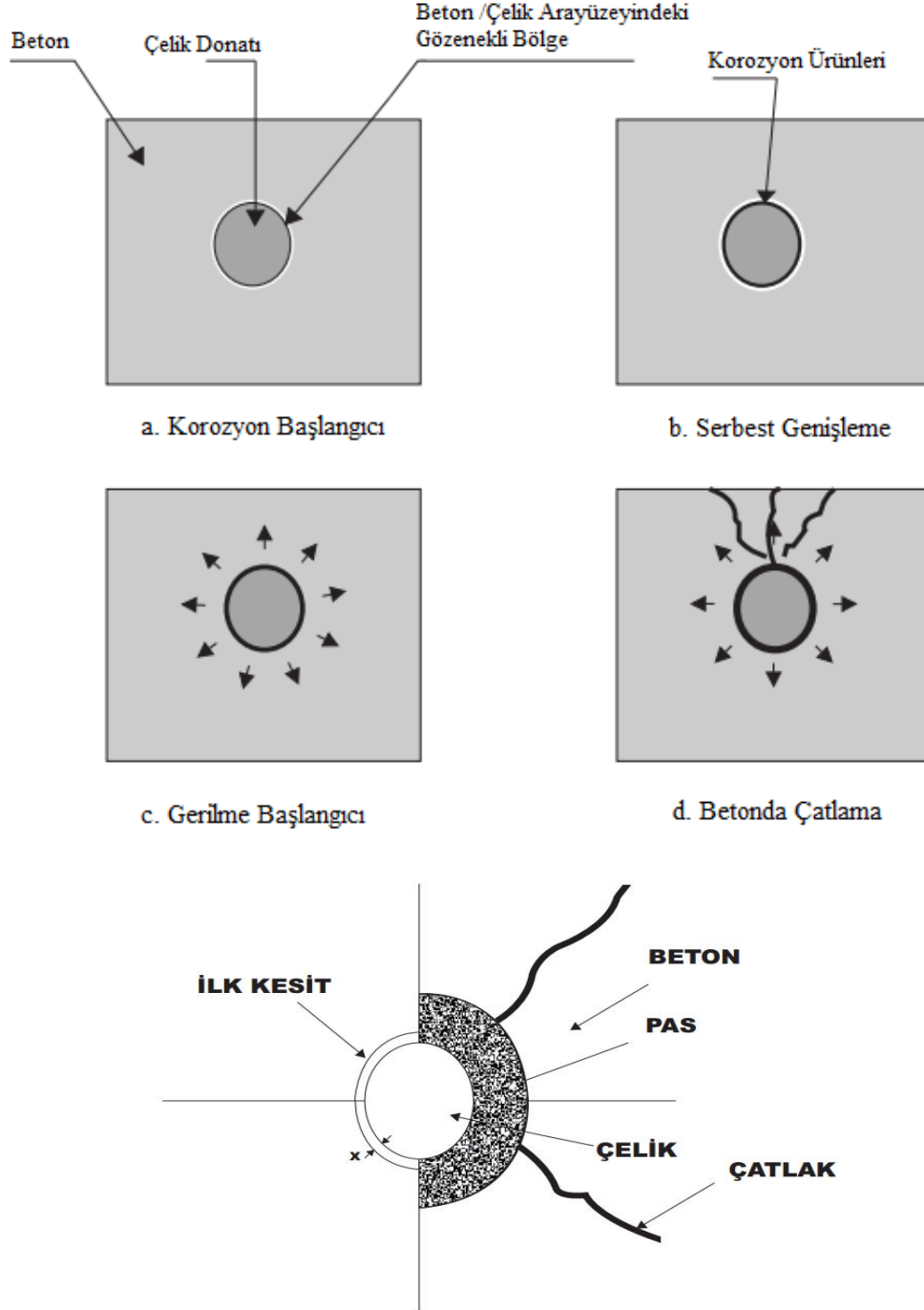
İnce bir örtü tabakasına sahip betonarme elemanlardaki donatılar korozyona maruz kaldığında pas payı tabakası hemen çatlayabilir. Bu durumda korozyon sonucu betonda oluşan çatlakların, donatıya göre yönü de önem kazanmaktadır. Donatıya paralel çatlaklar betonun dökülmesine yol açarak donatının fiziksel korumasının tamamen kaybolmasına ve atmosferik korozyonun başlamasına sebep olmaları açısından donatıya dik çatlaklardan daha tehlikeli olmaktadır. Bu sebepten donatı-beton arasındaki aderansın bozulması, çelik donatının çekme gerilmelerini karşılamasına engel olmaktadır. Donatı ile aderansın zayıf olduğu ve pas payı tabakası kalınlığının nispeten fazla olduğu elemanlarda donatı üzerindeki bölgede kapak atma şeklinde hasar görülebilir. Özellikle dikdörtgen kesitli betonarme elemanlardaki köşe donatılarda bu hasara daha çok rastlanılmaktadır. Donatılar arasındaki mesafenin pas payı mesafesinin kalınlığından daha az olduğu sık donatılı elemanlarda ise tüm örtü tabaka şeklinde betonarme elemanından ayrılmaktadır. Bu durumda tüm donatılar tamamen çevresel ortama açık hale geleceğinden korozyon hasarı ivme kazanmaktadır. Öte yandan herhangi bir çatlak veya dökülme olmasa da gerçekleşecek olan bir miktar korozyon dahi donatı ile beton arasındaki aderansı zayıflamaktadır. Sadece bu durum bile yapı güvenliğinde risk teşkil etmektedir (Yiğiter 2008).

Donatı korozyonu değişik mekanizmalar ile gelişse de betonarme yapılarda hasar, eleman bünyesinde genişleyen ürünler oluşması sebebi ile ortaya çıkmaktadır. Bir başka deyişle, oluşan pas ürünleri korozyon oluşmadan önceki çelikten daha fazla hacim işgal etmektedir. Pas ürünleri ortamdaki oksijen içeriğine bağlı olarak çelikten altı kata kadar daha fazla hacim işgal edebilirler (Şekil 1.6).



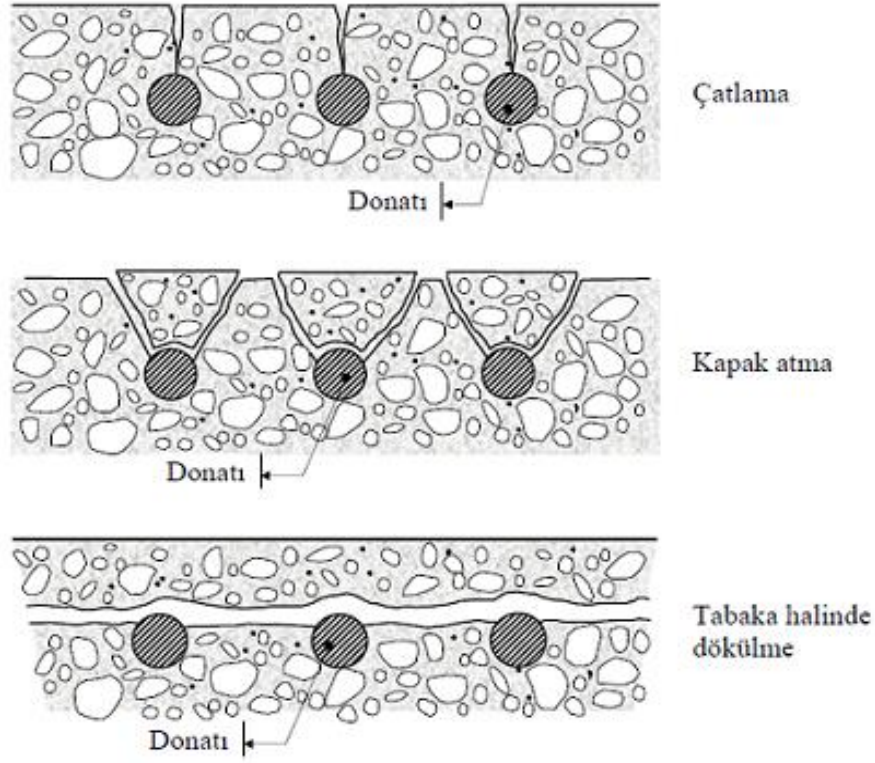
Şekil 1.6. Değişik korozyon ürünlerinin demire kıyasla hacim değişimleri.

Bu hacim artışı, başlangıçta donatı ile beton ara yüzündeki boşlukları doldurmak sureti ile aderans dayanımında bir miktar artışa; ancak olayın devamında arayüz bölgesinde aderans kayıplarına neden olmaktadır. Aderans dayanımında başlangıçta meydana gelen artış ve zamanla meydana gelen kayıplar, çekip-çıkarma (pull-out) deneyleri ile araştırılmaktadır. Donatıdaki hacim artışı betonda çekme gerilmeleri doğurmaktadır (Şekil 1.7). Bu gerilmeler, çekme dayanımı ve çekmede uzama oranı çok düşük ve gevrek bir malzeme olan betonda donatıya paralel çatlaklar oluşturmaktadır. Betondaki çatlak oluşumu, donatının korozyonunu, donatıdaki korozyon da betonun hasarını hızlandıran girişimli olaylar olup, betonarme elemanın ömrünü dolayısı ile yapı güvenliğini azaltmaktadır (Aköz 2012).



Şekil 1.7. Donatıda hacim artışı ve betonda çatlak oluşumu (Aköz 2012).

Korozyon reaksiyonları sonucu oluşan hacim artışı, beton bünyesinde çekme gerilmeleri oluşturmakta ve betonun çekme dayanımını aştığında hasara neden olmaktadır (Şekil 1.8). Şekli ne olursa olsun hasar oluşuktan sonra donatılar zararlı çevre koşullarına daha fazla maruz kalmaktadır. Bu nedenle hasarın şiddeti artmakta ve yapı emniyetli kullanım ömrünü yitirmektedir (Yiğiter 2008).



Şekil 1.8. Donatının çatlaması, kapak atması ve paspayı tabakasının dökülmesi evreleri (Yiğiter 2008).

Ülkemizde, Marmara Depremi'nin ardından, farklı üniversitelerin İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi öğretim üyeleri tarafından inşaat mühendisliği ve yapı sektörü açısından son derece önem taşıyan 'Betonda Kalite Deklarasyonu' yayımlanmıştır. Bu çalışmada, geçirimli beton ile üretilmiş taşıyıcı betonarme elemanlarındaki donatının, korozyona uğraması sonucu donatı ile betonun birlikte çalışmasının sona erdiği, bunun da depremlerde betonarme yapılar için önemli bir zaaf oluşturduğu belirtilmiştir. Ayrıca betonun, yapının projesinde öngörülen sınıfı sağlasa ve yeterli miktarda donatı doğru olarak yerleştirilmiş olsa bile donatı-beton aderansının korozyon nedeniyle zayıflaması durumunda taşıma gücünün önemli ölçüde azalmakta olduğu ifade edilmiştir (Çakır 2006).

1.1.5. Türkiye’de Donatı Korozyonu ile İlgili Lisansüstü Çalışmaları

Hoşhan (1994) yapmış olduğu çalışmada üç elektrot yöntemi kullanmıştır. Elektrotlar beton numuneler içine prizden önce yerleştirilmiş ve her beton numunesi bir defa kullanılmıştır. Klorürsüz normal beton örnekleri üzerinde yapılan deneylerle çeliğin 1, 7,

28, 60 ve 90 gün sonundaki korozyon hızları Tafel Ekstrapolasyon ve Lineer Polarizasyon yöntemleriyle belirlenmiştir. Ayrıca her beton numunesinin korozyon potansiyel değerleri ölçülerek, bunun zamana göre değişimi incelenmiştir.

Yalçın'ın (1996) yaptığı çalışmada, betonarme demirlerinin korozyonunu önlemek amacıyla beton karışımı içine değişik oranlarda kelomanit katmıştır. Çalışmalar üç grup deney numunesi üzerinde yapılmıştır. Her üç gruptaki beton numuneleri üzerinde galvanik akım yöntemi ile periyodik olarak korozyon hızı değerleri ölçülmüştür. Ayrıca betonarme demirlerinin statik potansiyel değerleride sürekli olarak ASTM C-876-91 metodu ile ölçülmüştür. Kelomanit katkısının betonun fiziksel özellikleri üzerine etkisini belirlemek üzere aynı oranlarında kolemanit katkılı çimentoların standart fiziksel özellikleri de tayin edilmiştir. Deneyler sonucunda %0,5 den daha az kolemanit katkısının betonarme demirlerinin korozyonu üzerine inhibitif etki göstermediği, %2 den daha fazla kolemanit katkısının ise, çimentonun fiziksel özellikleri üzerine bozucu etki yaptığı, en uygun kolemanit katkısının %1 olduğu öne sürülmüştür.

Keleştemur, (2002), çalışmasında beş ayrı ildeki fabrikalardan alınan PKÇ/B 32,5 R türü çimentosunun, oksit kompozisyonundaki farklılıklar açısından korozyon hızı üzerine etkisini araştırmıştır. Araştırma sonucunda, farklı bölgelerden alınan aynı tür çimentoların standartlarının aynı olması gerekirken, Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerindeki farklı fabrikalardan alınmış olan PKÇ/B 32,5 R çimentosunun bileşimindeki hammadde kaynaklarının ve kimyasal bilşenlerinin farklı olmasından dolayı, bu çimentoların betonarme donatısının korozyon hızını farklı şekilde etkilediğini ortaya koymuştur.

Şahin, (2002), çalışmasında her türlü beton ve benzeri çimentolu çevrenin içteki metalleri nasıl koruduğunu incelemiştir. Ayrıca donma önleyici tuz, deniz atmosferi ve başka tuz kaynakları olmadığı halde, bu yapılarda neden korozyon oluştuğuna dair deliller sunulmuştur. Betonarme çeliklerinin korozyona uğrama nedenleri, korozyondan korunma ve çeliği korozyona uğramış betonarme elemanlarının onarımına ait çözüm önerileri verilmiştir.

Boğa (2005) korozyona karşı daha etkili beton üretmek amacıyla yaptığı çalışmada; CEM II/B 32,5 R, CEM I 42,5 R ve CEM I 52,5 N çimentoları 300 ve 375 dozajlarında kullanarak katkısız ve %10 ile %20 oranında uçucu kül katkılı beton karışımları hazırlamıştır. Ayrıca numunelere, 28 ve 180 gün olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır.

Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrasında beton içerisindeki donatının korozyona uğradığı, beton içerisinde genleşmelerin oluştuğu ve numunelerin çatladığı belirtilmiştir.

Ülger (2006) çalışmasında betonarme çeliğinin klorürlü ve klorürsüz ortamlarda korozyon davranışlarına glikozun etkisini potansiyometrik olarak incelemiştir. Çalışmada elektrokimyasal üç elektrot tekniği uygulanmıştır. Betonarme elektrot, Ag/AgCl elektroda karşı korozyon potansiyelinden itibaren önce katodik yönde sonra da anodik yönde polarizlenerek akım-potansiyel eğrileri çizilmiştir. Ayrıca Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisiyle polarizasyon dirençleri belirlenmiştir. Hazırlanan beton örneklerinde su / çimento oranı 0.45 seçilmiştir. Ayrıca betonarme örneklerin 60 gün boyunca temas suyu pH'ları ve iletkenlikleri takip edilmiştir.

Üncü, (2006), yapmış olduğu çalışmada, boya sanayisinde katkı maddesi olarak kullanılan kolofonun, çelik ve betonarme çeliği korozyonu üzerindeki etkilerini, yeni deneysel yaklaşımlar önererek araştırmıştır. Çalışma sonucunda kolofonun yapışkan özelliği ile betonun gözeneklerini kapatmasından dolayı su ve çeşitli kimyasalların yapıya girişini ve çeliğe difüzyonunu engelleyerek korozyonu yavaşlatıcı bir etki gösterdiğini belirlemiştir.

Değirmenci (2006) çalışmasında, silis dumanı (SD) katkısının betonarme çeliği korozyonuna etkisini araştırmıştır. Betonarme çeliği korozyonunu ölçmek için üç elektrotlu sistem kullanılmıştır. Akım potansiyel gürültü ölçüm teknikleri, betonarme çeliğinin korozyonu için uyarlanmış, ayrıca tahribatlı ve tahribatsız ölçüm yöntemleri ile yaşlandırma yapılarak betonarme çeliğinin korozyonu belirlenmiştir. SD betonun porozitesini azaltarak çeşitli korozif maddelerin çevreden çelik yüzeyine difüzyon hızını kısıtlamasına rağmen, çelik yüzeyinde kendisinin temas ettiği bölgelerde korozyon direncini düşürerek, özellikle lokalize korozyonunu hızlandırdığı belirtilmiştir.

Kılıçoğlu (2007) çalışmasında, yapının korozyon potansiyeline tahribatsız yöntemle; donatıların kütle kaybı elektrot potansiyel değişimlerini karşılaştırmıştır. Beş adet numunenin elektrot potansiyelleri; nemli ve nemsiz olmak üzere iki farklı ortamda ölçülmüştür. Donatıların kütle azalımı elektrot potansiyel değişiminin ölçülmesi sonucunda, bu iki parametrenin birlikte değişimi incelenmiş ve bu değişimin korozyonla ilişkisi bulunduğu yönünde güçlü bulgular belirtilmiştir.

Doğan (2008) yapmış olduğu deneysel çalışmasında, uçucu kül veya silis dumanı katkılı betonlardan oluşan iki seri beton üretmiştir. ‘Merkezi Kompozit Tasarım’ adındaki deneysel tasarım ve analiz yapan istatistiksel yöntem kullanılarak her seride karışım parametrelerinden toplam bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı ve puzolan/bağlayıcı oranı bağımsız değişken olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, Merkezi Kompozit Tasarım yönteminin, puzolan katkılı betonların basınç dayanımı ve geçirimsizlik özelliklerinin optimizasyonunda en uygun beton bileşimini belirlemek için son derece elverişli olduğu belirtilmiştir.

Keleştemur (2008) tez çalışmasında, inşaat sektörünün temel yapı malzemesi olan ve yurdumuzda bol miktarda üretilen düşük karbonlu SAE1010 inşaat çeliğinden dual-faz çeliği üreterek, elde edilen bu çeliğin mekanik özellikleri ve beton içerisindeki korozyon davranışı üzerine temperleme ısıl işleminin etkisini incelemiştir. Çalışma neticesinde, dual-faz çeliklerinin mekanik özelliklerinin martenzit fazının sertliğine ve oranına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Temperleme ısıl işlemine bağlı olarak bu çeliklerin çekme, akma ve rezilyans modülü değerlerinin düştüğü, uzama, kesit daralması ve tokluk değerlerinin ise arttığı belirlenmiştir. Ayrıca, dual-faz çeliklerinin beton içerisindeki korozyon direncinin elde edildikleri ferritik-perlitik çelikten daha düşük olduğu ve temperleme ısıl işlemi ile korozyon direncinin daha da azaldığı tespit edilmiştir.

Menekşe (2008) alışmasında; betonarme çeliğinin, klorürlü ortamlardaki korozyon davranışlarına asetat ve yapı kimyasalının etkisini araştırmıştır. Çalışmalarda Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon ölümleri kullanılmıştır. Sabit sıcaklıkta (298°K), zeltelerin pH’sı 8’e ayarlanmıştır. Klorürlü ortamlardaki betonarme çeliğinin anodik çözünme hızını, asetat iyonu ve yapı kimyasalı inhibe etmektedir. İnhibisyon etkisi, asetat iyonu ve yapı kimyasalının korozyon ürünleri ile oluşturduğu kompleksin yüzeyde fiziksel olarak adsorplanması ile gerçekleştiği, inhibasyon etkisini klorür iyonlarının azalttığı belirtilmiştir.

Taban (2010) yaptığı çalışmanın ilk aşamasında, zeolitik tfn (ZT) tras olarak kullanılabilirliğini araştırmış ve imento deneyleri yapmıştır. Daha sonra farklı oranlarda zeolitik tf CEM I 42,5 R imentosu içerisine ikame edilerek, içme suyu ile üretilen beton örnekleri, içme ve deniz suyunda olgunlaştırılarak beton numunelerin basınç dayanımları, elastiklik modülleri, hızlı klor iyon geçirimsizlikleri, su işleme derinliği ve ultrasonik ses hızı belirlenmiştir. ZT katkılı betonarme numuneler üzerinde farklı

elektrokimyasal ölçüm yöntemleri ile donatı korozyonu araştırılmıştır. Korozyon testleri sonrası betonarme numuneler kırılarak beton-çelik ara yüzeyi ve beton mikro yapısal özellikleri taramalı elektron mikroskop (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak ZT katkısının, beton özellikleri ve betonarme korozyonuna etkileri çok yönlü çalışmalara ait tüm bulguların karşılaştırmalı olarak incelenmesi ile değerlendirilmiş ve en uygun koşullar belirlenmiştir.

Elyiğit (2011) çalışmasında korozyonun çeşitleri, lineer polarizasyon yöntemi kullanılarak, korozyonu etkileyen nedenler ve korozyonun beton içerisindeki bor kaplamalı betonarme çeliğine etkileri, korozyon tespit etme yöntemleri araştırılmıştır. Borun etkisi ile çeliğin yapısında oluşan borür tabakası sayesinde 2000 HV civarında sertliğe ve çok yüksek aşınma direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Çelik yüzeyindeki gözenekleri kapatmasından dolayı su ve çeşitli kimyasalların yapıya girişini ve çeliğe difüzyonunu engelleyerek korozyonu yavaşlatıcı bir etki gösterdiğini öne sürmüştür.

1.2. BETONDA KULLANILAN PUZOLONİK MALZEMELER

1.2.1. Puzolonik Malzemelerin Kullanılmasının Önemi

Çelik donatı ile güçlendirilmiş betonarme, teknik, ekonomik ve ekolojik avantajları yönünden mükemmel bir yapı malzemesidir. Ancak güçlendirici olarak kullanılan çelik donatıda meydana gelen paslanma, büyük bir problem teşkil etmektedir (Akinyemi ve Alamu 2009). Çelikte meydana gelen paslanmanın en önemli nedeni atmosferdeki karbondioksit, klorid iyonları ve betonun servis hayatı boyunca maruz kaldığı kimyasal saldırılar gibi agresif faktörlerdir (Poursaee ve diğ. 2010). Sıradan Portland Çimentosunda bu zararlı etkiler katkı malzemesi kullanılarak azaltılabilmektedir (Tae 2012). Aşındırıcı korozif ortamda, betonun özellikleri zeolit ve diatomit gibi katkıları kullanılarak geliştirilebilmektedir (Karakurt ve Topçu 2012, İkotun ve Ekolu 2010).

Bilindiği üzere çimento, beton üretiminde kullanılan en pahalı bileşen konumundadır. Çimentoların teknik özellikleri ve beton içerisinde kullanım miktarı, betonun performansına ve ekonomisine doğrudan etki etmektedir. Bu yüzden puzolonik malzemeler, betonun maliyetini azaltmak ve çeşitli özelliklerini olumlu yönde değiştirmek amacıyla, ya doğrudan katkı olarak ya da çimentonun bir kısmına ikame

etmek üzere betona katılmaktadır (Aruntaş 1996). Çimento harçlarının ve betonun basınç dayanımında olumlu etkisi olduğu düşünülerek ülkemizde puzolan kullanımı hızla artmaktadır. Diatomit ve zeolit de betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılan puzolanların ikisidir. Doğal kaynaklarımızdan olan diatomit ve zeolitin çimento ve beton harçlarının basınç dayanımı üzerine etkisini araştırmak üzere ülkemizde de çalışmalar yapılmaktadır.

Bir ülkenin gelişmesinde ve zenginleşmesinde yeraltı ve yerüstü kaynaklarının mümkün olduğu kadar kullanılarak değerlendirilmesinin önemli rol oynadığı göz önünde bulundurulduğunda, bu doğal malzemenin beton üretiminde daha yaygın olarak kullanılması gerektiği sonucuna varılmaktadır (Genç 2006).

Gerengi ve arkadaşları tarafından katkı malzemesiz (referans), %20 zeolit ve %20 diatomit ikameli beton numuneler içerisindeki nervürlü donatının asit yağmurlarının etkisi düşünülerek hazırlanan 0,5 M H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki korozyonu ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve sonuçları ortaya konulmuştur (Gerengi ve diğ. 2013).

1.2.2. Zeolit

Zeolit önemli bir ikame malzemesidir (Mertens ve diğ. 2009, Ahmadi ve Shekarchi 2010). Zeolit eski zamanlardan beri inşaatta katkı malzemesi olarak kullanılan aluminasilikat kristal ailesi içinde yer alır. Zeolitler, silikon-oksijen (SiO₄) ve alüminyum-oksijen (AlO₄) üç boyutlu bir ağı içeren geniş iç ve dış yüzey alanlara sahip iyi tanımlanmış mikro gözenekli yapıda katılardır (Castaldi ve diğ. 2008). Zeolitlerin yüksek reaktifliği de geniş yüzey alanına sahip olmasına bağlanabilir. Zeolitlerin puzolonik reaktifliği üzerine yapılan önceki çalışmalarda zeolitik minerallerin kireç ile reaksiyon gösterebildiği ve çimento benzeri bir faz ortaya çıkarıp beton özelliklerini üst seviyeye çıkardığı sonucuna varılmıştır (Perraki ve diğ. 2010).

Zeolitin doğal mineral olarak kullanılmasının sebepleri; yüksek iyon değişim kapasitesi, moleküler elek olma özelliği, yüksek silis bileşimine sahip olması, düşük yoğunluğu ve kristal yapısı bozulmadan dehidrasyona uygunluğudur. Bu özellikler zeoliti diğer mineral katkılardan üstün kılmaktadır. Zeolitin moleküler elek olması zeolitin öğütülmesini kolaylaştırmaktadır. Özgül yüzeyin normal çimento değerinden yüksek olması ise boşlukların azalmasını sağlamaktadır (Taban ve Şimşek 2009). Doğada büyük rezervler halinde bulunan zeolitlerin, işletilmesinin diğer madenlere göre daha kolay ve ucuz

1.2.3. Diatomit

Diatomit yüksek seviyede natural amorf silika (silikondioksit SiO_2) içeren puzolonik malzemedir. Diatomitler, diatom denilen tek hücreli taze su bitkilerinin fosilimsi iskeletlerinin oluşturduğu tortul kayalardır. Diatomların petek şeklinde dizilmiş silis yapıları, diatomitlere yüksek soğurma kapasitesi, geniş yüzey alanı, yüksek geçirgenlik, küçük parçacık boyutu, kimyasal stabilite, düşük ısı iletkenliği, düşük kütle yoğunluğu, iyi öğütülebilirlik gibi önemli özellikler katmıştır (Chong ve diğ. 2012, Ergun 2011). Bu özelliklerden ötürü, diatomitler beton yapımında çimento yerine ikame malzeme olarak kullanılabilir.

Doğal puzolanlar içinde yer alan diatomit ya da diğer bir adıyla kizelgur ise, volkanik orijinli olmayan tek doğal puzolandır. Diatomitin betonda kullanılması ile ilgili olarak, kaynak belirtilmeden %3 diatomit katkısı kullanılarak betonun basınç dayanımının %20, çekme dayanımının %10 arttığı belirtilmektedir. Aruntaş, H.Y.'nin yaptığı araştırmada diatomit toprağının çimento pastası ve betonun donma/çözülme dayanıklılığını önemli bir oranda iyileştirdiği gözlenmiştir (Aruntaş 1996). Öte yandan diatomitleri oluşturan diatomların gözenekli iskelet yapıda olması nedeniyle, çimentolu karışımların su ihtiyacını arttırarak dayanımda önemli düşümlere yol açtığı kaydedilmektedir (Karaüç 2008).

Diatomit su yosunları sınıfından olup, tek hücreli mikroskobik alglerin fosilleşmiş kavkılarında oluşmuş bir çökeldir. Diatomit amorf silissi bir yapıdadır ve tane iriliği 2-200 μm arasında değişmektedir. Diatomit yüksek gözenekliliğe ve düşük özgül ağırlığı olan beyaz bir fiziksel yapıya sahiptir. Kuru halde özgül ağırlığı 0.15-0.40 g/cm^3 arasında değişmektedir (Aruntaş 1996).

Toz halindeki diatomit çimento ağırlığının %2-4'ü oranında betona ilave edilerek betonun işlenebilme özelliğini arttırmakta ve kompasitesi yüksek betonlar elde edilebilmektedir (Genç 2006).

Diatomit, amorf silis, kristobalit ve atık minerallerin küçük miktarlarını ihtiva eden bir puzolonik maddedir (Ergun 2011). Diatomit, saf, kumlu, milli, killi, kireçli, marnlı, tüflü tiplerde gelişebilir. Diatomit önemli bir sanayi cevheridir. Çimento katkı maddesi olarak diatomit kullanımı ile ilgili araştırmalar son zamanlarda popüler olmuştur (Xu diğ. 2014,

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada hazırlanan diatomit ve zeolit ikameli beton numuneler; 240 gün boyunca 1 M HCl çözeltisi, 160 gün boyunca 0,5 M H₂SO₄ çözeltisi içerisine konulmuş ve potansiyelleri sırasıyla 10 günde bir ve 15 günde bir ölçülmüştür. Ölçülen potansiyel değişim değerleri karşılıklı yürüyen anot ve katot reaksiyonlarının varlığını ispatlamaktadır. EIS yöntemi metal yüzeyinde meydana gelen korozyon hakkında bilgi verebilen bir yöntemdir. EIS ölçümlerine uygun devre belirlendikten sonra deney verileri ZsimpWin programı ile analiz edilmiştir.

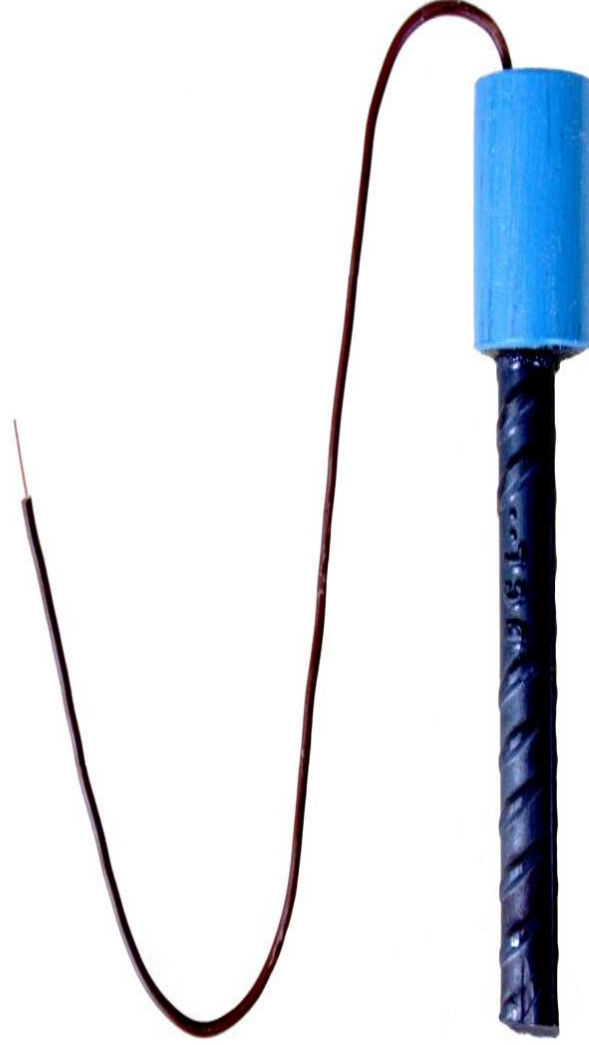
2.1 MATERYAL

2.1.1. Çalışma Elektrodunun Hazırlanması

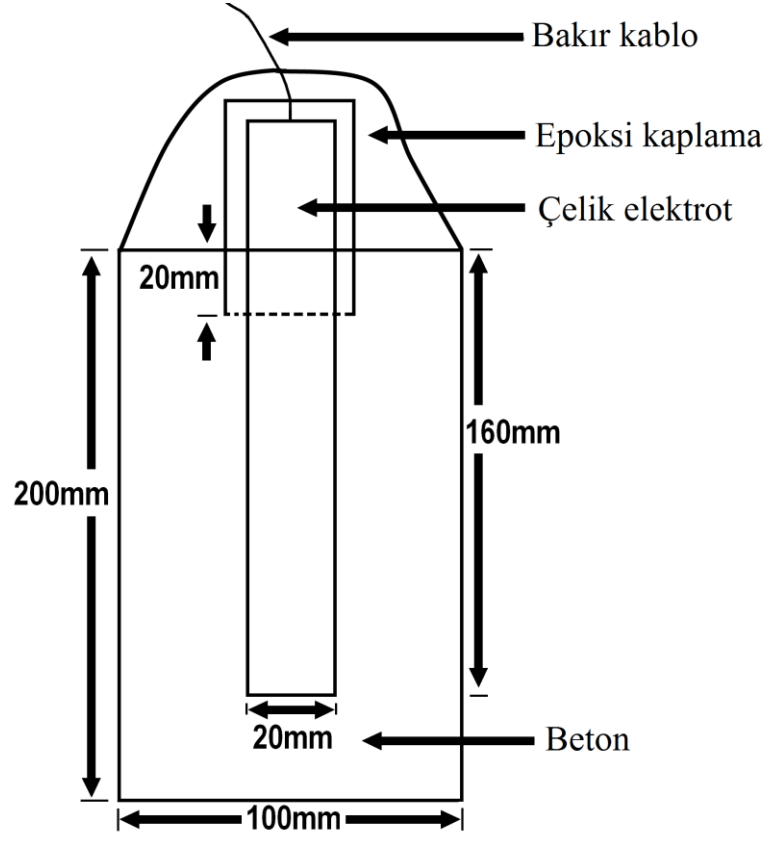
Deneyde kullanılan nervürlü inşaat çeliği numunesinin kimyasal bileşimi Çizelge 2.1’de verilmiştir. Kullanılan çelik elektrot 20 mm çapında 180 mm uzunluğunda kesilerek yüzeyi mekanik olarak temizlenmiştir. Daha sonra elektrot yüzeyi 800 ve 1200 numaralı zımpara kâğıtları ile iyice zımparalanarak metal yüzeyinde istenmeyen maddelerin temizlendiğinden emin olunmuştur. Deney sırasında çeliğin potansiyelinin kolayca ölçülebilmesi için çelik elektrodun diğer ucuna vida yeri açılarak, bu vida yerine 25 cm bakır kablo bağlanmıştır. Bakır telin ekli ucu, 4 cm uzunluğunda kesilen plastik borudan geçirilerek, epoksi reçine ile doldurulmuştur (Şekil 2.1). Bu işlemden sonra polimer kaplı elektrot beton numunesinin içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 2.2) (Gerengi ve diğ. 2012). Böylece beton içerisine yerleştirilmiş düşük karbon çeliğinin korozyon mekanizması incelenmiştir. Şekil 2.3’te deney numunelerinin priz süresi dolmamış halleri görülmektedir.

Çizelge 2.1. Deneyde kullanılan düşük karbon çeliği numunesinin kimyasal bileşimi

Element	Karbon (C)	Mangan (Mn)	Silisyum (Si)	Fosfor (P)	Kükürt (S)	Nikel (Ni)	Krom (Cr)	Molibden (Mo)	Kalay (Sn)	Demir (Fe)
Ağırlıkça (%)	0.36	0.23	0.20	0.61	0.025	0.11	0.12	0.01	0.02	98.315



Şekil 2.1. Polimer kaplanmış elektrodun görünüşü.



Şekil 2.2. Beton içerisine yerleştirilmiş polimer kaplı elektrodun şematik olarak gösterimi



Şekil 2.3. Taze deney numuneleri.



Şekil 2.4. Sertleşmiş deney numunesi.

2.1.2. Numunelerin Hazırlanması

Beton numunelerin hazırlanmasında kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi ve bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Beton numunelerin hazırlanmasında kullanılan malzemelerin kimyasal yapısı ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşenleri				Fiziksel Özellikleri			
	PÇ	Diatomit	Zeolit		PÇ	Diatomit	Zeolit
SiO ₂	18,68	79,56	68,85	Özgül Yüzey (cm ² /g)	4249	13,640	5740
Al ₂ O ₃	4,67	6,54	11,71	Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,17	2,28	2,18
				90 µm Elek analizleri			
Fe ₂ O ₃	3,53	2,76	1,29	(%)	4,08	9,80	17,60
				45 µm Elek analizleri			
CaO	64,56	2,45	3,97	(%)	-	28,60	35,80
MgO	0,98	0,79	1,06				
SO ₃	3,00	0,48	0,18				
Na ₂ O	0,14	2,63	0,29				
K ₂ O	0,73	0,69	2,19				
Serbest kireç	1,74	-	-				
Çözünmeyen							
Kalıntı	0,50	75,98	37,32				

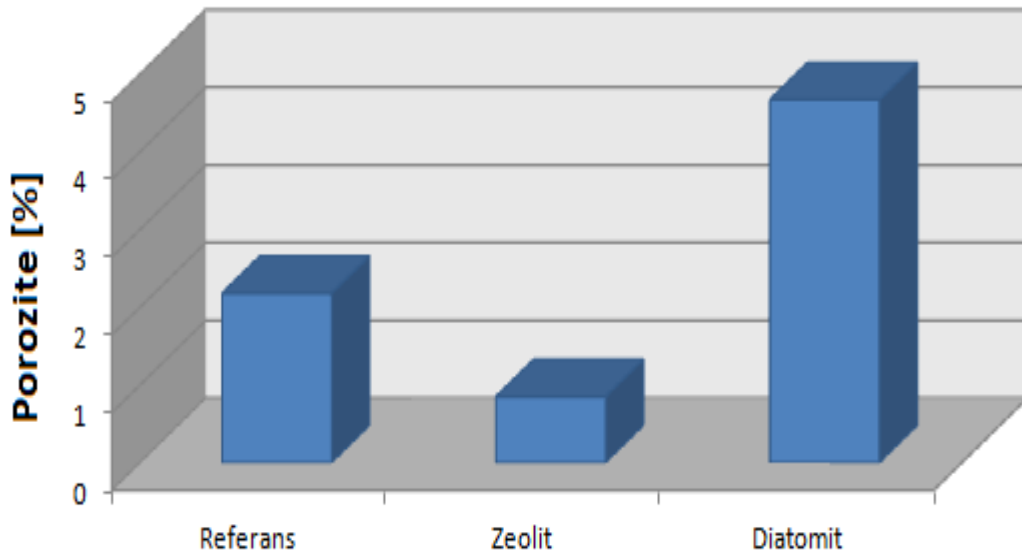
%20 diatomit, %20 zeolit ikameli ve birde referans olmak üzere üç farklı türde hazırlanan beton numunelerinin ikame katkı oranları Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Her bir beton grubu için 1m³ karışıma giren malzeme miktarı

Malzeme Adı		Özgül Ağırlık g/cm ³	PÇ (kg)	20D (kg)	20Z (kg)
Agrega	0-4	2,66	833	831	843
	4-19	2,69	586	593	602
	19-30	2,70	428	433	439
Toplam agrega			1846	1857	1884
PÇ		3,17	400	320	320
Diatomit		2,28	-	80	-
Zeolit		2,18	-	-	80
HAK		1,184	4,800	4,320	4,320
Su		1	139,7	139,7	139,7
Toplam malzeme			2391	2401	2428

Her numunenin toplam kesit alanı 94,2 cm²'ye eşittir. Deney numuneleri, bağlayıcı olarak TS EN 197-1 standardına uygun (TSE 2002) CEM I 42,5 R (Tkaczewska ve diğ 2011) Portland çimento kullanılarak hazırlanmıştır. Diatomit, Kütahya bölgesinden, zeolit ise Balıkesir Bölgesinden temin edilmiştir. Çalışmada agrega olarak, Düzce bölgesi Asar deresine ait 0-4 kırma kum, 4-19 ve 19-30 kırma taş agrega kullanılmıştır. Agregaların tamamı Yiğitler beton firması tarafından temin edilmiştir. Çalışmada bütün beton türlerinde tek tip granülometri kullanımı yoluna gidilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında karışım suyu olarak Düzce bölgesinden elde edilen kuyu suyu kullanılmıştır. Kimyasal katkı olarak Aydos yapı kimyasalları firmasına ait fluid 70 türü, katı madde içeriği 34,32 yoğunluğu (20 °C) 1,184 pH değeri (20 °C) 7,26 olan yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı beton katkı malzemesi kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,5'dir. Numunelerin beton sınıfı C30' dur

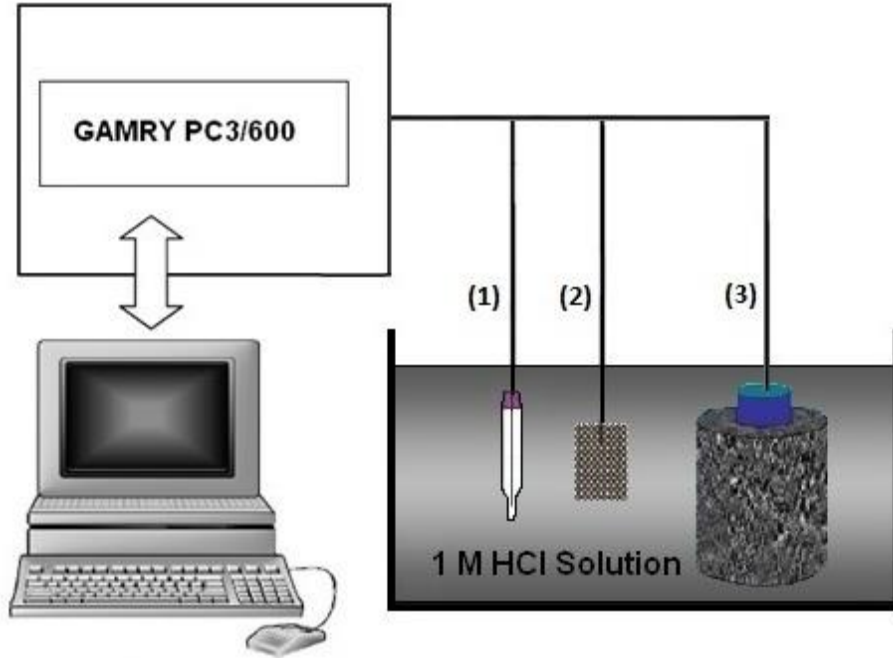
Porozite değerleri ASTM C642 (Kuo ve diğ. 2013) standardına uygun olarak numuneler çözelti içine daldırıldıktan 15 gün sonra gerçekleştirilmiş deneyler sonucunda elde edilmiş ve değerler Şekil 2.5'te verilmiştir. En küçük porozite değerlerinin referans, zeolit ve diatomit ikameli numuneler için sırasıyla 2,18, 0,85, 4,67 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2.5. Referans, zeolit ve diatomit ikameli betonların porozitesi

2.1.3. Deney Düzeneginin Hazirlanmasi

Deney düzenegi Şekil 2.6’da belirtilmiştir. Üçlü elektrot sisteminde çalışma elektrodu olan düşük karbon çeliği, referans elektrot olarak Ag/AgCl elektrodu ve karşıt elektrot olarak Pt tel kullanılmıştır (Gerengi 2009).

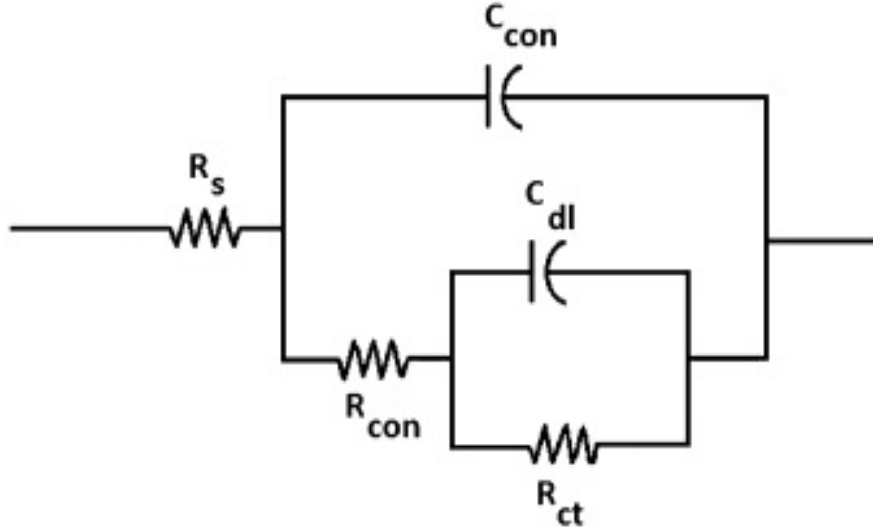


Şekil 2.6. Deney düzenegi [(1) Ag/AgCl elektrot, (2) Pt tel, (3) Çalışma elektrodu]

%20 diatomit, %20 zeolit ikameli ve birde referans (katkısız) olmak üzere hazırlanan üç farklı bileşime sahip beton numunelerin içerisindeki inşaat çeliğinin korozyon mekanizması 1 M HCl için 240 gün boyunca 10 gün periyotla ve 0,5 M H₂SO₄ için 160 gün boyunca 15 gün periyotla EIS yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Deney düzenegi Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Üçlü elektrot sisteminde çalışma elektrotumuz olan nervürlü inşaat çeliği, referans elektrot olarak Ag/AgCl elektrodu ve karşıt elektrot olarak Pt tel kullanılmıştır. Metal yüzeyine uygulanan alternatif potansiyel ve bunun yanıtı olarak alınan alternatif akım değerleri ile tasarlanan elektronik devrenin empedansı ölçülmektedir. Metal/çözelti ara yüzeyinde oluşan eşdeğer devrenin uygun şekilde analiz edilmesi için ZSimpwin 3.21 programı kullanılmıştır (Gerengi ve diğ. 2005).

Beton numuneler içerisine konulan çeliğin korozyon potansiyeli Gamry Instrument Potentiostat/Galvanostat/ZRA kullanılmıştır. Uygulanan AC amplitud sinyali 0.01 Hz ila

100 kHz frekans aralığında 10 mV'a eşittir. Elektrokimyasal veriler $R(C(R(CR)))$ devre modeli kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 2.7). Elektrik devresinde R_{ct} yük transferi direncini, C_{dl} çift katmanlı kapasiteyi, C_{con} betonun kapasitesini, R_{con} betonun direncini göstermektedir. R_s (yüzey direnci) ise betonun dış yüzeyinde ölçülen potansiyel noktadır.



Şekil 2.7. $R(C(R(CR)))$ devresi.

2.1.3.1. Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatının 1 M HCl Çözeltisi İçerisindeki Korozyonu

Hidroklorik asit, hidrojen ve klor elementlerinden oluşan, oda sıcaklığı ve normal basınçta gaz halinde bulunan kimyasal bir bileşiktir. Günümüzde PVC'den demir-çeliğe, organik madde üretiminden gıda sektörüne kadar hemen hemen tüm alanlarda hidroklorik asit kullanılmaktadır (Van 1996-2002). Hidroklorik asidin betonarme yapılara oldukça zarar veren bir kimyasal olduğu iyi bilinmektedir (Huang ve diğ. 2005). Özellikle metal, ilaç, petrol, kimya, gıda, boya, kâğıt, tekstil endüstrilerinde ve su ile ilgili işlemlerde, reçine rejenerasyonu, dekapaj, metal klorürleri üretiminde oldukça fazla miktarda HCl asit kullanılması çoğunlukla betonarme olan bu tesislerin korozyonunu gündeme getirmektedir.

Bu çalışmada çelik takviyeli katkı malzemesiz referans, %20 zeolit ve %20 diatomit ikameli beton numunelerinin sanayide en çok kullanılan 1 M HCl asit içerisindeki korozyonu, her 10 günde bir olarak 240 gün boyunca EIS yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Deney 160 gün olarak planlanmış fakat deney sonuçlarının durağan hale

gelmesi beklendiğinden 240 güne uzatılmıştır. Bu çalışmanın amacı, %20 diatomit, %20 zeolit ikameli ve birde referans olmak üzere üç farklı türde hazırlanan beton numuneler içerisindeki donatının 1 M HCl asit çözeltisi içerisindeki korozyon mekanizmasını ortaya koymaktır.

2.1.3.2. Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatının 0,5 M H₂SO₄ Çözeltisi İçerisindeki Korozyonu

Asit yağmurunun beton üzerinde yarattığı reaksiyonları gözlemlemek amaçlı hazırlanan örnekler 0,5 M H₂SO₄ içerisine daldırılmıştır. Beton yapısındaki elementlerden bir bölümü, sülfürik asit tarafından ortaya çıkan kimyasal saldırılara hassastır. Kimyasal saldırılar temellerde, yeraltı sularından gelen sülfürik asit ve dolgudaki pirit oksidasyonu ile kimyasal tesislerde endüstriyel zeminlerde, kimyasal tesis yakınlarındaki yapıların bodrum duvarlarında, üstyapılarda asit yağmurlarının etkisiyle görülebilir (Bassuoni ve Nehdi 2007).

Bu çalışmada çelik donatılı, referans beton, %20 zeolit ve %20 diatomit ikameli beton numunelerinin 0,5 M H₂SO₄ içerisindeki korozyonu, her 15 günde bir 160 gün boyunca EIS yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Bu çalışmanın amacı, %20 diatomit, %20 zeolit ikameli ve birde referans olmak üzere üç farklı türde hazırlanan beton numuneler içerisindeki donatının 0,5 M H₂SO₄ asit çözeltisi içerisindeki korozyon mekanizmasını ortaya koymaktır.

2.2.YÖNTEM

Diğer elektrokimyasal yöntemlere göre çalışma elektroduna daha az zarar vermesi sebebiyle elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) Yöntemi tercih edilmiştir.

2.2.1. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) Yöntemi

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS), elektrokimyasal sistemlerin kinetik ve mekanik özellikleri hakkında bilgi veren bir yöntemdir. Bu nedenle EIS; korozyon, yarı iletkenler, bataryalar, elektro kaplama ve elektro-organik sentez çalışmalarında başarıyla kullanılmaktadır. Çizelge 2.4., EIS kullanılarak çalışılan elektrokimyasal olayların bazılarını özetlemektedir.

Çizelge 2.4. Empedans çalışmalarının kullanıldığı alanlar

Araştırma Alanı	Uygulama
Korozyon	-Oran Belirlemeleri -İnhibitörler ve Kaplamalar -Pasif Tabaka Araştırmaları
Kaplama Değerlendirme	-Dielektrik Ölçümleri -Korozyon Koruması
Piller	-Şarj Durumu -Malzeme Seçimi -Elektrot Tasarımı
Elektrokaplama	-Yüzey Hazırlama -Tortu Mekanizması -Tortu Karakterizasyonu
Elektro-Organik Sentezler	-Adsorpsiyon/Desorpsiyon -Reaksiyon mekanizması
Yarı iletkenler	-Fotovoltaik Çalışması -Takviye Dağılımları

EIS'in temel avantajı, çalışılan elektrokimyasal hücreye uygun bir elektronik devre ile analiz edilebilme imkanındır. Elektrokimyasal bir reaksiyon gösteren bir elektrot arayüzü tipik olarak spesifik bir rezistör ve kondansatör kombinasyonunu içeren bir elektronik devrenin gösterimidir. Elektrokimyasal sistemi, eşdeğer devresi açısından karakterize etmek amacıyla, oluşturulan alternatif akım (AC) devresi teorisini kullanarak bu gösterimden yararlanılabilir. Uygulamada verilen bir elektrokimyasal sistem için elde edilen empedans çizimi bir ya da daha fazla eşdeğer devrelerle ilişkilendirilebilir. Bu bilgiler, sistem için mekanik bir modeli doğrulamak ya da en azından hatalı modelleri göz ardı etmek için kullanılabilir. Belirli bir model seçildiğinde, devre elemanları ile fiziksel ya da kimyasal özellikler bağdaştırılabilir ve devre modeli güncel hale getirilerek sayısal değerler elde edilebilir.

EIS teorisi, frekansın bir fonksiyonu olarak alternatif bir akıma veya gerilime yönelik bir devrenin yanıtını açıklayan AC teorisinin geliştirilen bir dalıdır. Doğru akım (DC) teorisinde (frekansın 0 Hz'ye eşit olduğu özel bir AC teorisi durumu) direnç, Ohm kanunu ile tanımlanır:

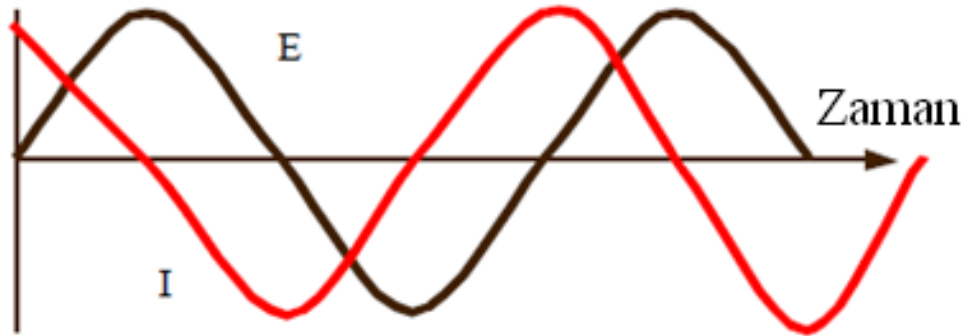
$$E = IR \quad (2.1)$$

Ohm kanunu kullanılarak bir devrede DC *potansiyeli* (E), ortaya çıkan *akım* (I) ve *direnç* (R) hesaplanabilir ya da başka iki değer bilinmesi halinde denklemin herhangi bir

terimi belirlenebilir. Potansiyel değerler *volt* (V), akım *amper* (A) ve direnç ise *ohm* (Ω) olarak ölçülür. Bir *rezistör*, bir DC devresindeki elektronların akışını engelleyen tek elemandır. Frekansın sıfır olmadığı AC teorisinde, denklem aşağıdaki gibidir:

$$E = IZ \quad (2.2)$$

Denklem 2.1'de olduğu gibi E ve I burada, sırasıyla *potansiyel* ve *akım* olarak tanımlanmaktadır. Z ise, direncin AC eşdeğeri olan empedans olarak tanımlanmaktadır. Empedans değerleri aynı zamanda *ohm* (Ω) olarak da ölçülür. Rezistörlere ek olarak *kondansatörler* ve *indüktörler* de AC devrelerindeki elektronların akışını engeller. Elektrokimyasal bir hücrede yavaş elektrot kinetiği, daha önceki yavaş kimyasal reaksiyonlar ve difüzyonun hepsi, elektron akışını engelleyebilir ve bir AC devresinde elektronların akışını engelleyen rezistörler, kondansatörler ve indüktörler için benzer olduğu göz önüne alınabilir. Şekil 2.8, bir devreye verilen ve ortaya çıkan AC akımı dalga biçimine uygulanmış olan bir gerilim sinüs dalgasının (E) tipik çizimini göstermektedir. İki iz yalnız genlik açısından değil aynı zamanda zamandaki kaymaları açısından da farklıdır.



Şekil 2.8. Uygulanan bir potansiyel ve ortaya çıkan akım için AC dalga biçimleri.

Birbiriyle olan ilişkisi açısından bakıldığında bunlar faz dışındadır. Tamamen dirençli bir ağ söz konusu olduğunda iki dalga biçimi kaymayabilir. Bunlar faz açısından tamamen aynı olabilir ve yalnız genlik açısından farklılık gösterebilirler.

Akımın sinüs dalgası, aşağıdaki denklem ile açıklanabilir:

$$I(t) = A \sin(\omega t + \theta) \quad (2.3)$$

Burada

$I(t)$ = ani akım

A = maksimum genlik

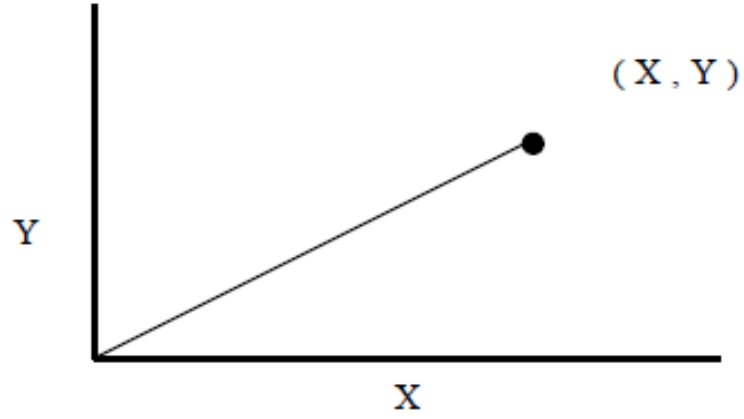
ω = radyan biriminden saniyedeki frekans = $2\pi f$

(Burada f = Hertz biriminden frekans)

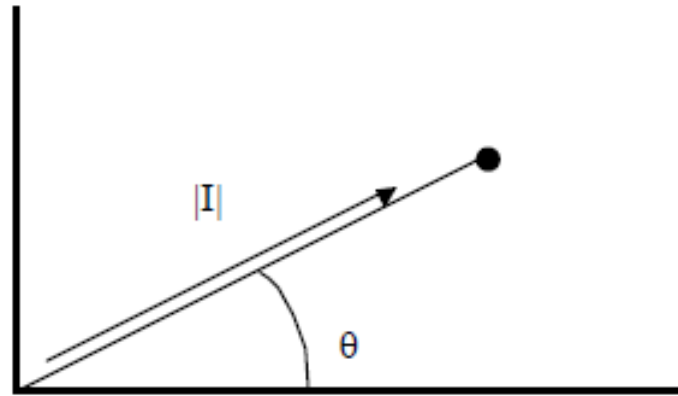
t = zaman

θ = radyan biriminden faz kayması

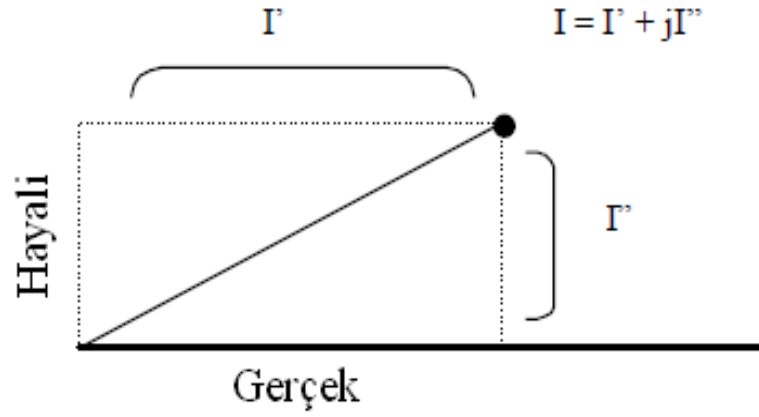
Vektör analizi, bir AC dalga biçiminin karakterize edilmesi için uygun bir yöntemdir. Genlik ve faz özellikleri açısından dalganın tanımlanmasını sağlar.



Şekil 2.9. X ve Y koordinatları açısından vektör



Şekil 2.10. Açısı (θ) ve Büyüklüğü ($|I|$) açısından vektör



Şekil 2.11. Gerçek (I') ve Hayali (I'') koordinatlar açısından vektör.

Şekil 2.8, 2.9, ve 2.10, Şekil 2.7'de ortaya çıkan akımın dalga biçimi için vektör analizlerini göstermektedir. Akımın dalga biçimi vektörü, grafiksel olarak çeşitli şekillerde açıklanabilir. Şekil 2.9, vektörün uç noktasının faz içi (x) ve faz dışı (y) bileşenlerinden oluşan bir (x,y) koordinat çifti açısından nasıl tanımlanabileceğini göstermektedir. Şekil 2.10'da vektör, faz açısı (θ) ve akımın büyüklüğü ($|I|$) ile tanımlanır. Şekil 2.11, sayısal analiz için genellikle daha uygun olan üçüncü bir yaklaşımı gösterir. Eksenler, gerçek (I') ve hayali (I'') olarak tanımlanmaktadır. Gerçek ve hayali bileşenler, kompleks sayı gösteriminin kullanılması halinde komplike denklemlerde tek bir sayı olarak ele alınabilir.

Bu kompleks sayı gösterimi kullanılarak bir AC akım vektörü, gerçek ve hayali bileşenlerinin toplamı olarak tanımlanmaktadır:

$$I_{\text{Toplam}} = I' + I'' j \quad (2.4)$$

Burada $j = \sqrt{-1}$

(Matematikçiler, $\sqrt{-1}$ için i kullansalar da elektrokimyagerler, akım sembolü olarak i ile karışmasını önlemek için j 'yi kullanmaktadır.)

Şekil 2.8, 2.9 ve 2.10'daki nokta yerinin değişmediği yalnız eksenlerdeki etiketlerin farklı olduğu görülmektedir. Noktanın pozisyonunun ifade edilmesi için üç farklı yolun hepsi

(x,y) çifti, faz açısı/büyüküğü ve gerçek/hayali koordinatlar aslında birbirleri ile aynıdırlar. Bir AC akımı ya da gerilim dalga biçiminin gerçek ve hayali bileşenleri, aynı referans dalga biçimine göre tanımlanmıştır. Gerçek bileşen, referans dalga biçimi ile uyum içindedir ve hayali bileşen tam olarak 90 derece faz dışındadır. Referans dalga biçimi, aynı koordinat eksenlerine istinaden vektör olarak akım ve gerilim dalga biçimlerini ifade etmemizi sağlar. Bu da bu vektör değerlerinin matematiksel kullanımını kolaylaştırır. Empedans vektörünü hesaplamak için gerilim ve akım vektörlerinin oranı olarak Denklem 2.2 kullanılmaktadır:

$$Z_{Toplam} = \frac{E' + E'' j}{I' + I'' j} \quad (2.5)$$

Burada AC gerilim vektörü, E, aynı zamanda kompleks bir sayı olarak da ifade edilebilir.

$$E_{Toplam} = E' + E'' j \quad (2.6)$$

AC empedansı için ortaya çıkan vektör ifadesi,

$$Z_{Toplam} = Z' + Z'' j \quad (2.7)$$

Akım ve gerilim vektörleri olarak aynı koordinat eksenleri açısından tanımlanır.

Şekil 2.10 ve 2.11 ile benzer şekilde empedansın mutlak genliği (vektörün uzunluğu) aşağıda belirtilen denklem ile ifade edilebilir:

$$|Z| = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad (2.8)$$

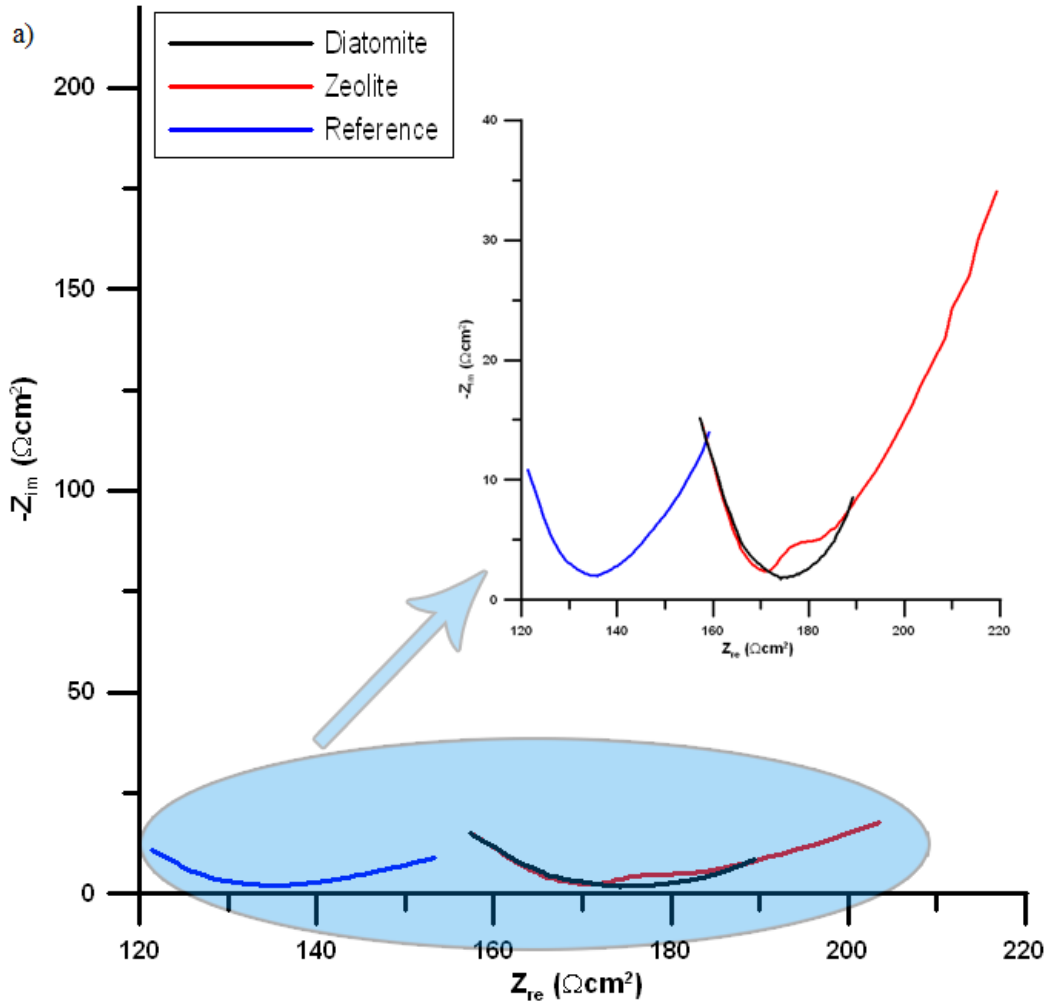
ve faz açısı da aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

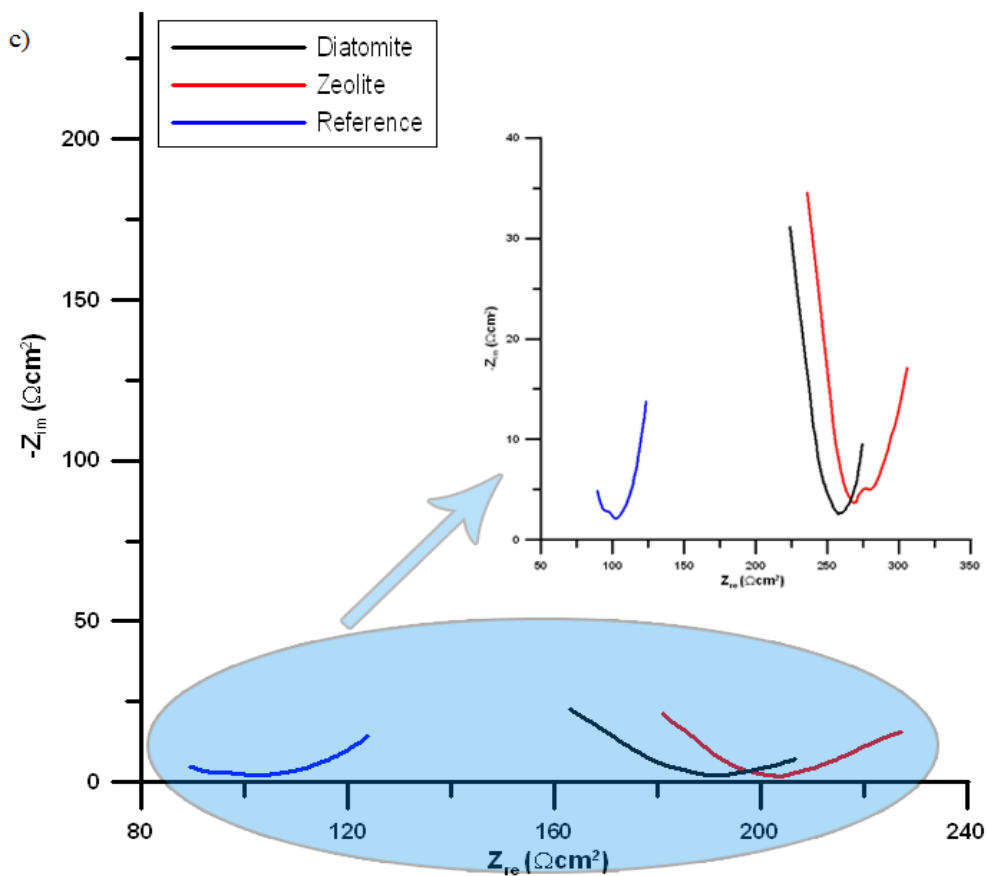
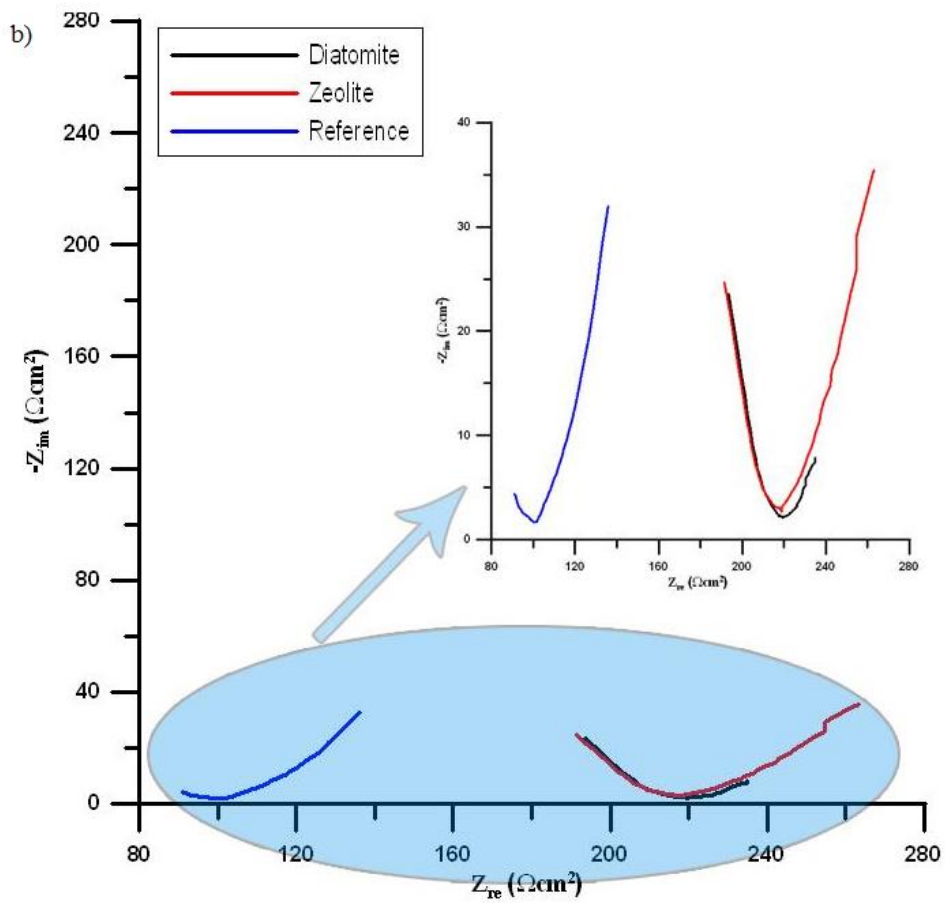
$$\tan \theta = \frac{Z''}{Z'} \quad (2.9)$$

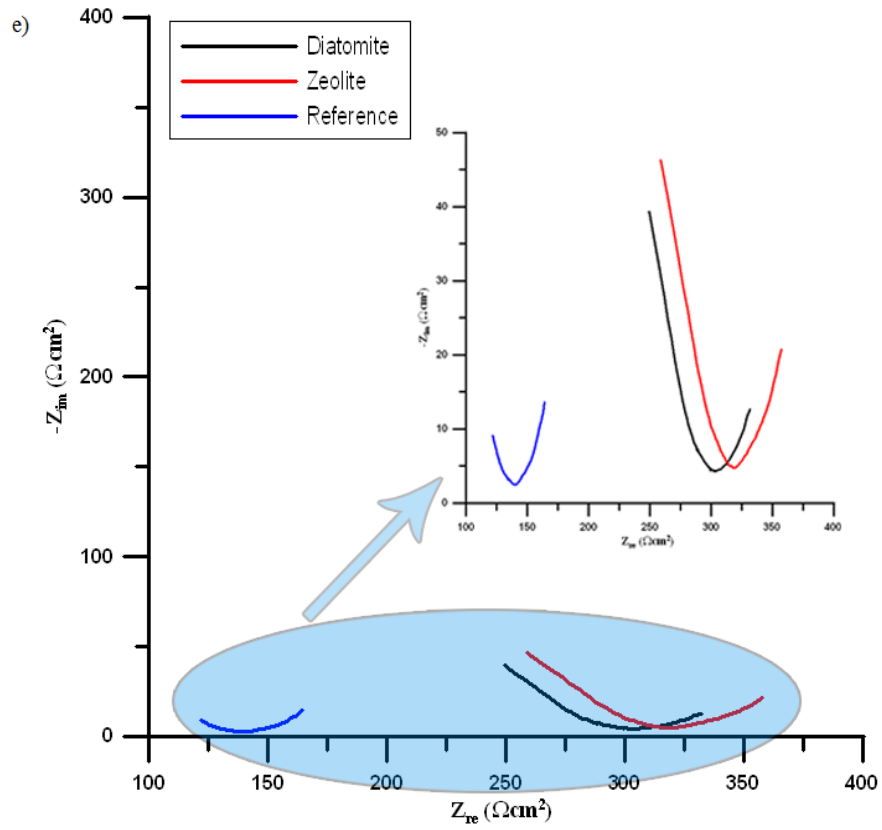
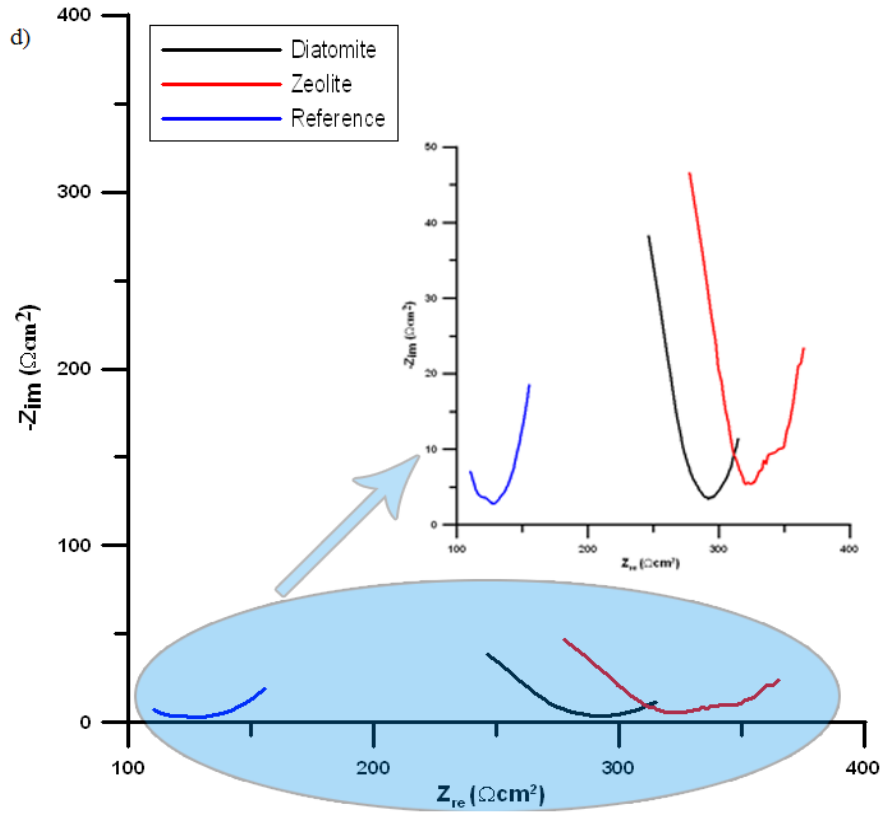
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. DİATOMİT VE ZEOLİT İKAMELİ BETON İÇERİSİNDEKİ DONATININ 1 M HCl ÇÖZELTİSİ İÇERİSİNDEKİ KOROZYON ETKİSİNİN EIS YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Referans, zeolit ve diatomit ikameli betonlar, 1 M HCl asit içerisinde 240 gün boyunca 10 günlük periyodlarla deneye tabi tutulmuştur. 240 gün sonunda beton ve içerisindeki donatının dirençleri ölçülmüş ve sonuçlar kıyaslanmıştır. Şekil 3.1’de bu numunelere ait donatı ve betonların dirençleri gösterilmiştir. Şekil 3.1. (a-e)’de, sırasıyla 1, 30, 60, 120 ve 240 gün sonunda numunelerin elde edilen Nyquist eğrileri görülmektedir.





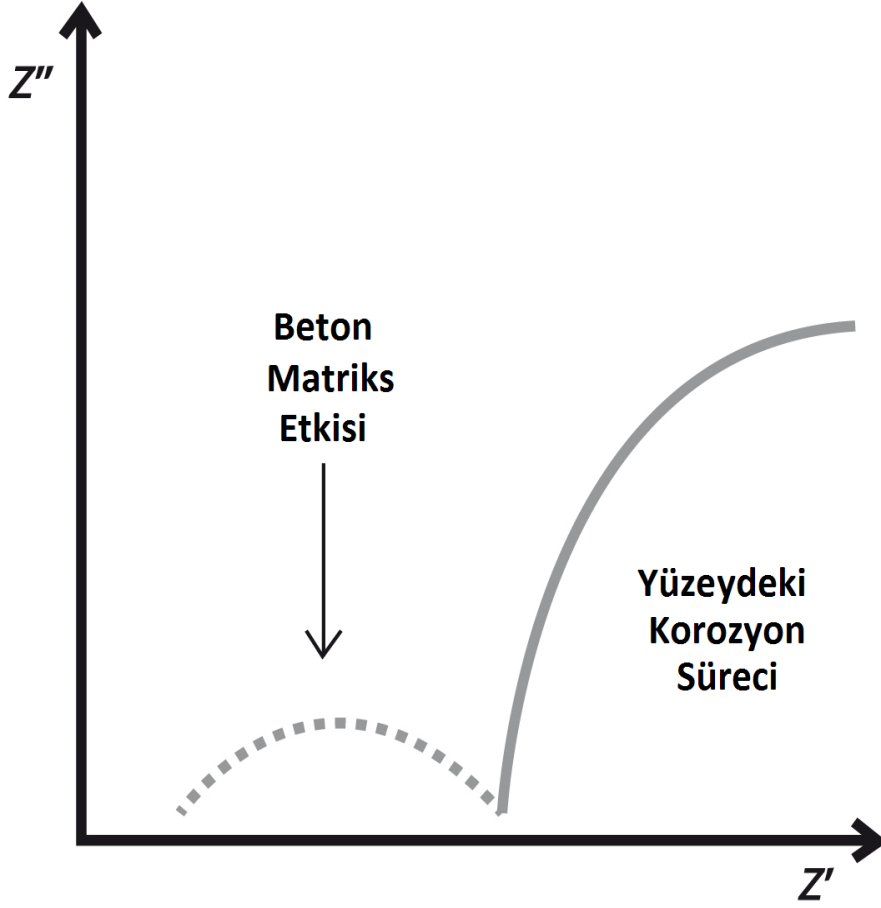


Şekil 3.1. (a), 30. (b), 60. (c), 120. (d) ve 240. (e) gün sonunda elde edilen Nyquist eğrileri.

Şekil 3.1.'de verilen tüm Nyquist eğrilerinin aynı yapıya sahip oldukları görülmektedir. Yüksek frekans ve düşük frekans bölgesinde oluşan yarım yaya benzer Nyquist eğrileri daha önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir (Gurten ve diğ. 2007, Choi ve diğ. 2006, Qiao ve Ou 2007). Gu ve arkadaşları tarafından (Ping Gu ve diğ. 1997) bu yapı Şekil 3.2.'de gösterildiği üzere açıklanmıştır. Yüksek frekans aralığında oluşan ilk yay beton matriks etkisiyle oluşmaktadır (McCarter ve Brousseau 1994). Düşük frekans bölgesinde oluşan ikinci yay, donatı yüzeyinde oluşan korozyon sürecini tanımlamaktadır. Yüksek frekans bölgesinde oluşan yayın büyüklüğündeki azalma, çimento pastasındaki iyon konsantrasyonuna ve beton numunelerin porozitesindeki artışa bağlıdır (Xu ve diğ. 1993).

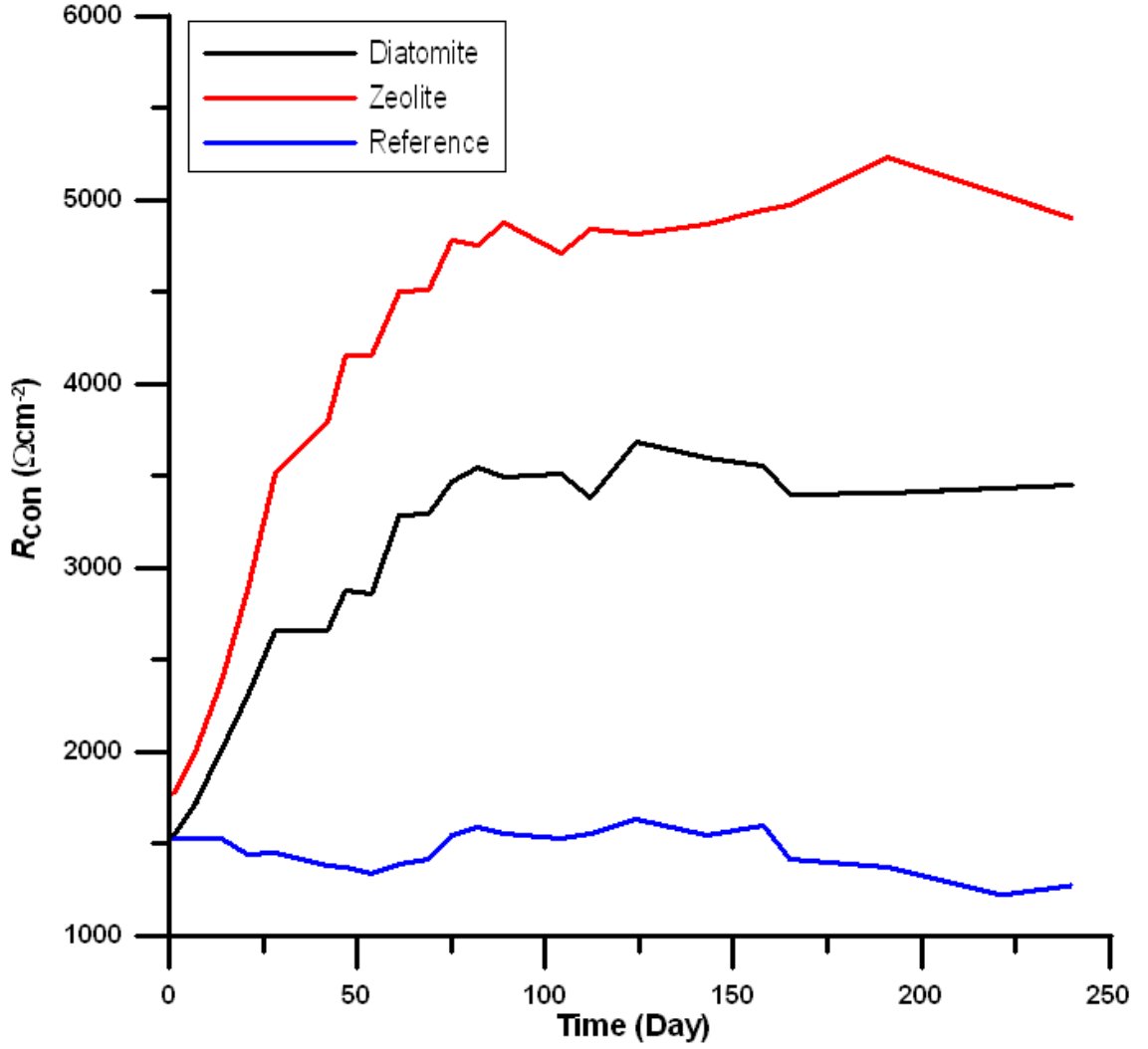
Şekil 3.1. (a)-(e)'de görüldüğü üzere referans numunesinde, yüksek frekans bölgesinde zamana bağlı oluşan yayın büyüklüğü ortalama 13'ten 8 $\Omega.cm^2$ 'ye azalırken, düşük frekans bölgesinde zamana bağlı olarak oluşan yayın büyüdüğü gözlenmektedir. Bu değişim, referans numunenin zamanla porozitesinin arttığını göstermektedir. Şekil 3.3'de gösterilen zamanla ölçülen R_{con} değerindeki değişme de bunu doğrulamaktadır. Referans numunenin direnci (R_{con}) zamanla azalırken, diatomit ve zeolit ikameli numunelerde porozitedeki azalmaya bağlı artış görülmektedir.

Diatomit ve zeolit ikameli beton numunelerin Nyquist eğrilerinde (Şekil 3.1. (a)-(e)) ölçülen değişim, referans numunenin tersi şeklinde olmuştur. Yüksek frekans bölgesinde oluşan yayın büyüklüğü ortalama 15'ten 42 $\Omega.cm^2$ 'ye çıkarken, düşük frekans bölgesinde oluşan yayın büyüklüğünün 35'ten 20 $\Omega.cm^2$ 'ye kadar gerilediği tespit edilmiştir. Tüm bu bulgular Şekil 3.3.'de elde edilen diatomit ve zeolit ikameli beton numunelerine ait R_{con} değişimlerdeki artışı desteklemektedir.



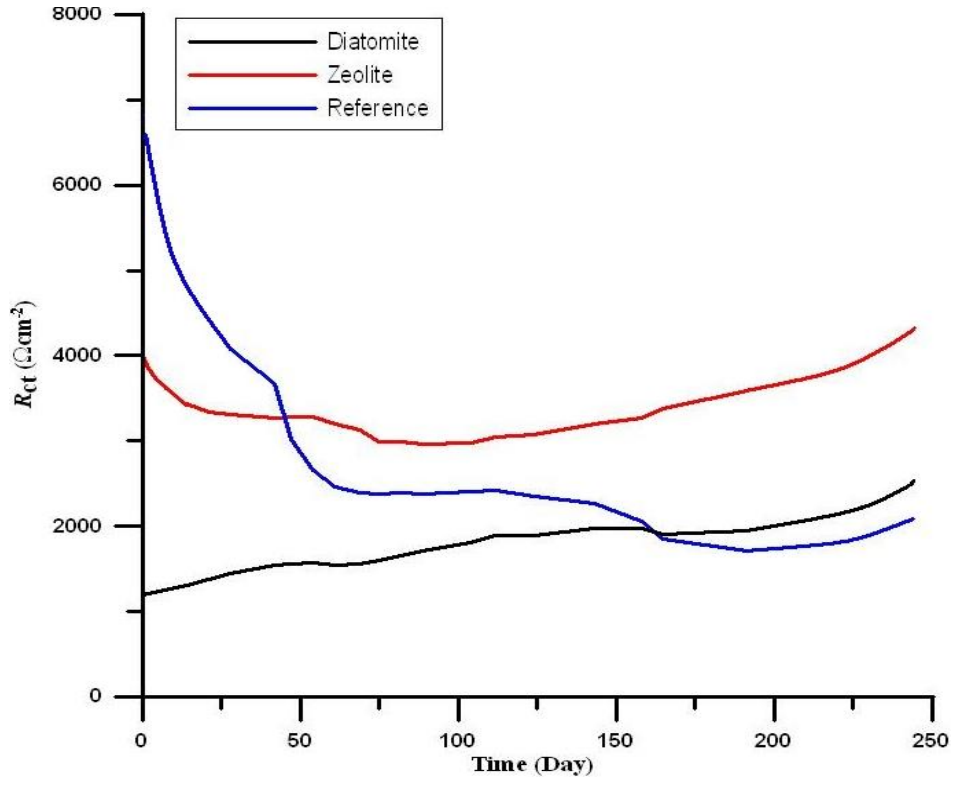
Şekil 3.2. Beton içerisindeki donatının korozyon mekanizmasını genel olarak gösteren empedans spektrumu.

R_{con} değerleri sırasıyla 240 gün sonunda; zeolit ikameli numunede 1790'dan 4700 $\Omega.cm^2$ 'ye, diatomit ikameli numunede 1540'dan 3450 $\Omega.cm^2$ 'ye yükselmişken bu değer referans numunede 1620'dan 1420 $\Omega.cm^2$ 'ye düşmüştür. Görüldüğü üzere referans numuneye göre diğer numunelerdeki değişim çok daha yüksektir.

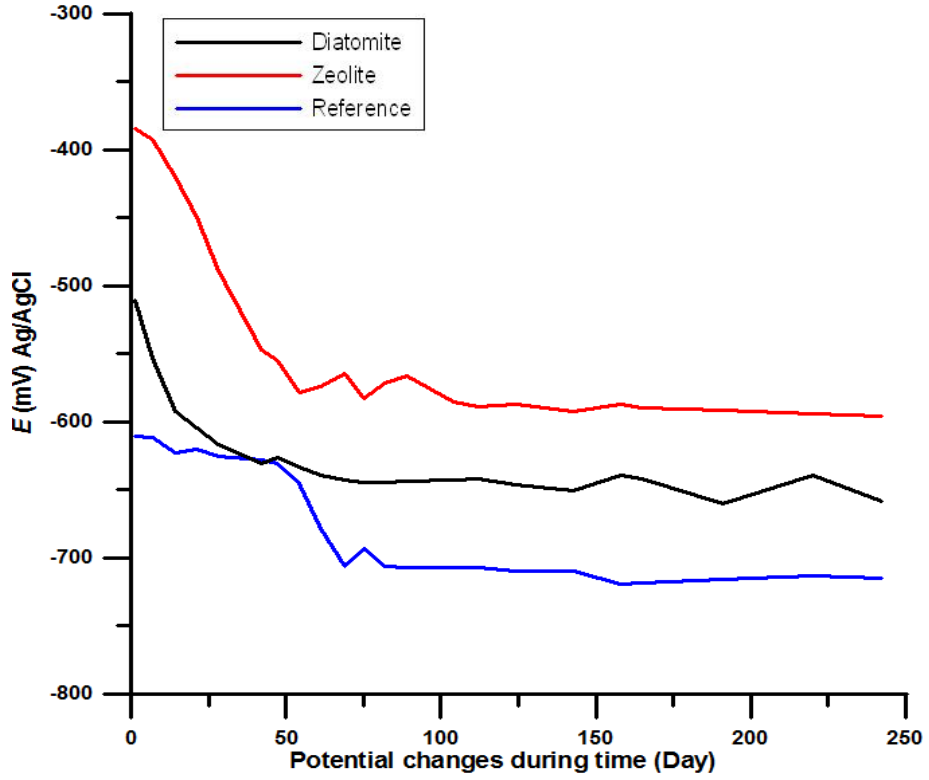


Şekil 3.3. Ölçüm süresince beton direncinde meydana gelen değişiklikler.

Beton numuneler içerisindeki donatının direncinde (R_{ct}) zamanla meydana gelen değişim Şekil 3.4.'de gösterilmiştir. 240 gün sonunda; zeolit ikameli numune için ölçülen R_{ct} değeri 3970'dan 4276 $\Omega.cm^2$ 'ye, diatomit ikameli numunede 1245'ten 2300 $\Omega.cm^2$ 'ye yükselmişken bu değer referans numunede 6520'den 1750 $\Omega.cm^2$ 'ye düşmüştür. Bu veriler R_{con} verilerindeki değişimi desteklemektedir. Diatomit ve zeolit ikameli numunelerine ait R_{con} ve R_{ct} değerinin artması porozitenin azaldığını ve dolayısıyla donatının daha az korozif etkiye maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil 3.4. Ölçüm süresince donatı direncinde meydana gelen değişiklikler.



Şekil 3.5. Ölçüm süresince potansiyelde meydana gelen değişiklikler.

Donatı potansiyelinin düzenli ölçülmesi betonarme yapıların rutin denetimi için yapılan en karakteristik prosedürlerden biridir (Pour-Ali ve diğ. 2015). Şekil 3.5’de 240 gün boyunca ölçülen açık devre potansiyelleri görülmektedir. ASTM C876-09 standardına göre ölçülen açık devre potansiyeli -270 mV/SCE (ASTM 2009) veya -225 mV/Ag,AgCl'den daha negatif değerdeyse %90 ihtimalle korozyon var demektir. Numunelerin tümünün bu potansiyel değerinin altında olduğunu görülmektedir. Referans numunenin potansiyeli 240 günün sonunda, -700 mV’a düşerken sırasıyla diatomit ve zeolit ikameli numunelerde bu değer daha pozitif bölgede -625 ile -500 mV olarak ölçülmüştür. Bu veriler de R_{con} ve R_{ct} değişimlerini desteklemektedir. **Zeolit ikameli numune içerisindeki donatının potansiyel değişimi, diatomit ikameli ve referans numuneye göre daha pozitif bölgede seyrederek daha az korozyona uğradığını göstermektedir.**

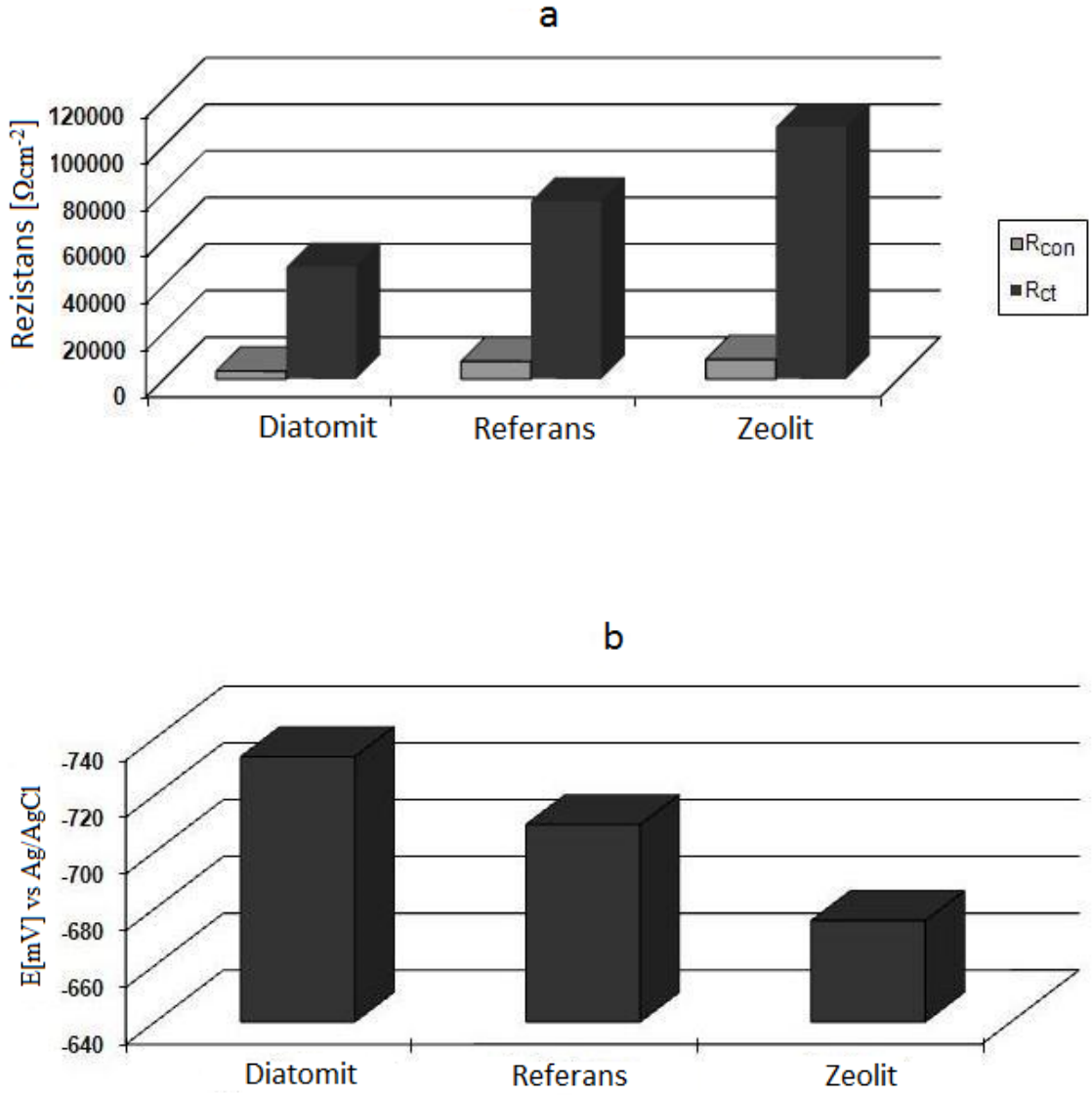


Şekil 3.6. 1 M HCl çözeltisine batırılan beton içinde gömülü donatı çeliğinin 240 gün sonraki görüntüleri.

3.2. DİATOMİT VE ZEOLİT İKAMELİ BETON İÇERİSİNDEKİ DONATININ 0,5 M H₂SO₄ ÇÖZELTİSİ İÇERİSİNDEKİ KOROZYON ETKİSİNİN EIS YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

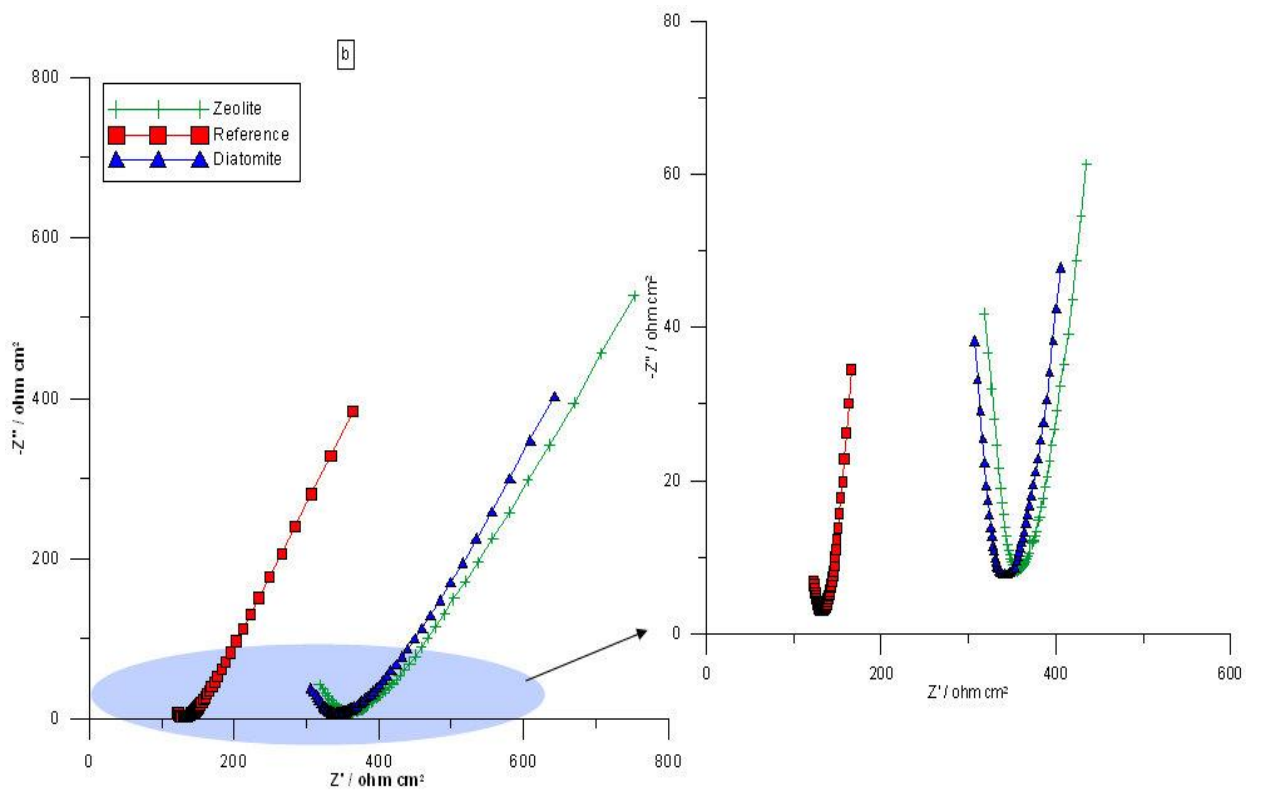
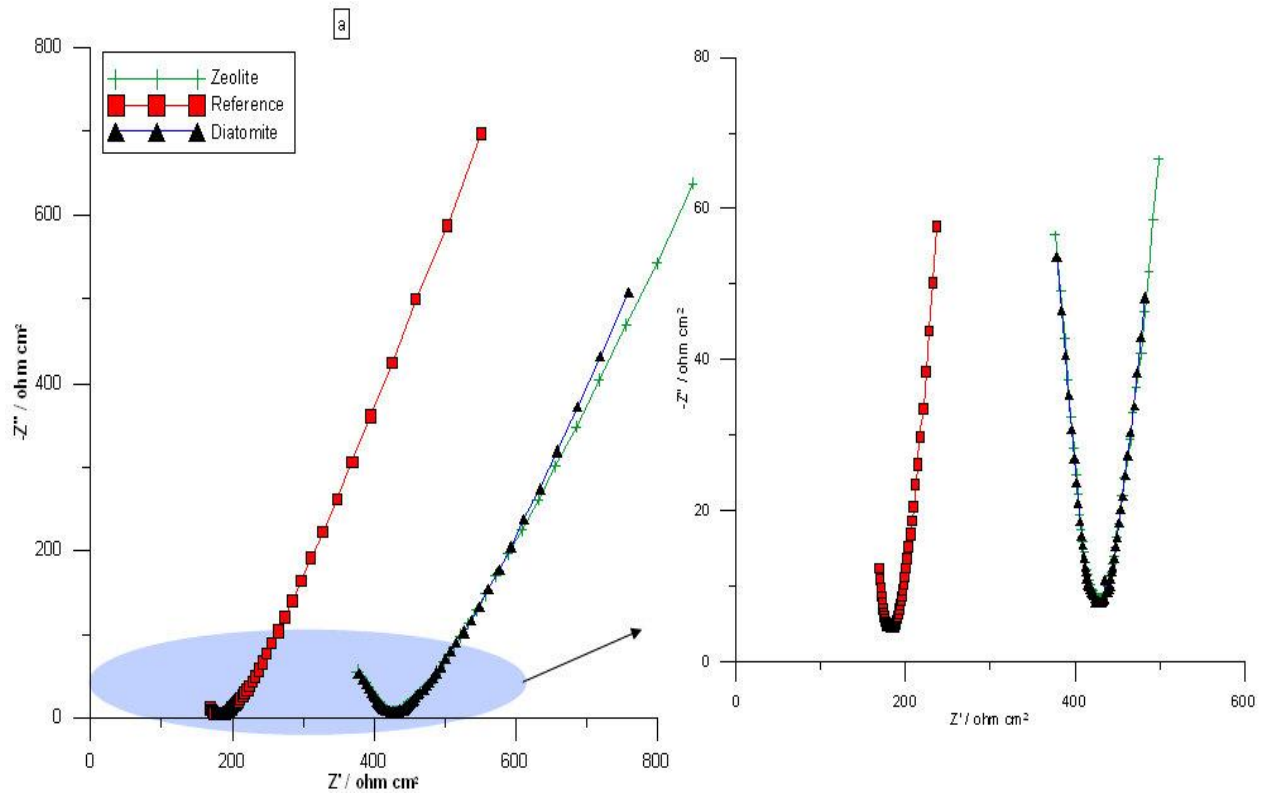
0,5 M H₂SO₄ çözeltisinde bulunan beton örneklerindeki korozyon evresi üç elektrokimyasal parametredeki değişimler göz önüne alınarak belirlenmektedir. Bunlar korozyon potansiyeli (E), betonun direnci (R_{con}) ve gömülü çeliğin direncidir (R_{ct}).

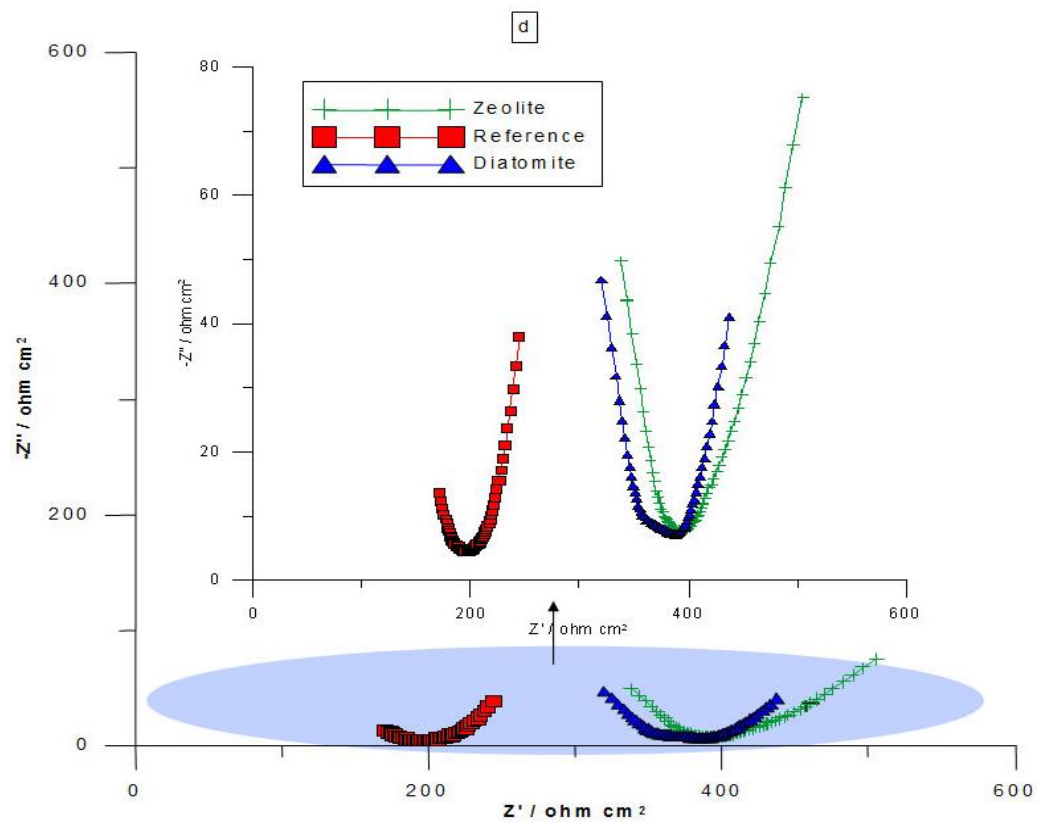
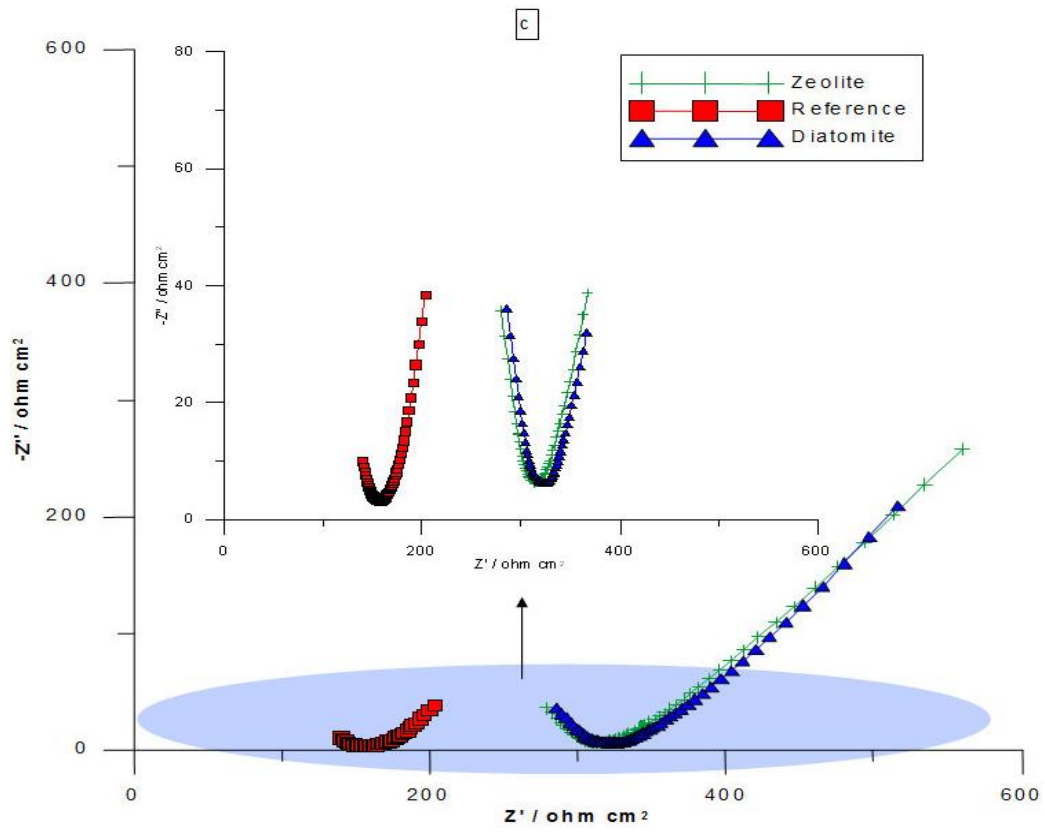
Sonuçlar, üç farklı tip betondan elde edilen beş örnekteki ortalama değerler baz alınarak belirlenmiştir. Referans, diatomit ve zeolit ikameli numuneden oluşan üç beton türü de paslandırıcı ortamda korozyondan etkilenmişlerdir; fakat zeolit ikameli numune en dirençli tür olarak dikkat çekmiştir. Betona %20 oranında zeolit veya diatomit eklemek, gözenek kanallarının boyutunu değiştirerek çözeltinin betonun içine geçmemesine önemli bir etkide bulunmuştur. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi diatomite kıyasla zeolitte çok düşük gözenek elde edilmiştir. Bu nedenle betonun porozitesinin korozyon için önemli bir belirleyici olduğu sonucu çıkarılabilir.

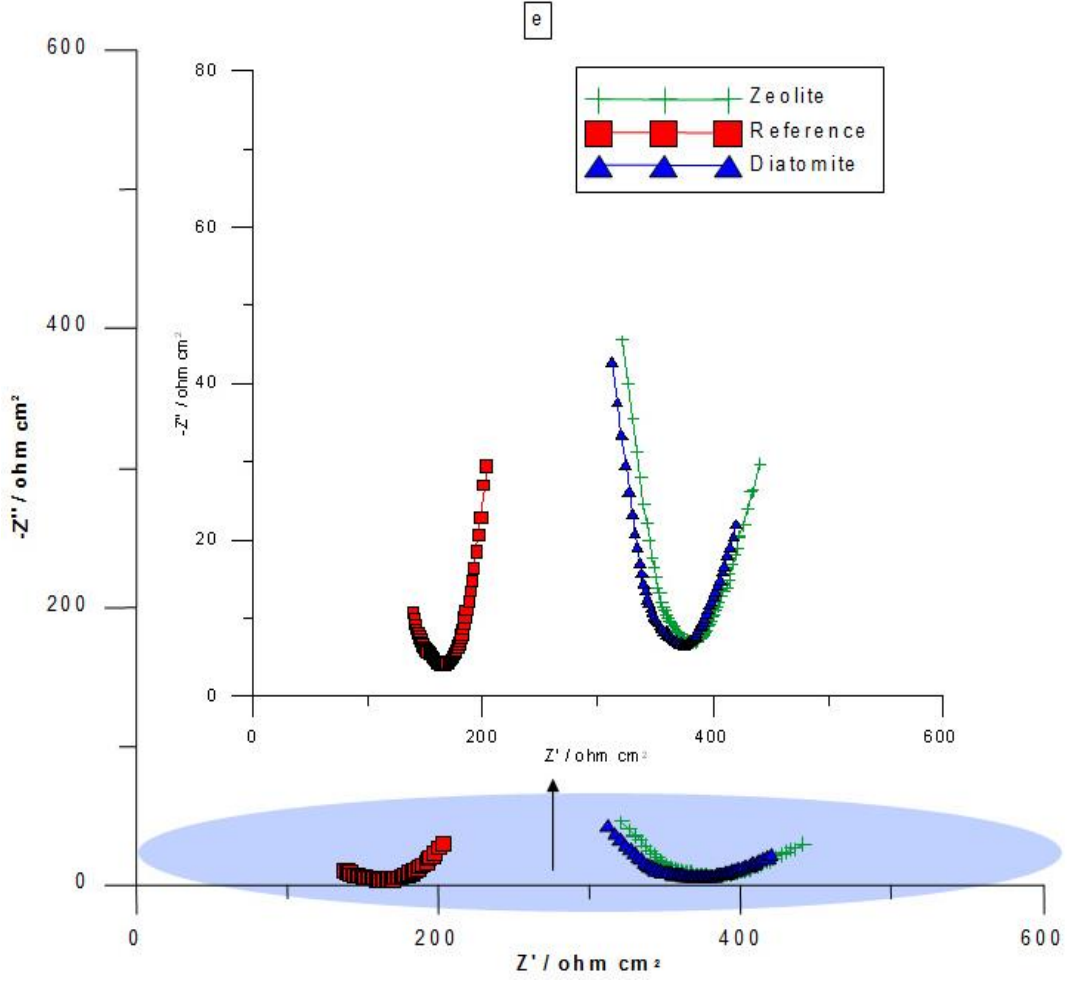


Şekil 3.7. Donatı ve betonun dirençleri (a) ve referans, diatomit ve zeolit ikamli örneklerin potansiyelleri.

Betonun yapısındaki bozulmadan dolayı korozyon evresi üç temel adımda incelenebilir: (a) Korozyon başlangıcı, (b) Betonun dış yüzeyinde çatlakların görünmesi (çatlakların ilerlemesi) ile (c) Yüzeysel çatlakların fonksiyonel noktaların sonuna kadar ilerlemesi ve daha ileri seviyede zarar vermesi olarak sıralanabilir (Cong ve diğ.2012).







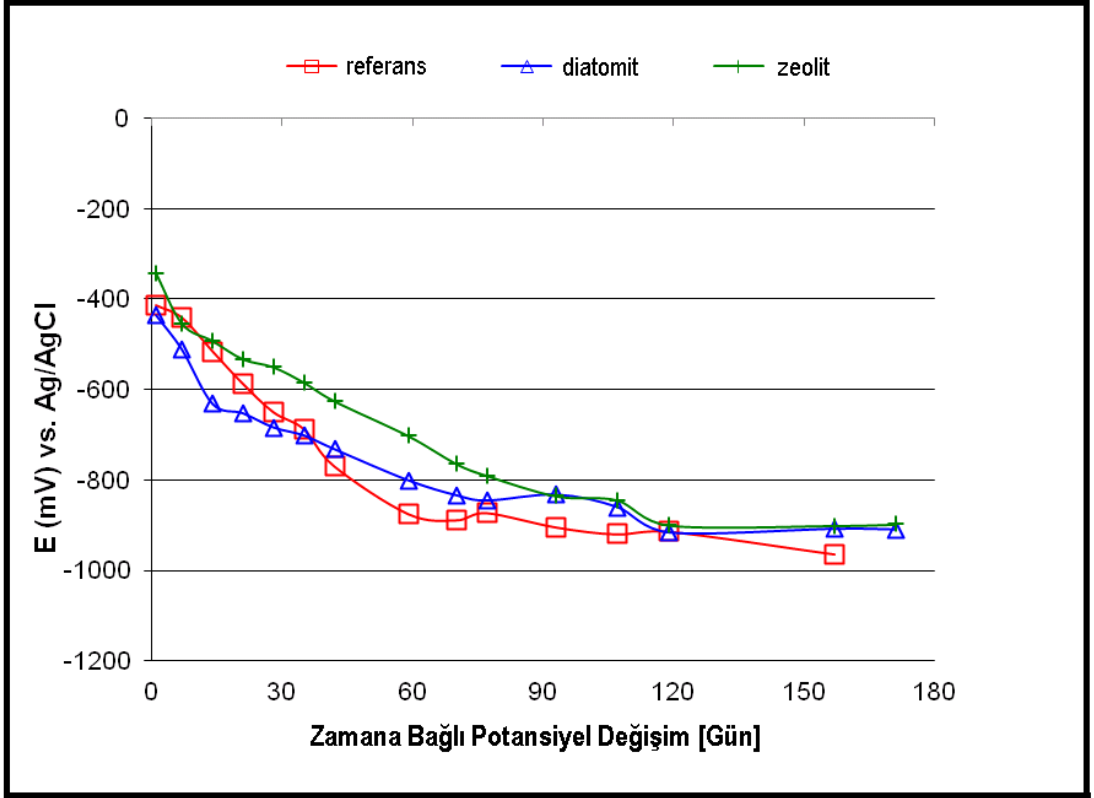
Şekil 3.8. Donatı çeliğinin 1.(a), 35.(b), 93.(c), 119.(d), 157.(e) günlerde empedans spektrumları.

0,5 M H₂SO₄ beton örneklerini suya batırdıktan ve 160 günlük gözlemden sonra, yukarıda bahsedilen korozyon başlangıcı süreçlerini aşağıdaki üç adımda incelenebilir.

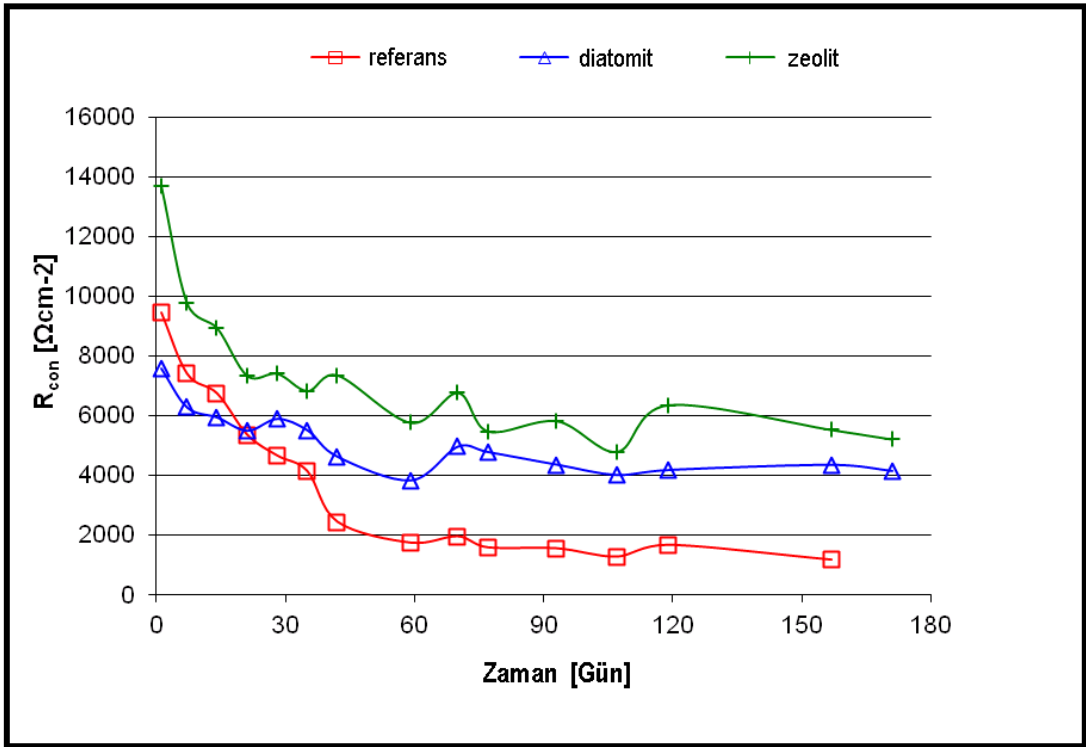
(1) Solventin betonun yapısının içine girmesine dayanan korozyon başlangıcı. Bu etabın hızı, kimyasal bileşimi gözetilmeksizin, beton örneğinin gözeneklilik oranıyla doğrudan bağlantılıdır. Yoğun gözeneklilik solventin daha kolay nüfuz etmesini, bu da daha hızlı paslanma başlangıcını olası kılar. Bu sonuç eski araştırmalarla paralellik göstermektedir (Karaiç 2008, Mesci 2007).

(2) Agresif birleşiklerin Çelik donatıları etkisi altına alarak paslanmaların başlaması.

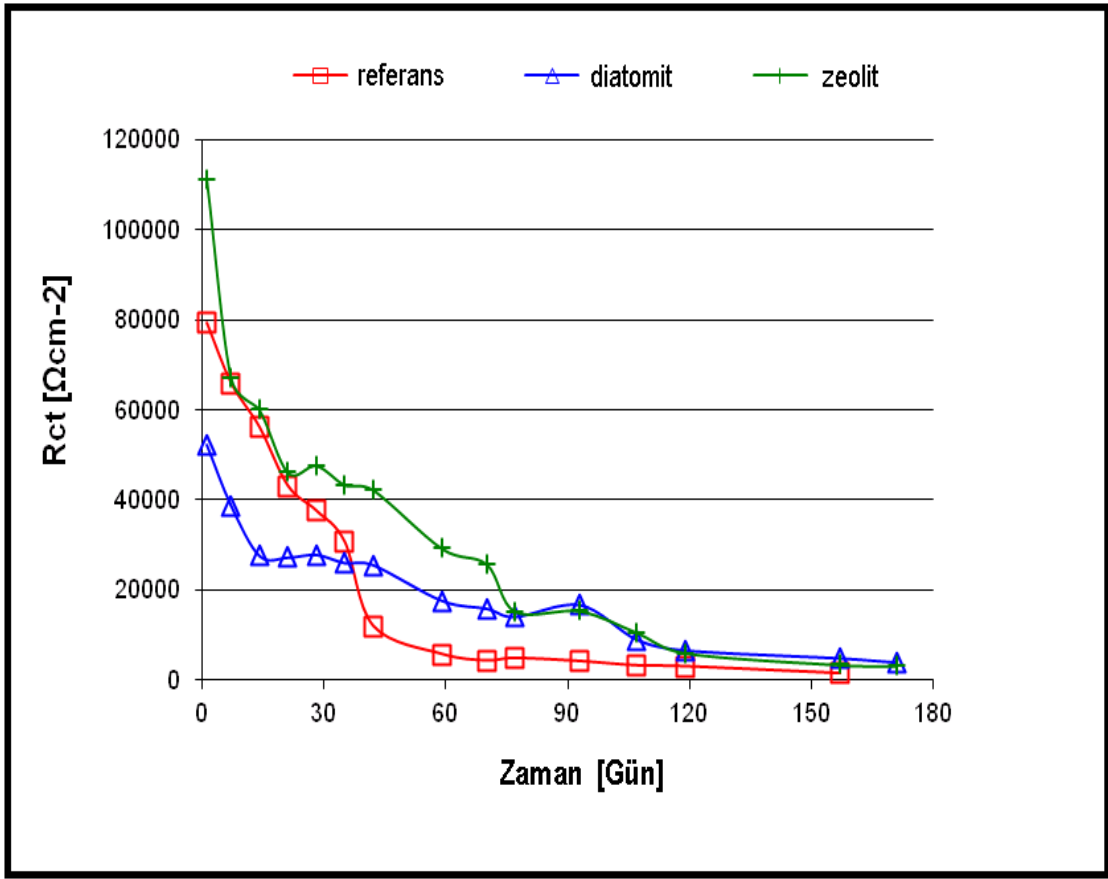
(3) Çelik donatı yüzeyinde oluşan paslanma tepkimesinin ürünlerinin gözenek kanallarını engelleyerek paslanmayı yavaşlatması (Şekil 3.8 - 3.10).



Şekil 3.9. Ölçüm süresince potansiyel değişim.



Şekil 3.10. Ölçüm süresince betonun direnç değişim.



Şekil 3.11. Ölçüm süresince çelik donatının direnç değişimi.

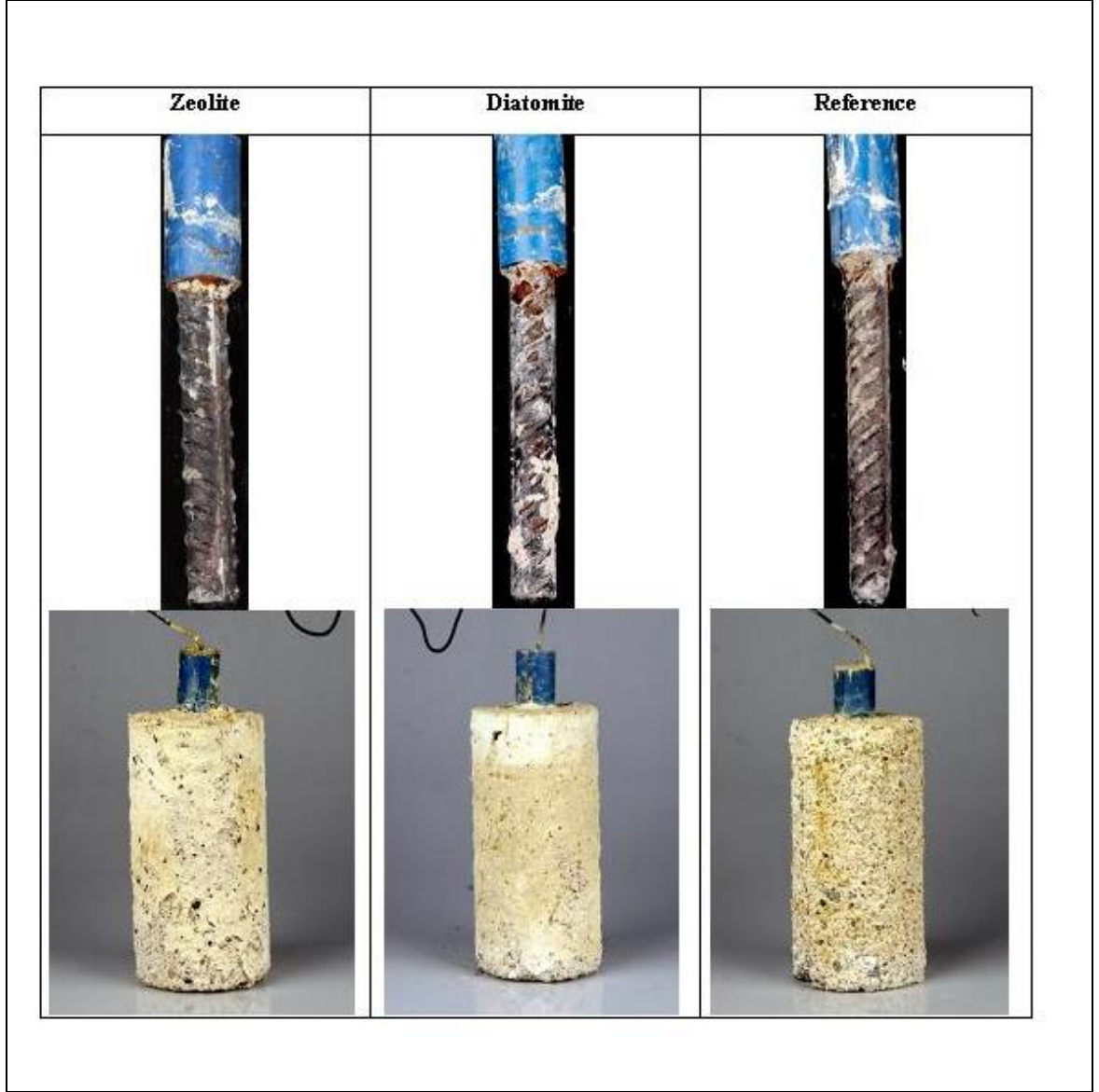
Çeliğin üç beton türündeki Nyquist direnç diyagramları Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Nyquist formatında, direnç data noktaları reel(resistive) Z' ve karmaşık (capacitive) $-Z''$ direnç olarak x-y grafiğine çizilmiştir. Grafik yarı dairesel ve yarı-sonsuz lineer difüzyon çizgisinden oluşur. Yarı dairesel şekil çözeltiyi ve çözeltideki yük transfer direncini, sonraki devamlı artan lineer çizgi ise Warburg direncinin önemini göstermektedir (Gurten ve diğ. 2007). Yarı dairesel şekil çelik yüzeyinin maksimum frekanslardan etkilenmediği anlamına gelmektedir. Fakat ilk ölçümler beton örneklerini suya batırdıktan 15 gün sonra alınmıştır. Zamana bağlı sistemlerin yalıtkan özellik göstermeden önceki bu 15 günlük periyot elektrokimyasal ölçümlerin doğruluğu için gereklidir. Çelik donatıların direnci, yük transferindeki direnç değerine bakılarak belirlenir. Çeliğin paslanmasına karşı koruyucu tabaka görevi üstlenen betonun yüzeyinde oluşan kaplamadan ötürü Warburg direnci gözlenir (Gurten ve diğ. 2005, Vedalakshmi ve diğ. 2009). Nyquist grafiklerinin analizini yaparken eşdeğer elektrik devresi kullanarak voltaj ve direnç değerleri elde

edilebilir. Aynı devre kullanılarak çelik donatıların benzer eğilimler ve davranışlar gösterdiği gözlemlenmiştir (Gurten ve diğ. 2005).

Reel direnç eksenindeki değişiklikler şu şekilde tarif edilebilir. Şekil 3.7 (b) ve (c)'de gözlemlendiği üzere reel değerlerde azalan bir trend var; fakat, (d) ve (e)'ye göre 93 gün sonra paslanma tepkimesinin ürünleri oluşmasından dolayı değerler önceki reel direnç değerlerine dönmektedir.

H₂SO₄'ün beton yapıların içine girmesi voltaj farkına yol açmaktadır. Daha önceki araştırmalarda da benzer voltaj değişimleri gözlenmektedir (Andrade ve Alonso 1996, Gerengi ve diğ. 2012). Betonda bulunan donatılardaki elektrokimyasal değişim, oksijen ve nem varken gerçekleşir (Şekil 3.8). Deneyin ilk gündeki ortalama korozyon potansiyel değerleri zeolit için 157 günlük bir süreçte -343 mV'ten -901'e, referans için -414 mV'tan -964'e ve diatomit için -435 mV'tan -908'e kadar, değişiklik göstermiştir. Yüksek negatif potansiyel değerler, betondaki donatılar için daha fazla paslanma eğilimi anlamına gelir (Gurten ve diğ. 2005). Diatomit örnekleri diğer iki türe göre daha fazla hassasiyet göstermiştir, çünkü en büyük potansiyel düşüş diatomitte gerçekleşmiştir. Mamafih, 80. günden sonra, H₂SO₄'ün tamamıyla betonun içine nüfuz etmesi sonucu üç türde de aynı şekilde gittikçe azalan paslanma potansiyeli görülmüştür. Öte yandan, Poupard'a (Poupard ve diğ. 2004) göre paslanma işleminin başlamasından Hidroksil iyonu olarak bulunan oksijen sorumludur. Ek olarak, 120'nci günden sonra, -900 mV seviyesinde üç türde de potansiyelin sabitlenmesi gözlenmiştir. Bu sabitlenme paslanma tepkimesinin ürünlerinin yol açtığı çelik bar etrafındaki gözenek kanallarının engellemesi sonucu meydana gelmiş, bu da sert ortamların etkisini önemli ölçüde azaltmıştır.

Beton örneklerinin dirençlerindeki değişikliklerin sonucu Şekil 3.10'da görülmektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere direnç gittikçe azalmakta ve bu da çelik donatılarda anyonik ayrışmaya sebebiyet vermektedir. İlk 40 günde gerçekleşen rezistans değerindeki büyük düşüş de görülmektedir. 70. günden sonra, zeolitteki rezistans 6000 Ω, diatomitteki 4100 Ω ve referanstaki 1700 Ω civarında sabitlenmiştir.



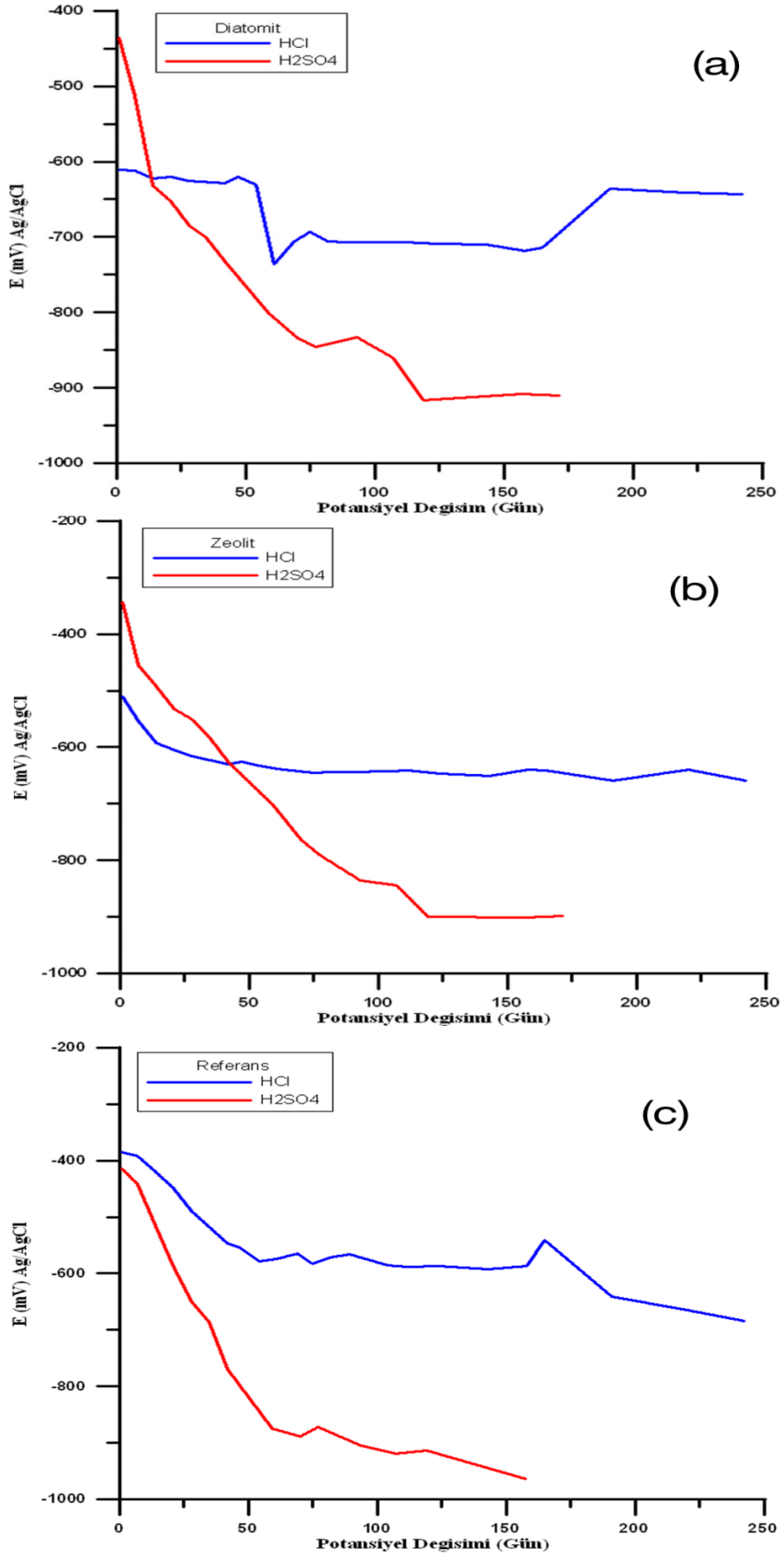
Şekil 3.12. 0,5 M H₂SO₄ çözeltisine batırılan beton içinde gömülü donatı çeliğinin 160 gün sonraki görüntüleri.

Şekil 3.11’de çelik donatıların dirençlerindeki (R_{ct}) değişiklikler ve benzer eğilimdeki rezistans değerleri gösterilmiştir. Gömülü çeliğin direncindeki hızlı düşüş ilk 40 günden sonra görülür hale gelmiş ve yine 100. günden sonra üç türün de rezistansları 4000 Ω civarında sabitlenmiştir. Uzun bir suya batırma evresinden sonra, su ile karışan çimentonun gözenek oranı düşüş göstermiş ki bu da beton direncinin 110. günden sonra sabitlenmesini açıklar nitelikte olmuştur. Çimentonun suyla karışması sonucu gözeneklerin zamanla azalması Ferraro ve Nanni tarafından doğrulanmıştır (Mesci 2007). Buna sebep olarak porozitenin betonun paslanma hızını yeterince etkilememesi gösterilmiştir.

Materyaldeki korozyona bağılı değişiklikler gözle incelendiğinde dahi farkedilebilir. Zeolit, referans ve diatomitteki korozyon Şekil 3.11’de gösterilmektedir. En çok etkilenen donatı türü, çelik donatı kısmının yüzeyinde gözle görülür yarıklar meydana gelmiş olan diatomit örneği olmuştur. Bu, diatomitin asitli ortamlardaki en hassas tür olduğunu ortaya koymuştur. Yarıkların paslanması, çelik donatıların yakınında bulunan kanallardaki ve elektrolit çözeltilerde bulunan iyon yoğunluğundaki farklardan dolayı gerçekleşmiştir. Ayrıca, korozyon tepkimesinin etkilerinin en çok spiral çizgiler ile çelik donatı arasında meydana geldiğinin altını çizmek gerekir.

3.3. ORTAMIN KOROZYON MEKANİZMASINA ETKİSİ

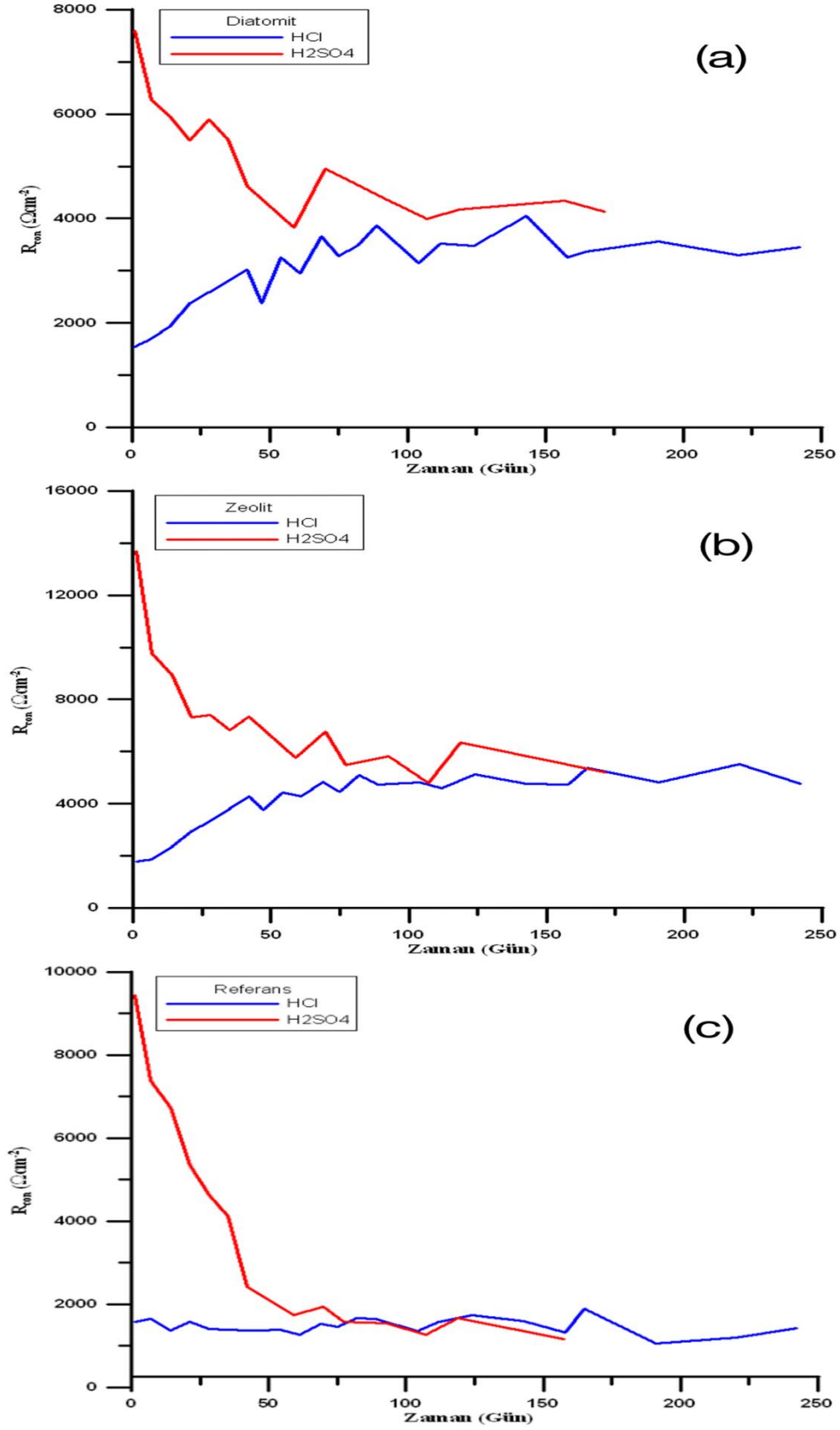
HCl ve H₂SO₄ ortamlarında diatomit, zeolit ve referans beton numunelerdeki donatının zamanla ölçülen korozyon potansiyeli değerlerindeki değişim Şekil 3.13’de verilmiştir. Şekil 3.13. (a), (b) ve (c)’de görüldüğü üzere her üç farklı bileşime sahip numunelerin 1 M HCl ve 0,5 M H₂SO₄ ortamlarına gösterdikleri tepki beklenildiği gibi birbirinden farklıdır. 0,5 M H₂SO₄ ortamında ölçülen donatının korozyon potansiyelindeki (E) değişimin 1 M HCl ortamından çok daha fazla olduğu tespit edilmiştir. 0,5 M H₂SO₄ ortamında diatomit -435 mV’tan -910 mV’a, zeolit -343 mV’tan -898 mV’a, referans numunede ise -414 mV’tan -963 mV’a düşüş söz konusudur. Ortalama potansiyel azalması 400 mV kadardır. 1 M HCl ortamında diatomit -611 mV’tan -643 mV’a, zeolit -511 mV’tan -659 mV’a, referans numunede ise -385 mV’tan -685 mV düşmüştür. 1 M HCl ortamı için ortalama potansiyel kaybı 160 mV ile 0,5 M H₂SO₄ ortamına göre daha azdır. ASTM C876-09 standartlarına göre çalışma elektrotlarının ölçülen potansiyel değeri -225 mV’dan daha düşük olursa %90 ihtimalle çalışma elektrodu korozyona uğramaktadır (ASTM 2009). Bu standarda göre en çok 0,5 M H₂SO₄ ortamındaki çalışma elektrotlarımız korozyona uğramıştır.



Şekil 3.13. (a), (b) ve (c) HCl ve H₂SO₄ ortamlarında diatomit, zeolit ve referans beton numunelerdeki donatının zamanla ölçülen korozyon potansiyeli değerlerindeki değişim

HCl ve H₂SO₄ ortamlarında referans, diatomit ve zeolit ikameli beton numunelerinin direnç değerlerinin zamanla değişimi Şekil 3.14’de verilmiştir.

Korozyon potansiyelindeki (E) değişim, beton numunelerin dirençlerindeki (R_{con}) değişimi desteklemektedir. Şekil 2. (a), (b) ve (c)’de referans, diatomit ve zeolit ikameli beton numunelerin 0,5 M H₂SO₄ ortamlarındaki dirençlerinin çok hızlı bir şekilde düştüğünü yaklaşık 50 gün boyunca sistemin dinamik olduğunu görmekteyiz. 50 gün sonra sistem stabil (=durağan) hale gelmiş ve 1 M HCl ortamındaki numunelere benzer dirençlere sahip olmuştur. Buradan H₂SO₄ ortamının beton numuneler için HCl ortamına göre daha agresif olduğunu, başlangıçta daha çok etkilediğini fakat belli bir süre sonra bu etkinin azalarak stabil hale geldiğini anlıyoruz.



Şekil 3.14. (a), (b) ve (c) HCl ve H₂SO₄ ortamlarında referans, diatomit ve zeolit ikameli beton numunelerinin direnç değerlerinin zamanla değişimi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- Porozite; suyun ve elektrotların difüzyon oranını arttırmakta ve betonu çatlamlara karşı daha hassas yapmaktadır.
- Betondaki gözenekler ve kimyasal dağılım sadece paslanmanın ilk aşamalarında etkide bulunmaktadır.
- Kullanılan zeolit ve diatomit katkılarının beton gözenekliliğini zaman içerisinde azalttığı ve bu sebepten donatı korozyonunun referans numuneye göre daha az meydana geldiği düşünülmektedir.
- Korozyona uğrayan donatı yüzeyinde oluşan demir oksit veya demir hidroksit tabakasının bünyeden ayrılması, kütlede ihmal edilebilecek düzeyde ağırlık kaybına neden olmaktadır. Bu kayıplar, yapının güvenliğini tehlikeye sokabilir.
- Korozyona bağlı olarak donatı yüzeyinde meydana gelen hacim artışı, çekme dayanımı düşük ve gevrek bir malzeme olan betonun çatlamasının ve parça atmasının önemli nedenleri olarak görülmektedir.
- Son zamanlarda, çevre kirliliğinden ortaya çıkan asit yağmurlarının inşaat demirlerini tahrip etmesi; betondaki paslanmaların başlıca sebeplerinden biri olduğu bu çalışma ile ortaya konulmuştur.
- Betonda bulunan karbondioksit, sülfatlar ve kloritler, asit yağmurlarından etkilenerek, betonlar üzerinde kimyasal bozunmalara yol açmaktadır. Bu bozunmalar korozyon mekanizmasını hızlandırmaktadır.
- Yapılan EIS ölçümlerinden elde edilen elektriksel parametrelerin (R_{con} , R_{ct} ve E) birbiriyle uyumlu ve destekler nitelikte olduğu görülmektedir.
- Bu çalışmada elde edilen sonuçlar betona ilave edilen katkıların 1 M HCl ve 0,5 M H₂SO₄ asit içerisindeki donatının korozyon davranışı için önemli olduğunu göstermektedir.

- 1 M HCl ve 0,5 M H₂SO₄ asit ortamında zeolit ikameli beton içerisindeki donatının, diatomit ikameli ve referans numuneye göre daha az korozyona uğradığı görülmüştür.
- Beton numunelerin ve içerisindeki donatıların 1 M HCl ortamına kıyasla 0,5 M H₂SO₄ ortamında daha çok fiziksel elektrokimyasal değişime uğradıkları tespit edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

- Ahmadi B., Shekarchi M., Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material. *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 134–141.
- Akinyemi O.O., Alamu OJ., Effect of 0.05 M NaCl on corrosion of coated reinforcing steels in concrete, *Pac J Sci Technol* 10 (2009) 462–471.
- Akman M.S., Yapı Malzemeleri, *İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası*, İstanbul (1987).
- Aköz F., Betonarme yapılarda donatı korozyonuna neden olan faktörler ve alınacak önlemler, *Korozyon Bilimi Ve Mühendisliği*, Korozyon, 19 (1-3), (2012)
- Andrade C., Alonso C., Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Constr. Build. Mater.* 10(5) (1996) 315–328.
- Aruntaş H.Y., Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, (1996).
- Bassuoni M.T., Nehdi ML., Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cem Concr Res* 37(7) (2007) 1070–1084.
- Bereket G., Gerengi H. How truly electrochemical measurements are evaluated in corrosion researches?. *XIII. International Corrosion Symposium, Fırat University, Turkey*, 15-17 October (2014).
- Boğa A.R., Uçucu küllü betonarme elemanlarda donatı korozyonunun hızlandırılmış yöntemlerle araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, (2005).
- Bragança M.O.G.P. K.F. Portella, M.M. Bonato, C.E.B. Marino, Electrochemical impedance behavior of mortar subjected to a sulfate environment – A comparison with chloride exposure models, *Constr. Build. Mater.* 68 (2014) 650–658
- Broomfield J. P., Corrosion of steel in concrete. *Taylor & Francis* (1997).
- Castaldi P., Santona L., Enzob S., Melis P., Sorption processes and XRD analysis of a natural Zeolite exchanged with Pb^{2+} , Cd^{2+} and Zn^{2+} cations, *J. Hazard Mater.* 156 (2008) 428–434.

- Choi, Y.S., Kim, J.G., Lee K.M., Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete, *Corros. Sci.* 48 (2006) 1733–1745.
- Cogger N.D., Evans N.J. An Introduction To Electrochemical Impedance Measurement Technique Report, Solartron Instrument, (1999).
- Cong P., Chen S., Chen H., Effects of diatomite on the properties of asphalt binder. *Constr. Build. Mater.* 30 (2012) 495–499.
- Çakır Ö., Yüksek fırın cürufunun betonun ve betonarmenin kalıcılığına (durabilitesine) etkisi, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü., (2006).
- Çil İ., Betonarme Donatısında Elektriksel Yöntemlerle Korozyon Ölçümü, D.E.Ü., *Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* Cilt: 8 Sayı: 1 S. 59-63 Ocak (2006).
- Çimento - Bölüm 1: Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *TSE*, Ankara, (2002).
- Değirmenci A., Silis dumanı katkısının betonarme çeliği korozyonuna etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, (2006).
- Değirmenci, N., Yılmaz, A., Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 284–288.
- Demirtaş B., Korozyonun betonarme kolonların deprem performansına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, (2008).
- Doğan M., Betonarme Yapılardaki Deprem Hasarlarına Korozyonun Etkisi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt:XXII, Sayı:1, Eskişehir, (2009).
- Doğan Ü.A., Beton bileşim parametrelerinin geçirimsizlik özellikleri ve gömülü çelik donatı korozyonuna etkisi, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, (2008).
- Elden H, Morsy G, Bakr M. Diatomite: its characterization, modifications and applications. *Asian J. Mater. Sci.* 2(3) (2010) 121–136.
- Elyiğit A., Bor kaplamalı betonarme çeliğinin korozyona etkisinin incelenmesi, *Yüksek*

Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, (2011).

Erbil, M., Korozyon İlkeler Önlemler, *Korozyon Derneği*, 1s, Ankara, (2012).

Ergun A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Constr Build Mater* 25 (2011) 806–812.

Genç S.S., 2006, Diatomit katkılı betonların yük altındaki davranış ve kullanılabilirlik özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi*, O.M.Ü., (2006).

Gerengi H., Akçay C., Ozgan E., Arsan I., Asfalt Betonu İçerisine Konulan Düşük Karbon Çeliğinin %3.5 NaCl Ortamındaki Korozyonun İncelenmesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (2012) 5–11.

Gerengi H., Kurtay M., Malzeme ve malzeme işleme teknolojileri programında “korozyon ve korozyona dayanıklı malzemeler” dersinin zorunlu olarak okutulması, *Electronic Journal of Vocational Colleges- Aralık 2013 UMYOS Özel Sayı*, (2013).

Gerengi H., Ozgan E., Akçay C., Investigation on the corrosion of low carbon steel placed in asphalt concrete in 3.5% NaCl environment. *J Nat Appl Sci* 3(1): (2012) 5–11.

Gerengi, H., Investigation of the effect of benzotriazole on corrosion behaviour of brass-118 and brass-mm55 alloys in artificial seawater by harmonic analysis, *Journal Of Technical-Online*, ISSN 1302/6178,8,3-2009, (2009) 178-196.

Gerengi, H., Kocak Y., Jazdzewska A., Kurtay M., Durgun H., Electrochemical Investigations On The Corrosion Behavior Of Reinforcing Steel In Diatomite-And Zeolite- Containing Concrete Exposed To Sulphuric Acid, *Construction and Building Materials*, 49, (2013) 471–477.

Gerengi, H., Slepski, P., Ozgan, E., Kurtay, M., Investigation of corrosion behavior of 6060 and 6082 aluminum alloys under simulated acid rain conditions, *Mater.Corros.*, DOI:0.1002/maco. 201307287, 66(3) (2015) 233-240.

Gurten AA., Erbil M., Kayakirilmaz K., Effect of polyvinylpyrrolidone on the corrosion

- resistance of steel. *Cem Concr Compos* 27(7–8) (2005) 802–808.
- Gurten AA., Kayakirilmaz K., Erbil M., The effect of thiosemicarbazide on corrosion resistance of steel reinforcement in concrete, *Constr Build Mater* 21(3) (2007) 669–676.
- Hasanbeigi A, Price L, Lin E. Emerging energy–efficiency and CO2 emission– reduction technologies for cement and concrete production: a technical review. *Renew. Sustain Energy Rev.* 16 (2012) 6220–6238.
- Hoşhan P., Beton içindeki çeliğin korozyonunun üç elektrot yöntemi ile incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, (1994).
- Huang P., Bao Y, Yao., Influence of hcl corrosion on the mechanical properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 3, Pages 584–589, March, (2005).
- Ikotun BD., Ekolu S., Strength and durability effect of modified zeolite additive on concrete properties. *Constr Build Mater* 24 (2010) 749–757.
- Ismail M, Ohtsu M., Corrosion rate of ordinary and high-performance concrete subjected to chloride attack by AC impedance spectroscopy, *Constr Build Mater* 20 (2006) 458–469.
- Karakurt C., Topcu IB., Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar corrosion and high temperature resistance of concrete, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 906–911.
- Karakurt C, Topcu IB. Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali–silica reaction and sulfate resistance of concrete. *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1789–1795.
- Karaüç E., Uçucu kül ve zeolitin kendiliğinden yerleşen betonlara etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi (2008).
- Keleştemur O., Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde üretimi yapılan PKÇ/B 32,5 R çimentosunun betonarme yapılardaki donatı korozyonuna etkisinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi (2002).

- Keleştemur O., Betonarme yapılarda dual-faz çeliğinin kullanılabilirliğinin ve korozyon direncinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi (2008).
- Kılıçoğlu C., Betonarme yapılarda donatı korozyonu durumunun aletsel değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi (2007).
- Koç T., Yalçın H., Elektro Kimya, *Palme Yayıncılık*, Ankara, (1999) isbn 975-7477-53-2
- Kuo WT., Wang HY., Shu CY., Su DS., Engineering Properties Of Controlled Lowstrength Materials Containing Waste Oyster Shells, *Construction and Building Materials*, 46 (2013) 128–133.
- McCarter W. I., Brousseau R., The A.C. Response of Hardened (1994) 231-242.
- Menekşe C., Klorürlü ortamdaki betonarme çeliğinin korozyonuna asetat ve yapı kimyasalının etkisinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, (2008).
- Mertens G., Snellings R, Van Balen K, Bicer-Simsir B, Verlooy P, Elsen J., Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity, *Cem Concr Res*, 39 (2009) 233–240.
- Mesci B., Bakır endüstrisi flotasyon atıkları ve zeolitlerin beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, *Doktora Tezi*, O.M.Ü, (2007).
- Najimi M, Sobhani J, Ahmadi B, Shekarchi M. An experimental study on durability properties of concrete containing Zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 1023–1033.
- Nowak, A.S., Collins, K., Reliability of Structures, McGraw-Hill.Boston (2000).
- Perraki T., Kontori E., Tsivilis S., Kakali G., The effect of zeolite on the properties and hydration of blended cements. *Cem. Concr. Compos.* 32 (2010) 128–133.
- Ping Gu, Elliott, S., Hristova, R., Beaudoin, J.J., Brousseau, R., Baldock, B., “A study of corrosion inhibitor performance in chloride contaminated concrete by electrochemical impedance spectroscopy, *ACI Mater. J.* 94(5) (1997) 385-394.
- Poupard O., Ait-Mokhtar A., Dumargue P., Corrosion by chlorides in reinforced

- concrete: determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy. *Cem. Concr Res.* 34(6) (2004) 991–1000.
- Pour-Ali S., Dehghanian, C., Kosari, A., Corrosion protection of the reinforcing steels in chloride-laden concrete environment through epoxy/polyaniline–camphorsulfonate nanocomposite coating, *Corros. Sci.* 90 (2015) 239–247.
- Poursaee A, Laurent A, Hansson CM., Corrosion of steel bars in OPC mortar exposed to NaCl, MgCl₂ and CaCl₂: macro- and micro-cell corrosion perspective. *Cem. Concr. Res.* 40 (2010) 426–430.
- Qiao, G., Ou, J., Corrosion monitoring of reinforcing steel in cement mortar by EIS and ENA, *Electrochim. Acta*, 52 (2007) 8008–8019.
- Şahin F.M., Betonarme çelik korozyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, (2002).
- Simsek O., Beton ve Beton Teknolojisi, *Seçkin Yayınevi*, Ankara, (2007).
- Sobhani J., Najimi M. Electrochemical impedance behavior and transport properties of silica fume contained concrete, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 910–918.
- Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, *ASTM C876 - 09*, (2009).
- Şişman C.B., Kocaman İ., Gezer E., Doğal Zeolitten Üretilecek Hafif Betonun Tarımsal Yapılarda Kullanılabilirliği Üzerine Bir Araştırma, *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, Tekirdağ, 5(2) (2008) 187-195.
- Taban,S., Şimşek,O., Zeolitik Tüf Katkı Oranı ve Deniz Suyunun Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Gazi Üniversitesi, *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Ankara, 24(1), (2009) 145-153.
- Taban H., Farklı oranlarda zeolitik tüf katkısının beton özellikleri ve betonarme çeliği korozyonuna etkilerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, (2010).
- Tae SH., Corrosion inhibition of steel in concrete with natural inorganic minerals in

corrosive environments due to chloride attack, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 270–280.

Techniques for Monitoring Corrosion and Related Parameters in Field Applications, Item No. 24203; *NACE International Publication 3T199*. (1999) 1-41.

Tkaczewska E., Mroz R., Loj G., Coal–Biomass Fly Ashes For Cement Production Of CEM II/A-V 42,5R, *Constr. Build. Mater.*, 28(1) (2011) 633–639.

TÜİK Araştırma-Geliştirme Faaliyetleri Araştırması, *T.C. Başbakanlık Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)*(2014).

URL-1. <http://megainsaatvemimarlik.wordpress.com/page/7/>, Erişim tarihi (25.12.2011).

URL-2. http://www.mta.gov.tr/v2.0/images/turkiye_maden/maden_yataklari/b_h/zeolit.jpg, erişim tarihi (25.12.2011).

URL-3. http://www.mta.gov.tr/v2.0/images/turkiye_maden/maden_yataklari/b_h/di_dis.jpg, erişim tarihi (25.12.2011).

Uygur I., Düzce İlindeki Betonarme Binaların Yeniden Yapılanma Sürecinde İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, Gazi Üniversitesi, 9(4) (2006) 279–288.

Uzal B, Turanlı L. Blended cements containing high volume of natural zeolites: properties, hydration and paste microstructure. *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 101–109.

Ülger E., Glikozun betonarme çeliği korozyonuna etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, (2006).

Üncü S.E., Kolofonun betonarme çeliği korozyonuna etkilerinin tahribatsız elektrokimyasal yöntemlerle incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi (2006).

Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., Moradian M., In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment, *Constr. Build. Mater.* 46 (2013) 63–70.

- Van Dorst, W.C.A. (1996–2002). Various Technical Papers. Not For Open Publication. Akzo Nobel Base Chemicals.
- Vedalakshmi R., Saraswathy V., Song HW., Palaniswamy N., Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete using Warburg diffusion coefficient. *Corros. Sci.* 51(6) (2009) 1299–1307.
- Worrell E, Martin N, Price L. Potentials for energy efficiency improvement in the US cement industry. *Energy* 25(12) (2000) 1189–1214.
- Xu S., Wang, J., Ma, Q., Zhao, X., Zhang, T., Study on the lightweight hydraulic mortars designed by the use of diatomite as partial replacement of natural hydraulic lime and masonry waste as aggregate, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 33–40.
- Xu Z., Gu, P., Xie, P., Beaudoin, J.J., Application of A.C. impedance techniques in studies of porous cementitious materials, (II). Relationship between ACIS behavior and the porous microstructure, *Cern. Concr. Res.*, 23(4) (1993) 853-862.
- Yalçın S., Kolemanitli çimentoların betonarme demirlerinin korozyonu üzerine inhibitif etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, (1996).
- Yılmaz B., Ediz, N., The use of raw and calcined diatomite in cement production, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2008) 202–211.
- Yiğiter H., Betonarme donatısında klorid korozyonu gelişiminin elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmesi, *Doktora Tezi*, D.E.U., (2008).
- Yi-qiu, T., Lei, Z., Xing-you, Z., Investigation of low-temperature properties of diatomite-modified asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 787–795.
- Yüzer, N., Betonarme yapılarda korozyon ölçüm yöntemleri ve hasar tespiti, *Tmh - Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426 - 2003/4, (2003).

6. EKLER

6.1. BU TEZDEN YAPILAN BİLİMSEL YAYINLAR

1. Gerengi H., Kocak Y., Jazdzewska A., Kurtay M., Durgun H., 2013, Electrochemical investigations on the corrosion behavior of reinforcing steels in diatomite and zeolite-containing concretes in 0,5 M H₂SO₄ solution, *Construction & Building Materials*, Volume:49, Page:471–477.
2. Gerengi H., Kurtay M., Durgun H., 2015, The effect of zeolite and diatomite on the corrosion of reinforcement steel in 1 M HCl solution, *Result in Physics*.
3. Gerengi H., Kurtay M., Durgun H., 2015, Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatının 1 M HCl Çözeltisi İçerisindeki Korozyonu, 28-30 Mayıs 2015, 2. *Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu*, Gazi Üniversitesi, Ankara, Kabul Edilen Sözel bildiri. (<http://www.isbs2015.gazi.edu.tr/>)
4. Gerengi H., Kocak Y., Kurtay M., Durgun H., 2015, Diatomit ve Zeolit İkameli Beton İçerisindeki Donatı Korozyonunun Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)Yöntemi İle İncelenmesi, 10-12 Eylül 2015, *Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu*, Düzce Üniversitesi, Düzce, Kabul Edilen Sözel bildiri. (<http://umas.duzce.edu.tr/>)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Hatice Durgun
Uyruğu : TC
Doğum tarihi ve yeri : 16.12.1978 Düzce
Telefon : 05074611978
Faks :
E-posta : h_nurten@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	İnşaat Mühendisliği	
Lisans	Yapı Öğretmenliği	2005
Lise	Yapı Ressamlığı	1995

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-....	Standard Profil Oto. San. Tic. Aş.	Satınalma Sorumlusu
2009-2009	Funny Pazarlama Gıda San Aş.	Satınalma Müdürü
2008-2009	Sand Profile Ltd.Şti.	Satınalam Sorumlusu
2007-2008	Şerifoğlu Ağaç San. Tic. Aş.	Satınalma Sorumlusu
2003-2007	Sancaklı Mobilya Ağaç San. Tic Aş.	Satınalma Sorumlusu