

**FARKLI ORANLARDA ZEOLİTİK TUF KATKISININ BETON
ÖZELLİKLERİ VE BETONARME ÇELİĞİ KOROZYONUNA
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Saniye TABAN

**DOKTORA TEZİ
YAPI EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2010
ANKARA**

Saniye TABAN tarafından hazırlanan FARKLI ORANLARDA ZEOLİTİK TÜF KATKISININ BETON ÖZELLİKLERİ VE BETONARME ÇELİĞİ KOROZYONUNA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

.....

Tez Danışmanı, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Prof. Dr. Tülin KIYAK

.....

Tez Danışmanı, Kimya Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliğiyle YAPI EĞİTİMİ Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa Tokyay

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Yrd. Doç. Dr. Osman Şimşek

.....

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Metin Arslan

.....

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. H. Yılmaz Aruntaş

.....

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Doç .Dr. İ. Özgür Yaman

.....

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Tarih: 11/ 03/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Saniye Taban

**FARKLI ORANLARDA ZEOLİTİK TÜF KATKISININ BETON
ÖZELLİKLERİ VE BETONARME ÇELİĞİ KOROZYONUNA
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)**

Saniye TABAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mart 2010**

ÖZET

Bu çalışmada, zeolitik tüf (ZT) katkısının beton özellikleri ve betonarme çeliği korozyonu üzerine etkileri incelendi. Balıkesir ili Bigadiç ilçesinde yüzeyleyen kayalardan alınan zeolitik tüf (ZT) örneğinin puzolan olarak kullanılabilirliği araştırıldı. ZT katkısı, CEM I çimentosuyla ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirilmek üzere kullanılarak, içme suyu ile üretilen çeşitli numuneler içme ve deniz suyunda olgunlaştırıldı. Çimento hamurlarının standard kıvam, priz süresi, hacim genişmesi; çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanım özellikleri araştırıldı. Harç deneyleri için 40×40×160 mm boyutlarında harç prizma numuneleri; beton basınç dayanımı ve hızlı klor iyon geçirimsizlik deneyleri için 100×200 mm boyutlarında silindirik beton numuneler; su işleme derinliği, ultrasonik ses hızı deneyleri için 200×200×120 mm boyutlarında beton prizma numuneler ve korozyon ölçümleri için 50×100 mm boyutlarında silindirik betonarme numuneler üretildi. ZT katkılı betonarme numuneler üzerinde farklı elektrokimyasal ölçüm yöntemleri kullanılarak donatı korozyonu incelendi. Betonarme çeliğinin elektrokimyasal korozyon parametrelerinin belirlenmesinde üç elektrotlu ölçüm yöntemi kullanıldı. Korozyon deneyleri sonrası beton-çelik ara yüzeyi ile beton mikro yapı özellikleri taramalı elektron mikroskop (SEM) kullanılarak incelendi.

%10, %20, %30, %40 ZT katkılı beton numunelerin 360 günlük basınç dayanım değerlerinin kontrol numunelerinden sırasıyla %18,3, %14,0, %8,8 ve %5,3 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek silis bileşimine sahip ZT katkısı puzolanik etki ile jelleşme reaksiyonunun sürekli olarak devam etmesini ve beton boşluklarının azalmasını sağlamaktadır. ZT yer değiştirme oranı arttıkça betonarme numunelerin polarizasyon dirençleri artmakta ve korozyon akımları azalmaktadır. Betonarme çeliği yüzeyinde iyon geçişini engelleyen ZT tabakası lokalize korozyon riskini azaltmaktadır. Sonuç olarak, %30 ZT katkılı betonun özellikle deniz suyunun gel-git etkisi (ıslanma-kuruma) durumunda, betonarme çeliğine lokalize korozyona karşı en iyi koruma sağladığı görülmektedir.

Bilim Kodu	: 714.1.143
Anahtar Kelimeler	: Zeolitik tüf, harç, beton, betonarme çeliği, deniz suyu, üç elektrotlu ölçüm yöntemi, korozyon
Sayfa Adedi	: 134
Tez Yöneticisi	: Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK Prof. Dr. Tülin KIYAK

**INVESTIGATION OF EFFECT OF ZEOLITIC TUFF ADDITION ON
CONCRETE PROPERTIES AND CORROSION OF REINFORCED
CONCRETE STEEL
(PhD. Thesis)**

Saniye TABAN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
March 2010**

ABSTRACT

In this study, effect of zeolitic tuff (ZT) addition on concrete properties and corrosion of reinforced concrete steel were investigated. The usability of zeolitic tuff sample that was obtained from rocks belonging to Balıkesir Bigadiç region as pozzolan was investigated. ZT was replaced with Portland cement (CEM I) in ratio of % 0, % 10, % 20, % 30 and % 40 by weight and different of samples were prepared with tap water and cured in tap water and in sea water. Standard consistency, setting time, volume expansion of cements pastes; compressive and flexural strength of cement mortar were investigated. The 40x40x160 mm mortar prism specimens for mortar tests; 100×200 mm concrete cylinder specimens for concrete compressive strength and accelerated chloride ion penetration; 200×200×120 mm concrete prism specimens for depth of penetration water and ultrasonic pulse velocity; 50×100 mm specimens of cylinder reinforced concrete for corrosion measurement were prepared. The corrosion of reinforcement on the reinforced concrete added ZT specimens was investigated by different electrochemical measurement methods. The reinforced concrete bar for determination parameter of electrochemical corrosion used three electrode method. After the corrosion tests, the steel-concrete interface and concrete micro structure using scanning electron microscope (SEM) was investigated. Concrete compressive strength value of 360 days of concrete with

ZT addition in ratio of %10, %20, %30, %40 were higher %18,3, %14,0, %8,8 ve %5,3 than control samples was observed. ZT addition with high silica composition provide by pozzolonic effect thanks to reactions of cement gel carry and porosity decrease of concrete. As the ZT addition increased, polarisation resistance of reinforced concrete increased and corrosion current decreased. The risk of localized corrosion was decreased by the layer of ZT that was blocked ion transition on the reinforced concrete steel surface. Consequently the reinforced concrete steel was protected well than localized corrosion by concrete with ZT addition in ratio of %30 especially in the effect of splash sea water environment.

Science Code	: 714.1.143
Key Words	: Zeolitic Tuff, mortar, concrete, concrete reinforced steel, sea water, three electrode method, corrosion
Page Number	: 134
Adviser	: Asst. Prof. Dr. Osman ŞİMŞEK Prof. Dr. Tülin KIYAK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren ve her konuda destek olan danışmanlarım Yrd. Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK, Prof. Dr. Tülin KIYAK'a ve tez izleme katkılarından dolayı Prof. Dr. Yılmaz Aruntaş, Doç. Dr. İ. Özgür Yaman, Prof. Dr. Metin Arslan ve Prof. Dr. Mustafa Tokyay'a teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemenin temini ve analizlerinin yapılmasında katkılarından dolayı MTA, TÇMB ve Set Çimento'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xix
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Beton.....	5
2.1.1. Çimento.....	5
2.1.2. Agrega.....	6
2.1.3. Beton karışım suyu.....	6
2.1.4. Katkı maddeleri.....	6
2.2. Betonarme.....	7
2.3. Zeolitik Tüf.....	7
2.4. Deniz Suyu.....	11
2.5. Betonarme Çeliği Korozyonu.....	13
2.6. Betonarme Korozyonuna Etki Eden Faktörler.....	17

Sayfa

2.6.1. Beton kalitesi.....	17
2.6.2. pH Etkisi.....	20
2.6.3. CO ₂ etkisi.....	23
2.6.4. Klorür etkisi.....	24
2.6.5. Nem etkisi.....	26
2.6.6. Oksijen difüzyonunun etkisi.....	27
2.7. Korozyon Çeşitleri.....	27
2.7.1. Genel korozyon.....	27
2.7.2. Galvanik korozyon.....	28
2.7.3. Çukur korozyonu.....	30
2.8. Korozyona Karşı Alınacak Önlemler.....	33
2.8.1. Beton permeabilitesinin azaltılması.....	33
2.8.2. Standartlara uygun pas payı.....	35
2.8.3. Zararlı klorür limiti.....	36
2.8.4. Katodik koruma.....	38
2.8.5. Anodik koruma	40
2.8.6. İnhibitör kullanarak korozyonun önlenmesi.....	41
2.9. Korozyon Ölçüm Yöntemleri.....	42
2.9.1. Polarizasyon direnci yöntemi.....	42
2.9.2. Tafel ekstrapolasyon yöntemi.....	44
2.9.3. Elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemleri.....	45
3. MATERYAL VE METOT.....	47
3.1. Materyal.....	47

	Sayfa
3.1.1. Zeolitik Tüf.....	47
3.1.2. Çimento.....	49
3.1.3. CEN Standard Kumu.....	49
3.1.4. Agregas.....	49
3.1.5. Su	50
3.1.6. Betonarme çeliği.....	51
3.2. Metot.....	52
3.2.1. Zeolitik tüfün puzolanik aktivite deneyi.....	52
3.2.2. Çimento priz süresi ve hacim genişmesi tayini.....	53
3.2.3. Çimento harçlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi.....	53
3.2.4. Beton karışım hesabı.....	54
3.2.5. Taze beton deneyleri.....	54
3.2.6. Sertleşmiş beton deneyleri.....	54
3.2.7. Betonarme numunelerin üretimi ve elektrokimyasal korozyon ölçümleri	60
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	72
4.1. Zeolitik Tüfün Puzolan Olarak Kullanılabilirliği	72
4.2. Çimento Deneyleri.....	74
4.2.1. Çimentoda standart kıvam tayini.....	74
4.2.1. Çimento priz süreleri.....	75
4.2.3. Çimento hacim genişmesi	77
4.3. Çimento Harçlarının Mekanik Özellikleri	77

Sayfa

4.3.1. Çimento harçlarının eğilme dayanımı sonuçları.....	77
4.3.2. Çimento harçlarının basınç dayanımı sonuçları.....	80
4.4. Taze Beton Deney Sonuçları.....	83
4.5. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları.....	84
4.5.1. Beton basınç dayanımı.....	85
4.5.2. Hızlı klor iyonu geçirimsizlik.....	89
4.5.3. Beton su işleme derinliği	91
4.5.4. Beton ultrases hızı ve boşluk miktarı	94
4.6. Betonarme Numunelerin Elektrokimyasal Korozyon Çalışmaları.....	94
4.6.1. Betonarme numunelerin korozyonunun tahribatsız elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi.....	95
4.6.2. Betonarme numunelerin kimyasal çevre değişimine karşı gösterdiği direncin tahribatsız elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi.....	111
4.6.3. Betonarme numunelerin korozyonunun tahribatlı elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi.....	114
4.7. Elektrokimyasal Ölçümler Sonucunda Betonarme Numunelerin Mikro Yapısının İncelenmesi.....	118
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	122
KAYNAKLAR.....	126
ÖZGEÇMİŞ.....	134

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. TS 25 Standardı tras özellikleri.....	8
Çizelge 3.1. Çimento kimyasal kompozisyonu, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	49
Çizelge 3.2. Kullanılan agregaların özellikleri.....	50
Çizelge 3.3. Ege denizi suyunun kimyasal özellikleri.....	50
Çizelge 3.4. Betonarme çeliği kimyasal bileşimi.....	51
Çizelge 3.5. Puzolanik aktivite harçlarının karışım oranları.....	52
Çizelge 3.6. Çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımı deney planı.....	53
Çizelge 3.7. 1m ³ beton karışım içinde kullanılan malzeme miktarları	54
Çizelge 3.8. Sertleşmiş beton deneylerine ait numune üretim planı.....	55
Çizelge 3.9. Hızlı klor iyon geçirimsizlik deney sonuçlarına göre betonun değerlendirilmesi.....	57
Çizelge 3.10. Ses hızı ile betonun kalitesinin tahmin edilmesi.....	60
Çizelge 4.1. ZT numunesinin kimyasal analiz sonuçları	72
Çizelge 4.2. ZT'ün fiziksel ve mekanik özellikleri	73
Çizelge 4.3. ZT ikameli çimento hamuru fiziksel özellikleri.....	74
Çizelge 4.4. Harç prizmalarının eğilme dayanım değerleri.....	78
Çizelge 4.5. Harç prizmalarının basınç dayanım değerleri.....	81
Çizelge 4.6. Taze beton özellikleri.....	83
Çizelge 4.7. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri.....	85
Çizelge 4.8. 360 günlük beton numunelerin elektrik akımı etkisi altında klorür iyonu geçirimsizliğine ait yük değerleri.....	89

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.9. 90 günlük beton numunelerin su işleme derinlik miktarları	91
Çizelge 4.10. Beton numunelerin ultrases hızı ve boşluk oranı değerleri.....	93
Çizelge 4.11. Betonarme numunelerin tahribatlı deneyler sonucunda elektrokimyasal parametrelerin değişimleri.....	116

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Betonarme çeliğinin korozyon hücresi.....	14
Şekil 2.2. Demir oksitlerinde meydana gelen hacim artışı.....	16
Şekil 2.3. Demir-su sistemi için potansiyel-pH diyagramı.....	21
Şekil 2.4. Demir-su-klorür (1M =% 3,55) çözeltisi için potansiyel - pH diyagramı.....	22
Şekil 2.5. Karbonatlaşma ve korozyon arasındaki ilişki.....	23
Şekil 2.6. Sodyum klorürün korozyon hızına etkisi.....	26
Şekil 2.7. Çinko ve bakırdan oluşan galvanik hücre.....	28
Şekil 2.8. Betonarme çeliği korozyonunun şematik anlatımı ve çukur korozyonu oluşumu.....	31
Şekil 2.9. Betonarme donatısına ait korozyon hızı ile beton boşluk suyu içindeki $[Cl^-]/[OH^-]$ oranı ilişkisi.....	37
Şekil 2.10. İletken örtü malzemesi ile beton donatısının katodik koruması.....	38
Şekil 2.11. Polarizasyon direnç yöntemiyle korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi	43
Şekil 2.12. Anodik ve katodik polarizasyon eğriler.....	45
Şekil 3.1. Betonarme çeliği boyutları.....	51
Şekil 3.2. Betonarme çeliğinin beton içindeki durumunun şematik gösterimi	61
Şekil 3.3. Bir betonarme numunede çeliğin korozyon özelliklerini belirleyen bölgelerin şematik gösterimi.....	62
Şekil 3.4. Farklı numuneler için elde edilen açık devre potansiyellerinin (E_{ADP}) zamana göre değişimi.....	66
Şekil 3.5. Açık devre potansiyel (E_{ADP}) değerlerinin numune türüne göre değişim ve dağılımları.....	66

Şekil	Sayfa
Şekil 3.6. Açık devre potansiyellerindeki korozyon akımlarının zamana göre değişimi	67
Şekil 3.7. Polarizasyon direnci yöntemine göre elde edilen akım-potansiyel eğrileri.....	68
Şekil 3.8. % 3,5 NaCl ortamında bekletilen farklı numunelerin -1,3 V ile 0,5 V aralığında 0,5mV/s potansiyel tarama hızında polarize edilmesi ile elde edilen akım potansiyel eğrileri	71
Şekil 4.1. Zeolitik tüf numunesinin X-ışını kırınım (XRD) deseni.....	73
Şekil 4.2. ZT ikameli çimento hamurlarının kıvam suyu miktarının kontrol numunesine göre % değişim oranları	75
Şekil 4.3. ZT ikameli çimento hamurlarının priz başlangıcı süresinin kontrol numunesine göre % değişim oranları	76
Şekil 4.4. ZT ikameli çimento hamurlarının priz sonu süresinin kontrol numunesine göre % değişim oranları	76
Şekil 4.5. ZT ikameli harç numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları	79
Şekil 4.6. ZT ikameli harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	79
Şekil 4.7. ZT ikameli harç numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	80
Şekil 4.8. ZT ikameli harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	81
Şekil 4.9. ZT ikameli harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	82
Şekil 4.10. ZT ikameli harç numunelerinin 90 günlük basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	82
Şekil 4.11. ZT ikameli beton karışımların çökme miktarının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	84

Şekil	Sayfa
Şekil 4.12. ZT ikameli 7 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	86
Şekil 4.13. ZT ikameli 28 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	86
Şekil 4.14. ZT ikameli 90 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	87
Şekil 4.15. ZT ikameli 180 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	88
Şekil 4.16. ZT ikameli 360 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	88
Şekil 4.17. ZT ikameli 360 günlük betonların klor iyon geçirimsizliklerinin kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	90
Şekil 4.18. ZT ikameli 90 günlük betonların su işleme derinliklerinin kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	92
Şekil 4.19. ZT ikameli 90 günlük betonların ultrases hızının kontrol numunesine göre % değişim oranları.....	94
Şekil 4.20. Betonarme numunelerin 134 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A-B-C koşullarında) açık devre (E_{ADP}) potansiyellerinin zamana göre değişim ve dağılımları (a) ZT0 (b) ZT10 (c) ZT20 (d) ZT30 (e) ZT40	97
Şekil 4.21. Betonarme numunelerin 134 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A-B-C koşullarında) ölçülen (E_{ADP}) potansiyel ortalama değerlerinin zamana göre değişimi.....	101
Şekil 4.22. Betonarme numunelerin suda 98 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A2 koşulu) açık devre koşullarındaki korozyon yüklerinin (Q_{net}) günlere göre değişimleri (a) ZT 0 (b) ZT 10. (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40.....	102
Şekil 4.23. Betonun mikro yapısının şematik gösterimi.....	103
Şekil 4.24. Betonarme numunelerin suda 98 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A2 koşulunda) açık devre potansiyelleri (E_{ADP}) ve korozyon potansiyelleri ($E_{i=0}$) (a) ZT 0 (b) ZT 10 (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40.....	104

Şekil	Sayfa
Şekil 4.25. Betonarme numunelerin suda 98 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A2 koşulunda) korozyon dirençleri (R_p) (a) ZT 0 (b) ZT 10 (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40.....	106
Şekil 4.26. Betonarme numunelerin suda 98 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A2 koşulunda) korozyon akımları (i_{cor}) (a) ZT 0 (b) ZT 10 (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40	106
Şekil 4.27. Açık devre potansiyel verilerinin elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre düzenlenmiş hali.....	108
Şekil 4.28. Açık devre potansiyelinde yüzeyden geçen akımların elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre düzenlenmiş hali.....	109
Şekil 4.29. Açık devre potansiyel verilerinin elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre düzenlendikten sonra potansiyel titreşim genliklerinin ortalamaları.....	110
Şekil 4.30. Açık devre potansiyelinde yüzeyden geçen akımların elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre düzenlendikten sonra akım titreşim genliklerinin ortalamaları.....	110
Şekil 4.31. 98 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılan Betonarme numunelere ait suda/havada korozyon potansiyelleri ($E_i=0$) dağılımları.....	111
Şekil 4.32. 98 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılan betonarme numunelere ait suda/havada polarizasyon direnci (R_p) dağılımları.....	112
Şekil 4.33. 98 gün tuzlu suda bekletilip daha sonra havaya çıkarılan betonarme numunelere ait suda/havada yüzey yükleri (Q_{net}) dağılımları.....	113
Şekil 4.34. Betonarme numunelerinin -1,3 V ile 0,5 V aralığında 0,5 mV/sn tarama hızında elde edilen katodik-anodik polarizasyon eğrileri	115
Şekil 4.35. Betonarme numunelerinin -1,3 V ile 0,5 V aralığında 0,5 mV/sn tarama hızında elde edilen katodik-anodik polarizasyon eğrilerinin oluşturduğu potansiyel duvarı grafiği.....	116

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Farklı ortmalarda olgunlaştırılmış beton basınç dayanım numuneleri.....	56
Resim 3.2. Beton su işleme derinliği tayini cihazı.....	58
Resim 3.3. Ultrases ses hızı ölçüm cihazı.....	59
Resim 3.4. 100×100 mm boyutlarında üretilmiş betonarme küp numuneler.....	60
Resim 3.5. Karotla 50×100 mm boyutlarına getirilmiş betonarme silindir numuneler.....	60
Resim 3.6. % 3,5 NaCl içeren korozyon ortamında betonarme numunelerin korozyon ölçümlerinde kullanılan düzenek.....	62
Resim 3.7. Potansiyostat cihazı.....	63
Resim 3.8. Elektrotların şeması (a) Karşılaştırma elektrodu (b) Karşıt elektrot.....	63
Resim 4.1. Farklı oranlarda ZT içeren betonların su işleme derinlik miktarları (a) ZT0 (b) ZT10 (c) ZT20 (d) ZT30 (e) ZT40.....	92
Resim 4.2. ZT0 betonun SEM görüntüsü.....	118
Resim 4.3. ZT10 betonun SEM görüntüsü.....	119
Resim 4.4. ZT20 betonun SEM görüntüsü.....	119
Resim 4.5. ZT30 betonun SEM görüntüsü.....	120
Resim 4.6. ZT40 betonun SEM görüntüsü.....	120

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 3.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası.....	47
Harita 3.2. Çalışma alanının jeolojik özellikleri	
(a) Jeoloji haritası (b) Genelleştirilmiş kesiti	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
E	Potansiyel
i	Akım
R_p	Polarizasyon direnci
E_{cor}	Korozyon potansiyeli
E_{i=0}	Sıfır akım potansiyeli
i_{cor}	Korozyon akımı
μA	Mikroamper
mA	Miliamper
(dE/di)_{i→0}	Polarizasyon eğrisinin eğimi
β_a	Anodik tafel eğimi
β_c	Katodik tafel eğimi
ADP	Açık devre potansiyeli
Q	Yüzey yükü
Q_a	Anodik yüzey yükü
Q_k	Katodik yüzey yükü
Q_{net}	Net yüzey yükü
ΔE_{PD}	Potansiyel duvarı genişliği
i_{KS}	Son indirgenme potansiyelindeki akım miktarı
i_{AS}	Son yükseltgenme potansiyelindeki akım miktarı
cm	Santimetre
mm	Milimetre
V	Volt
mV	Milivolt

Kısaltmalar	Açıklama
ZT	Zeolitik tuf
ZT0	Kontrol numuneleri
ZT10	%10 ZT katkılı numuneler
ZT20	%20 ZT katkılı numuneler
ZT30	%30 ZT katkılı numuneler
ZT40	%40 ZT katkılı numuneler
İİ	Karışım suyu içme suyu, olgunlaştırma suyu içme suyu
İD	Karışım suyu içme suyu, olgunlaştırma suyu deniz suyu
s/ç	Su/çimento oranı
s/b	Su/bağlayıcı oranı
SCE	Standart kalomel elektrot
SEM	Taramalı elektron mikroskop
XRD	X-Işını difraksiyon spektroskopisi
MTA	Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği

1. GİRİŞ

Beton çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin uygun oranlarda karıştırılması ile üretilen başlangıçta plastik kıvamlı olup zamanla çimentonun hidratasyonu sonucu sertleşen bir yapı malzemesidir. Betonun zaman içinde çevresel etkilere karşı kalıcı olması gerekmektedir. Dayanıklılık olarak ifade edilen bu olay betonun iç ve dış fiziksel, kimyasal veya fizikokimyasal etkilere karşı direnç göstermesi şeklinde tanımlanmaktadır[1].

Betonarme yapılar zaman içinde değişik nedenlerle dayanım ve dayanıklılığını kaybedebilir. Beton içindeki çelik donatının korozyonu sonucu betonda çatlak ve bozulmalar ve soğuk iklimlerde ise donma-çözülme etkisi altında benzer bozulmalar ortaya çıkabilir. Bunların dışında, diğer durabilite problemleri nedeni ile betonda sorunlar oluşabilir. Betonarme yapıların tasarımında önceliğin dayanımdan çok durabiliteye göre yapılması anlayışı günümüzde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle donatı korozyonuna bağlı çatlakların betonarme yapının durabilitesini olumsuz biçimde etkilediği ve performansını azalttığı bilinmektedir [2].

Deprem bölgelerindeki betonlarda granülometriye ve beton kalitesine özen gösterilmediği, yeterli pas payının (beton örtüsünün) oluşturulmadığı, böylece betonun betonarme çeliğini koruyamadığı görülmektedir. Betonarme içindeki donatıyı koruyan betondur. Doğru tasarlanmış bir beton, hem basınç gerilmelerini karşılar hem de donatının korozyona uğramasını önler. Geçirimlilik ile betonun durabilitesi arasında sıkı bir ilişki vardır. Geçirimliliği ve boşluğu az bir beton üretimi ile donatı korozyonuna, asit, sülfat, don ve alkali reaktivitesine karşı gereken önlem alınmış olunur. Durabilitedeki olumsuzluğa bağlı olarak performansın zamanla azalması kalan dayanımın azalması anlamına gelir. Beton agrega-çimento hamuru temas yüzeyinden oluşan bir malzeme olarak düşünülürse en zayıf halkanın bu ara yüzeyler olduğu ortaya çıkar. Beton teknolojisindeki gelişmenin anahtarı agrega-çimento hamuru arasındaki ara yüzeylerin güçlendirilmesidir [3].

Betonun dayanımını ve geçirimliliğini dolayısı ile donatı korozyonunu etkileyen en önemli faktör beton içindeki toplam boşluk oranıdır. Beton içindeki boşluklar, agrega tanelerinin bünyesi içindeki boşluklar, agrega taneleri arasında kalan boşluklar, betonun farklı oturmasının yol açtığı boşluklar, agrega çimento ara yüzünde oluşan boşluklar ve sertleşmiş çimento hamuru içindeki boşluklar olarak sayılabilir. Bunlardan agrega tanesi içindeki boşluklar, agreganın kayaç özelliklerine bağlıdır ve beton geçirimliliğindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Betonun iyi yerleştirilememesi nedeni ile çimento hamurunun agrega taneleri arasına giremediği durumda, agrega taneleri arasında meydana gelen boşluklar ise taze beton özelliklerine ve işçiliğe bağlı denetlenebilir boşluklardır [4].

Beton taze halde iken ayrışmadan, boşluğu en az olacak şekilde sıkışıp yerleşebilmeli ve sertleştikten sonra çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilere karşı yeterli dayanıklılığa sahip olmalıdır. Betonun iç ve dış etkiler sonucu yapacağı şekil değiştirmelerin belirli değerleri aşmaması gerekmektedir. Bu özelliklerin yerine getirilebilmesi için yapılan araştırmalarda, betonun dayanım ve dayanıklılığını belirleyen en önemli etkenlerden birinin s/ç oranı olduğu ortaya çıkmıştır. Betonda düşük s/ç oranının sağlanması; agrega karışım oranlarının ve granülometrisinin düzenlenmesi ve beton katkı maddelerinin kullanılması ile gerçekleştirilmektedir [1].

Puzolan olarak bilinen doğal tüfler Portland kompoze çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Zeolitik tüfler; zeolit minerali içeren, gözenekli, doğal, volkanik tüflerdir. Zeolit minerallerinin en önemli özelliği iyon değiştirme yetenekleridir. Tras katkı maddesi olarak kullanıldığında, klinkerin su ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan kireç puzolanik reaksiyonun meydana gelmesini, trasın bağlayıcı özellik kazanmasını sağlar. Doğal puzolanlar, katkılı çimentoların geçirgenliğinin düşük olmasına neden olurken, Portland çimentosuna göre de sülfat etkisi gibi kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olmalarını sağlamaktadır [5].

Beton uygulamalarında tras katkılı çimentoların kullanılması; betonun işlenebilirliğini arttırmak, geçirgenliği azaltmak, sülfat etkisine karşı dayanımı arttırmak, çatlamalara karşı dayanımı iyileştirmek, uzun dönemde dayanıklılığı arttırmak gibi çeşitli teknolojik avantajlar da sağlamaktadır [6].

Betonun en zayıf özelliklerinden biri çekme gerilmesinin düşük olmasıdır. Betonun çekme ve eğilme gerilmeleri karşısında çatlayıp kırılmasını önleyebilmek için, çekme gerilmelerine maruz kalacak bölgelerine çelik çubuklar yerleştirilerek betonarme sistem oluşturulmuştur. Çelik ve beton arasında iyi bir aderans olduğu zaman, bu iki malzeme tek bir malzeme gibi davranış göstermektedir. Çekme dayanımı yüksek olan çelik çubuklar, çekme dayanımı düşük olan betonu takviye etmektedir. Betonarme yapılarda donatının daha kısa süre içinde korozyondan etkileneceği bilinmektedir. [7].

Betonarme betonu üretiminde, donatının korozyona uğramasına (paslanmasına), sertleşmiş betonun hacim değişmesine, beton yüzeyinde çiçeklenmeye ve lekelenmeye neden olabilecek maddelerin bulunmamasına dikkat edilmelidir. Araştırmalara göre deniz suyunun beton karma suyu olarak kullanılmasının donatı korozyonuna neden olmasından dolayı kullanılmaması önerilmektedir [1].

Korozyon, metallerin içinde bulundukları ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlara girerek metalik özelliklerini kaybetmeleri olayıdır. Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmadığı gibi normal koşullar altında da korozyona uğrayabilir. Yapılarda yaygın olarak kullanılan ve çok önemli görevi olan betonarme donatısı zamanla korozyon olayı ile karşı karşıya kalabilmektedir [8].

Beton donatısının korozyonu öncelikle elektrokimyasal mekanizmaya göre gerçekleşirken beton, kimyasal korozyona uğrar. Korozyona uğrayan betonun dayanımında oluşan azalmalar sonucunda, beton içinde gömülü çeliğin dayanımı da azalmaktadır. Betonarme yapılardaki korozyon, değişken doğal ortam nedeni ile korozif ortam-beton ve beton/donatı ara yüzeylerinde sürekli olarak meydana gelen elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Betonarmedeki çevre-

beton-donatı sisteminde çevrenin değişen koşullarının oluşturduğu kimyasal korozyonla kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinde kalite kaybına uğrayan betonun demire sağladığı pasifleştirici alkali ortam, koroziif ortama dönüşürken donatı çeliğinin üzerindeki koruyucu pasif tabaka da etkisini kaybeder. Bunun sonucunda beton-donatı ara yüzeyinde oluşan hacimli korozyon ürünleri betonu çatlatacak seviyede içsel gerilmelerinin ortaya çıkmasına yol açarlar.

Zeolitik tuf (ZT) katkılı çimentoların özellikleri konusunda sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmada farklı oranlarda ZT katkısının, Portland çimentosu ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılması ve içme suyu ile üretilen çeşitli numunelerin içme ve deniz suyunda olgunlaştırılması ile çimento, harç, beton özellikleri ve betonarme çeliği korozyonu üzerine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Beton

Beton normal koşullarda betonarme çeliği için iyi bir koruyucu ortam oluşturur. Bu durum betonun yüksek alkali özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır. Beton pH derecesinin yüksek oluşu betonarme demiri yüzeylerinde pasif bir oksit filmi oluşmasına neden olur. Beton permeabilitesinin düşük oluşu, korozyona neden olan bileşenlerin beton içinde betonarme yüzeyine kadar ulaşmasına engel olur. Beton üretiminde kullanılan doğal kum, çakıl ve su gibi bileşenler normal halde çok küçük konsantrasyonlarda klorür içermektedir. Bu şekilde beton içerisine belli bir limit değerin altında giren klorür betonarme çeliğinin korozyonuna neden olmaz [9].

Beton kalitesinde, kullanılan çimento cinsi büyük önem taşır. Portland çimentosu yerine, puzolanlı çimentonun kullanılması korozyon açısından daha faydalıdır. Puzolanlar, çimento klinker bileşiklerinin hidrolizi sonucu oluşan kalsiyum hidroksitle birleşerek, beton boşlukları içinde kristalize olur. Böylece beton boşluk yüzdesi ve permeabilitesi büyük ölçüde azalır. Betonun mekanik özellikleri üzerinde en etkili olan, çimento-agrega aderansıdır. Aderansın iyi oluşu betonun dayanımını olumlu yönde etkilemekle beraber plastik davranışlarını da kısıtlar. Betonun ortalama olarak % 70' ini meydana getiren malzeme agregadır. Su ve çimentodan meydana gelen çimento hamurunda, suyun çimentoya oranı ne kadar küçük olursa betonun basınç dayanımı, çevresel etkilere karşı dayanıklılığı ve hacim sabitliği iyileşmektedir [1].

2.1.1. Çimento

Çimentolar, hidrolik bağlayıcı maddeler olup, gerek kendi başına gerekse katılan kum, çakıl, kırma taş gibi malzemelerle birlikte su ile karıştırılıp hamur haline getirildikten sonra hava ve suyun içinde yavaş yavaş sertleşerek taş haline dönüşürler. Çimentonun ana maddeleri kalker, kil, alçı taşı (%3-%6 oranında) ve silisli kumdur. Bunların belli oranlarda karıştırılıp en az sinterleşmeye kadar döner

fırında pişirilmesiyle elde edilen ürüne çimento klinkeri denir. Klinker ince öğütülmek suretiyle hidrolik özellik kazanır. Çimentolar, kullanıldığı yere göre farklı özelliklere sahip olmalıdır. Örneğin; kullanılan çimento tipi normal bir bina için uygun iken bir deniz yapısı için uygun olmayabilir [1].

2.1.2. Agreg

Agrega, doğal, yapay veya her iki cins yoğun mineral malzemenin, genellikle 63 mm' ye kadar çeşitli büyüklüklerdeki kırılmamış veya kırılmış tanelerin bir yığındır. En çok kullanılan agreg türleri doğal kum ve çakıdır. Agregaları, tane boyutlarına göre ince ve iri agreg olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Agreg esas olarak bir dolgu malzemesidir ve en önemli fonksiyonu betondaki hacim değişikliklerini azaltmaktır. Su ve çimentodan oluşan hamur, büyük hacim değişiklikleri gösterir. Agreganın betona girmesi hem bu hacim değişikliğini azaltır, hem de agreg çimentodan daha ucuz olduğundan ekonomi sağlar. Betonun iyi işlenebilmesi için agreganın granülometrisi çok önemlidir [1].

2.1.3. Beton karışım suyu

Betonda karışım suyunun iki önemli işlevi vardır. Bunlardan birincisi, çimentonun hidratasyonunun tamamlayarak mukavemet kazandırmasıdır. İkincisi ise agreg ile çimento hamurunun birbirine yapışması (aderansı), betonun boşluksuz yerleştirilip sıkıştırılması için gerekli olan sudur. Beton özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek yabancı maddeler içinde bulundurmayan bütün doğal kaynaklı sular beton üretiminde kullanılabilir [1].

2.1.4. Katkı maddeleri

Beton katkı maddeleri, harç ve betonların taze veya sertleşmiş haldeki bazı özelliklerini değiştirmek amacı ile karıştırma işlemi sırasında karışıma katılan

agrega, su, hidrolik bağlayıcı gibi ana bileşenlerden farklı olan maddelerdir. Katkı maddeleri ile beton üretimindeki sorunların çözülmesi ekonomik bir yol olarak kabul edilir. Betonda kullanılan katkı maddeleri genel olarak kimyasal ve puzolanik katkı maddeleridir. Beton kimyasal katkı maddeleri, betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bazılarında değişiklik yapmak amacıyla beton karışım suyuna belli oranlarda katılan maddelerdir. Puzolanik katkı maddeleri ise su tutucu özellik gösterirler ve doğadan serbest olarak elde edildiği gibi bir sanayi kuruluşunun yan ürünü olarak da elde edilebilir [1].

2.2. Betonarme

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 önemli faktörlerden birisi de korozyondur [1].

Beton karışımında kullanılacak en büyük tane büyüklüğü yapı elemanının cins ve en dar kesitinin boyutu ile ilişkilidir. En büyük tane büyüklüğü, en dar kesit kalıp genişliğinin 1/5'den, döşeme derinliğinin 1/3'den ve donatılı betonda en küçük donatı aralığının 3/4'den küçük seçilmelidir. Ayrıca beton üretiminde kullanılacak en büyük agrega çapı pas payından da küçük olmalıdır. Bunun temel amacı donatıyı korozyondan korumaktır [1].

2.3. Zeolitik Tüf

Çimento maliyeti ve tüketimini azaltmak için bağlayıcı özelliğe sahip inorganik malzemeler katkılı çimento üretmek için kullanılabilir. Bu malzemeler volkanik tüf, pomza, perlit ve diatomit gibi doğal puzolanlar (tras) ve cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi metalurjik tesis atıklarından oluşan yapay puzolanlardır. Katkılı

çimento, Portland çimentosuna göre çok daha az enerji tüketimi sağlaması ve bazı özelliklerinin getirdiği ilave katkılardan dolayı yapı sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Beton uygulamalarında tras katkılı çimentoların kullanılması; betonun işlenebilirliğini arttırmak, geçirgenliği azaltmak, sülfat etkisine karşı dayanımı arttırmak, çatlamalara karşı dayanımı iyileştirmek, uzun dönemde dayanıklılığı arttırmak gibi çeşitli teknolojik avantajlar da sağlamaktadır [6].

Puzolan volkanik orijinli doğal bir hammaddedir; temel olarak silis ve alüminyum oksitten oluşmakta, eser miktarda kireç içermektedir. Trasın yalnız başına hidrolik bağlayıcı özelliği yoktur. Reaksiyona girmek için kirece gereksinim duyar ve bağlayıcı özelliklere sahip ürün verir. Kireç ve silika arasında meydana gelen reaksiyon puzolanik reaksiyon olarak bilinir. Tras katkı maddesi olarak kullanıldığında, klinkerin su ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan kireç puzolanik reaksiyonun meydana gelmesini, trasın bağlayıcı özellik kazanmasını sağlar. Doğal puzolanlar, katkılı çimentoların geçirgenliğinin düşük olmasına neden olurken, portland çimentosuna göre de sülfat etkisi gibi kimyasal etkilere karşı daha dayanıklı olmalarını sağlamaktadır [5].

Doğal puzolanların aktivitesi açısından özgül yüzeyin, kimyasal bileşiminin ve mineralojik yapının büyük rol oynadığı bilinmektedir. Genel olarak, puzolan tarafından bağlanan kireç miktarının aktif fazların yapısı, miktarı, SiO_2 içeriği, karışımın kireç/puzolan oranı, kür süresine bağlı olduğu birçok araştırma tarafından doğrulanmıştır [10].

Doğal puzolan katkılı çimentodan üretilen yapıların uzun dönemde dayanımı $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ içeriği ile ilişkilidir. Kısa dönemde ise özgül yüzey alanı dayanım açısından birinci derecede etkilidir [11].

Doğal puzolanların kimyasal özellikleri için istenen değerler Çizelge 2.1’de verilmiştir. Sönmüş kireç ve doğal puzolanik madde karışımıyla hazırlanan örneklerin, 7 günlük çekme dayanımı en az 1 N/mm^2 ve basınç dayanımı en az 4 N/mm^2 olması gerekmektedir [12].

Çizelge 2.1. TS 25 Standardı tras özellikleri [12]

SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Nem Oranı (%)	7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)
> 70	< 5	< 3	< 10	> 1	> 4

Yüksek puzolanik aktiviteye sahip trasların camsı faz (>%80) ve alkali feldspat içerikleri yüksek, kil içeriği ise düşüktür [13].

ZT'ler alkali ve toprak alkali metallerin sulu alümina silikatları olarak tanımlanmaktadır. Zeolitik tüfler kristal yapıları ve kimyasal özellikleri nedeni ile günümüz endüstrisinin önemli hammaddeleri arasındadır. ZT'ler çok küçük gözenekli yapıya sahip malzemelerdir. Zeolitlerin kristal yapı ve kimyasal özelliklere sahip olması seçimli adsorbsiyon, moleküler elek ve katalitik kullanım alanları gibi uygulamalarda değerlendirilmesini sağlar [14].

ZT'ler, betonun yeraltı su korozyonuna maruz kalacağı hidrolik çimentolarda önemli uygulamalar bulmaktadır. ZT'lerin sulu altyapılarda kullanılacak çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir [15].

ZT'lerin kullanılmasıyla elde edilen hafif yapı malzemeleri, yüksek ısı yalıtım özelliği ile ısıtma ve soğutma sistemlerinin hem ilk yatırımlarında hem de yapıların kullanımları süresince ortaya çıkan enerji harcamalarında önemli tasarruflar sağlamaktadır [16].

Zeolitik tüflerin zeolitik olmayan doğal puzolanlara göre daha aktif olmaları genel olarak zeolitlerin mikro-gözenekli yapısıyla ilişkilendirilmektedir. Mikro-gözeneklilikten dolayı zeolitler difüzyon-kontrollü tane yüzeyinde meydana gelen reaksiyon yoluyla ortamdaki kireçle etkin bir şekilde reaksiyona girerek bağlayıcı jeller oluşturmaktadır [17].

Doğal zeolit tozunun ASR genleşmelerine etkisini incelemek için yapılan çalışmada ASTM C-227 Harç Çubuğu metodunu uygulayarak % 30 oranında doğal zeolit tozunun çimento ile yer değiştirmesi durumunda reaktif agrega kullanılsa bile betonda ASR'nin oluşmayacağı ve zeolit tozunun inceliği artıkça bu etkinin artacağı belirtilmiştir. Bu sonuç zeolit tozunun boşluk çözeltisi alkalitesini iyon değişimi, absorpsiyon puzolanik reaksiyon sonucu düşürmesi ile ortaya çıkmaktadır [18].

ZT'ler çimento inceliğinde öğütülüp, pişirme işlemi uygulanmadan çimentoya ikame edildiğinde; 7 ve 28 günlerdeki basınç dayanımlarının kontrol örneklerine yakın olduğu, 90 gün ve sonraki yaşlarda basınç dayanımlarını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir [19].

Zeolit katkılı çimentoların incelenmesi çalışmasında doğal zeolit %5, 10 ve 20 oranlarında klinkerle birlikte öğütülmüş ve elde edilen çimentolarla hazırlanan harçların eğilmede çekme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. En yüksek eğilmede çekme dayanım değeri %5 zeolit katkılı harçta elde edilmiştir. Basınç dayanımı değerlerinin ise zeolit katkı miktarı arttıkça yükseldiği gözlemlenmiştir. En yüksek değer %20 zeolit oranına sahip harçta elde edilmiştir [20].

Başka bir çalışmada %10, 20, 30 ve 40 oranlarında çimento yerine zeolit kullanılarak elde edilen harç numunelerinin hidratasyon ve mekanik özellikleri incelenmiştir. 90 günlük eğilme dayanımları karşılaştırıldığında portland çimentosu ile elde edilen kontrol numunesi, %10 ve %20 çimento yerine zeolit kullanılan harç numunelerinin değerleri birbirine çok yakın (7 N/cm^2), %30 ve %40 çimento yerine zeolit kullanılan harç numunelerin eğilme dayanımlarının azaldığı saptanmıştır. 90 günlük basınç dayanım değerlerinde ise portland çimentosu ile elde edilen harç numunesinin basınç dayanım değerinin 45 MPa elde edilirken, en yüksek değer %10 çimento yerine zeolit kullanılan harç numunesine ve bu değerden sonra %20 çimento yerine zeolit kullanılan harç numunesine ait olduğu saptanmıştır. Bu çalışmalara göre %20 oranına kadar çimento yerine zeolit kullanılması betonların eğilme ve basınç dayanım değerlerini arttırmaktadır[21].

2.4. Deniz Suyu

Denizlere yakın ve kıyı şeridinde bulunan yapılardaki beton ve betonarme elemanlar dolaylı olarak deniz suyu ve deniz ortamının oluşturduğu koşullardan etkilenmektedir. Bu ortamda bulunan beton ve betonarme elemanların değişik fiziksel ve kimyasal etkiler sonucunda dayanım ve durabilitesini kaybettiği bilinmektedir. Bu etkiler arasında; sülfat etkisi, magnezyum iyonları ile kalsiyum iyonlarının yer değiştirme reaksiyonları, karbonatlaşma, klorür korozyonu, donma-çözülme, tuz kristalizasyonu, dalgaların ve yüzen parçacıkların aşındırıcı etkileri sayılabilir. Yapının veya yapı elemanının yukarıdaki etkilerden herhangi birine veya hepsine maruz kalması ve etkinin şiddeti deniz seviyesine göre bulunduğu konuma bağlıdır. Genel olarak en çok hasarın ıslanma-kuruma bölgesinde bulunan elemanlarda olduğu söylenebilir [22].

Deniz suyunun beton üzerindeki kimyasal etkisi ve etkileşim mekanizmaları çözünmüş tuzları içermesinden kaynaklanmaktadır ve tipik tuzluluk oranı % 3,5 civarındadır. Deniz suyunda bulunan tuzlar arasında, sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür (MgCl), magnezyum sülfat (MgSO₄), kalsiyum sülfat (CaSO₄), potasyum klorür (KCl), potasyum sülfat (K₂SO₄) sıralanabilir[23,24].

Deniz suyu hidrate çimento bileşenleri ile reaksiyon yapabilen magnezyum ve sülfat iyonları içerir. Deniz suyunda çözünmüş bulunan CO₂, karbonik asit etkisi yapar. İçerdiği yüksek sülfat iyon konsantrasyonu ile deniz suyu ve sülfat iyonlarının C₃A ve CSH ile reaksiyonundan etrenjit oluşur. Bu bulguya göre oluşan etrenjit ancak yüksek alkali ortamda su emerek genişlemektedir. Deniz suyunun beton üzerindeki bir diğer kimyasal etkisi ise magnezyum iyonlarının kalsiyum iyonlarıyla yaptığı yer değiştirme reaksiyonudur. Magnezyum iyonları kalsiyum iyonlarıyla yaptığı yer değiştirme reaksiyonu sonucunda $MgSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 + Mg(OH)_2$ oluşan Mg(OH)₂ brisit adıyla bilinir. Çökelerek yüzeydeki gözenekleri tıkar ve koruyucu tabaka oluşturur. Bu tabaka genellikle suya gömülü bölgede görülür [24].

Sülfat çözeltileri betonarme çeliğini doğrudan paslandırmadığı halde, betonda sertleşmiş çimentoya etki ederek mevcut sülfatın yapısı ve çimento tipine göre iki tip reaksiyona neden olmaktadır: Birincisi sülfatlar çimento içerisinde alçı taşı oluşturmak için serbest kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmesidir, diğeri ise alçı taşı ve trikalsiyum alüminat ile birlikte trikalsiyum sülfaloüminat oluşturmaktadır. Diğer taraftan sülfat içeriği ortamda klorürlerin bulunduğu zaman ayrıca önem kazanmaktadır. Betonda klorürle birlikte bulunan sülfat iyonları, klorürleri bağlamada ve korozyon riski bakımından diğeri bir faktör olarak bilinmektedir. [23]. Yapının serpinti dalgalarına maruz kalan yüzeylerinde bu reaksiyonlar tekrarlanır ve kütle kaybı süreklilik kazanır. Bu kısımlarda yer değiştirme reaksiyonları betonun bağlayıcılık özelliğini etkiler ve beton kolay hasar görür. Deniz suyunun etkileri rüzgarla taşınarak iç bölgelerdeki yapılarda da gözlenmektedir. Deniz üstü (atmosfer) alanında tuza doymuş hava rüzgarla taşınarak karada klorların yoğunlaşmasına neden olur. Sonuç olarak klor betondaki çatlak ve geçirgen kısımlardan içeri girerek betonarme donatısına ulaşır ve donatı korozyonunu başlatır.

Korozyonun oluşumunda su, oksijen ve betonun elektriksel direnci önemli parametrelerdir. Bu direnci düşüren diğeri bir etken de deniz suyunun içerdiği klor iyonlarıdır. Donatı yüzeyine erişen klor iyonları betonun alkalın karakterini asite dönüştürmekte ve betonarme donatı yüzeyindeki koruyucu oksit tabakasını tahrip etmektedir. Deniz suyunun klorür nedeniyle oluşturduğu bu çok zararlı etki yapı tek başına korozyon nedeni olmamaktadır. Reaksiyonların oluşabilmesi için oksijen de gerekli olduğundan derin bölgelerde korozyon tehlikesi yoktur [25].

Atmosferdeki karbondioksit (CO_2) gazının bir kısmı suda çözünür dolayısıyla doğadaki tüm sular karbonik asit içerir ve yapı elemanı yüzeyinde suyun pH değerine göre hasara yol açar. Islanma-kuruma etkisi sonucunda, deniz suyu ile beton içine sızan tuzların suyun buharlaşmasıyla betondaki yoğunluğunun artması, tekrar ıslanma sonucunda tuzların suyla teması sonucu hacimlerinin artarak betonda genleşme yaratmaları ve hasar oluşturmaları gözlenir. Islanma-kuruma ve tuzların kristalizasyon basıncı etkileri sıçrama ve gel-git bölgesinde, dalgaların ve su içindeki yüzen cisimlerin aşındırıcı etkisiyle kendini gösterir. Üst gel git kısmı ve bunun

üstündeki dalga serpinti bölgesindeki betonda daha yüksek tuz miktarı görülmektedir. Deniz üstü yapılarda, kazık ve ayaklara çarpan dalgalar serpinti ile tabliye altında ve bağlantı kirişleri üzerinde tuz birikimine neden olurlar. Soğuk iklim bölgelerinde sıçrama ve gel-git bölgelerinde betonda aşınma ve tuz kristalizasyonunun yanı sıra donma- çözünme etkileri de betonda korozyona neden olmaktadır.

Tamamen su içerisinde deniz suyunun çimento hidratasyon ürünleri ile kimyasal reaksiyona girmesi nedeniyle yapıda bozulma ve dökülmeler görülür. Bu bölgede oksijen olmadığı için donatı korozyonu, donma çözülme olayı görülmez [26].

2.5. Betonarme Çeliği Korozyonu

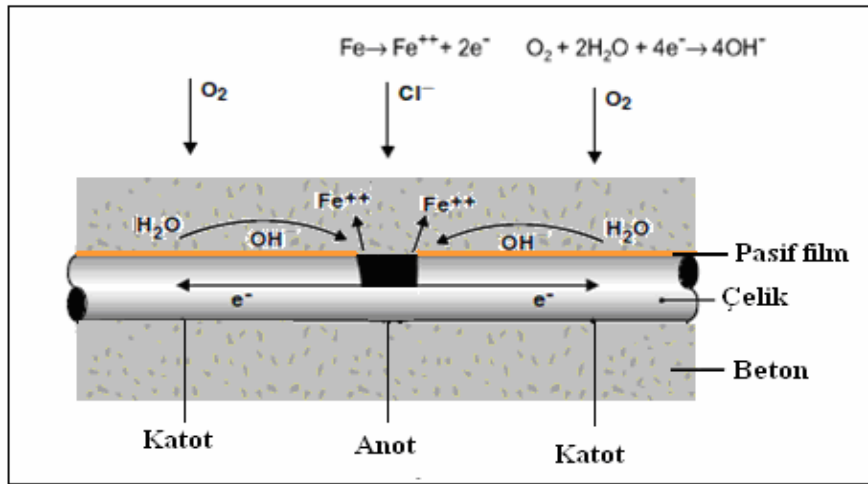
Beton korozif ortam etkilerine maruz kaldığında, ortamdaki çözeltilerle çimento hidratasyon ürünleri Ca(OH)_2 ile $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ arasındaki reaksiyonlar sonucu yeni bileşikler oluşur. Bu reaksiyon ürünleri hacim genişlemesi, yumuşama ve beton yapısının çözülmesine neden olur. Bunun sonucu olarak beton özelliklerinde çözeltilerin türüne, konsantrasyonuna, sıcaklığına ve etki süresine bağlı olarak olumsuz değişimler meydana gelir. Bu tip korozif problemleri en aza indirmek için alınacak önlemler; özel tip çimentolar ile beton üretmek, özel katkı maddeleri kullanmak veya her ikisini birlikte kullanarak beton üretmek şeklinde özetlenebilir. Çimentonun bir kısmı yerine puzolan ilave edilmesi, betonun plastikliğini artırır, su kuma ve çözülme olaylarını önler, hidratasyon ısını ve betonun geçirgenliğini azaltır [27].

Beton, normal halde betonarme demirleri için hem kimyasal hem de fiziksel olarak iyi bir koruyucu ortam oluşturur. Kimyasal koruma betonun yüksek alkali özellik göstermesinden ileri gelir. Beton pH derecesinin yüksek oluşu betonarme demiri yüzeylerinde pasif bir oksit filmi oluşmasına neden olmaktadır.

Bir elektrolit olarak betonun iyonik iletkenliği çok düşüktür. İletkenliğin düşük oluşu betonarme demirleri yüzeyinde korozyon hücrelerinin gelişmesini güçleştirici bir etki gösterir. Betonarme demirlerinin korozyonuna genellikle deniz suyu veya deniz

atmosferi etkisinde kalan beton yapılarda, klorür tuzlarının kullanıldığı bazı kimyasal fabrikalarda, karayolu köprüleri ve viyadüklerde rastlanmaktadır.

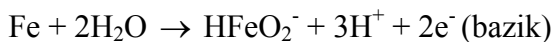
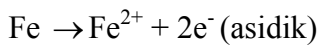
Beton içindeki donatının korozyonu Şekil 2.1’de görüldüğü gibi elektrokimyasal süreç ile açıklanabilir. Çelik yüzeyinde oluşan farklı elektrokimyasal potansiyele sahip anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin oluşturduğu elektrolit ile birleşir, donatının kendisi de elektronları ileten elektronik iletken görevini üstlenmektedir. Dış kaynaklı akımın olmadığı durumda elektrokimyasal reaksiyon için, elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyon ve korozyonun sürekliliği için açığa çıkan elektronların tüketildiği katodik reaksiyonun olması gerekir [28].

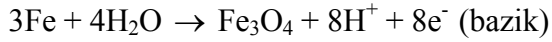
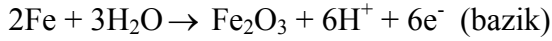


Şekil 2.1. Betonarme çeliğinin korozyon hücresi

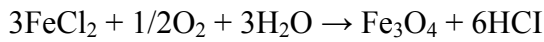
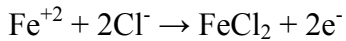
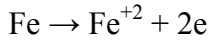
Beton içindeki demir sulu çözeltiler içindekine benzer şekilde korozyona uğrar. Demirin elektrolitik korozyonunda aşağıdaki reaksiyonda verildiği gibi anot bölgesinde demir 2 elektron alarak iyon haline geçer ve oluşan demir iyonları alkali ortamda demir hidroksit halinde çöker.

Anot reaksiyonları (Yükseltgenme)



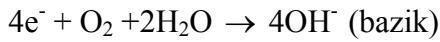
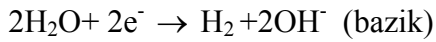
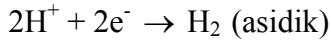


Eğer ortamda yeterli miktarda Cl^- iyonu varsa anot reaksiyonu

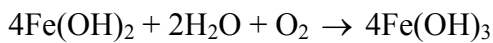
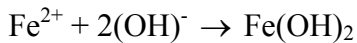


Reaksiyon yukarıda verildiği gibi yürümektedir. Reaksiyon sonunda serbest kalan Cl^- iyonu, anot reaksiyonunda kullanılarak, donatının pasifliğini bozar ve sürekli korozyona neden olur [30].

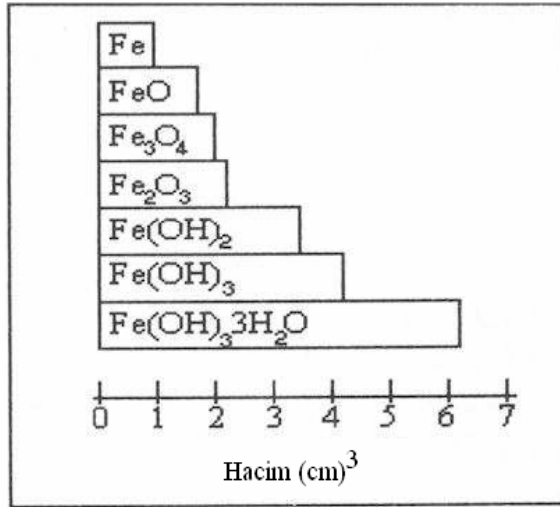
Katot reaksiyonları (İndirgenme)



Katotta açığa çıkan hidroksil, anotta açığa çıkan demir iyonları ile birleşerek ferrohidroksite, sonra daha kararlı haldeki ferrihidroksite dönüşür.



Demir, hidroksit olarak demir hidroksite dönüşürken bir hacim artışı olur. Ortamda demir hidroksit kolayca su alarak yine hacimce genişleyebilir. Bu reaksiyonlar sonucunda Şekil 2.2’de görüldüğü gibi ilk demir hacminin 6-7 katı bir hacim artışı olabilir Betonarme donatısını koruyan pas payı tabakası bu nedenle çatlayarak kopma ve parçalanmalara neden olabilir.



Şekil 2.2. Demir oksitlerinde meydana gelen hacim artışı

Paslanan çelikten ayrılarak beton içerisindeki boşluk hacmiyle sınırlı olan su içerisinde çözünen demir (Fe^{2+}) iyonları kütle, dolayısıyla kesit kaybına neden olur. Bunun yanında korozyon ürünü olan ve boşluklu yapısı nedeniyle daha fazla hacme sahip olan pasın birikmesiyle meydana gelen hacim artışının neden olduğu gerilme sonucu pas payında çatlama meydana gelebilir. Kısaca korozyon sonucunda dört önemli yapısal sorun ile karşılaşılabilir:

- i) donatı kesitinde azalma
- ii) donatı sünekliğinin azalması
- iii) paspayının çatlaması
- iv) çelik-beton aderansında zayıflama [29].

Betonarme elemanlarda donatının korozyonuna betonun dayanımı, geçirimsizliği, çimentonun türü ve dozajı, puzolan katkıları, betonun kuru, elemanın boyutları, biçimi, örtü betonunun pas payı kalınlığı, yapının ya da elemanın içinde yer aldığı ortamın nemi, sıcaklığı, su veya çözeltilerle teması, bu çözeltilerin iyon konsantrasyonu, sıcaklığı gibi çok sayıda faktör etki etmektedir [28].

Betonarme donatısının korozyonu için mutlaka oksijen ve su gerekmektedir. Beton içine oksijen girişi iki yolla olabilmektedir: Birincisi oksijen ile doymuş haldeki su

beton içine işlerken, oksijeni betonarme demirlerine kadar taşımaktadır. Bu olay periyodik olarak ıslanan ve kuruyan betonlarda etkili olarak yürümektedir. İkincisi atmosfer içindeki oksijen beton boşlukları içindeki suda çözünerek oradan betonarme donatısına kadar çözelti içinde difüzenmektedir. Beton boşlukları su ile dolu olduğu zaman atmosferden katot yüzeyine oksijen transferi genellikle bu ikinci yolla oldukça yavaş olarak gerçekleşebilir Difüzyon katsayısı betonun porozitesi ve su/çimento oranına bağlıdır [30].

Su/çimento oranı arttıkça betonun porozitesi artmakta ve buna paralel olarak oksijen difüzyon hızında yaklaşık iki kat artış olmaktadır. Bu durumda betonarme donatının korozyon hızında da iki kata varan artış beklenebilir. Beton kuru halde iken korozyon hücresi oluşamaz ve bu durumda betonarme demirleri pasif haldedir. Sürekli su altında kalan betonlarda da korozyon hızı son derece düşüktür. En şiddetli korozyon olayı, periyodik olarak ıslanan ve kuruyan betonlarda görülmektedir [30].

2.6. Betonarme Korozyonuna Etki Yapan Faktörler

2.6.1. Beton kalitesi

Beton içine gömülü çeliğin korozyonunda alınacak ilk önlem, kaliteli bir beton üretmektir. Donatı korozyonu bakımından kaliteli bir betonun göstergesi dayanıklılıktır. Dayanıklı bir beton, minimum boşluklu ve geçirimli, kimyasal etkilere çözülmeyen, aşınmayan bir betondur. Bütün bu nitelikler arasında geçirimsizlik özelliği, betonların dış etkilere karşı dayanımında en önemli rolü oynayan ve en çok sözü edilen özelliktir. Betonda geçirimlilik; basınçlı su geçirimliliği, kılcal su geçirimliliği ve buhar geçirimliliği olmak üzere üç farklı süreçle meydana gelmektedir [31].

Betonun permeabilitesi ve porozitesini azaltmak için agrega kalitesi ve granülometrisi uygun seçilmelidir. Çimento dozajı arttırıldığında beton yoğunluğu artar ve porozitesi azalır. Kullanılan çimento cinsi de önemlidir. Puzolanlı çimentolar beton boşluklarında bulunan serbest kireci silikat bileşikleri halinde bağlayarak beton

boşluklarını doldurur. Böylece beton permeabilitesinde azalma meydana gelmektedir. Ancak puzolanların bu etkisi uzun süre içinde ortaya çıkmaktadır [1].

Beton karışımı içine özel katkı maddeleri ilave edilerek su/çimento oranı ve porozitesi düşük beton üretilmektedir. Çimentonun hidratasyonu için kimyasal olarak gerekli su miktarı % 30'dan daha azdır. Uygulamada bu oran genellikle %40-60 arasında alınmaktadır. Ayrıca betonun içine hava sürükleyici katkı maddeleri ilave edilerek beton içindeki boşlukların kapalı hücreler halinde oluşması sağlanabilir. Bu şekilde beton permeabilitesinin zararlı etkileri büyük ölçüde önlenmiş olmaktadır [1].

İyi bir beton taze halde iken, kolay taşınabilmeli, yerleştirilebilmeli, sıkıştırılabilmeli ve bu işlemler sırasında agrega taneleri ayrışmamalıdır. Sertleşmiş halde ise betonun mekanik dayanımı yeterince yüksek olmalıdır. Bunlarla birlikte hava etkisine, kimyasal etkilere ve aşınma etkisine karşı dayanıklı olmalıdır. Ayrıca ekonomik olmalı; yani malzeme, üretim, döküm, kalıplama, bakım masrafları az olmalıdır. Bunların yanında malzeme cinsi ve karışım oranları iyi seçilmelidir. İşlenebilme; minimum enerji, homojenliğin korunması, boşluksuz yerleşme ve kıvam kavramlarını içermektedir. İşlenebilirlik ise, betonun ayrışmadan yerleştirilip sıkıştırılarak istenen görünüşe sahip olabilmesidir. İşlenebilir betonun niteliklerinin başında kohezyon gelir. Kohezyonu iyi olan taze betonun içindeki iri agrega taneleri karıştırma, taşıma ve yerleştirme işlemleri sırasında kütleden ayrılmazlar. Böyle betonun bünyesi homojen olamaz, iri agregalar bir yanda harç bir yanda birikir. Buda betonun dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir [1].

Betonun en önemli mekanik özelliklerinden birisi basınç dayanımıdır. Betonun basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise düşüktür. Betonun çekme gerilmesinin hiç olmadığı, hemen çatladığı varsayılır ve beton sadece basınca çalıştırılır. Betonun basınç dayanımı, betonun diğer nitelikleriyle paralellik göstermektedir. Yüksek basınç dayanımlı bir betonun, kompasitesi yüksek, su geçirgenliği çok az, dış etkilere karşı dayanıklı olmaktadır [32].

Betonun dayanıklılık problemleri genelde betonun geçirimsizliği ile başlar. Betonun geçirimsiz olması durumunda, birçok dayanıklılık problemine yol açan su ve zararlı sıvılar beton içerisine giremez. Dayanıklı bir betondan, iklim şartlarına, kimyasallara, ıslanma-kurumaya, ateşe ve aşınmaya karşı yeterli derecede dayanıklılık göstermesi beklenilmektedir.. Beton, uygun karışım oranlarında, gereken şekilde karıştırılır ve yerleştirilirse, deniz suyunun çeşitli etkilerine karşı istenen sürede dayanıklılık kazanabilir. Bu etkiler arasında ıslanma-kuruma, sülfat etkisi, ısı değişimleri, donma-çözülme, betonarme demirlerinin paslanması, dalgaların dinamik etkileri sayılabilir [24].

Devamlı deniz seviyesi altında kalan beton, sık sık ıslanıp kuruyan deniz seviyesi üstündeki betonlara göre daha az etkilenmektedir. Sıcak, tropik iklimlerde betondaki deniz suyu etkileri, ılıman iklimlere göre daha şiddetli olur. Betona gelecek zararlar, deniz suyu beton içine sızdığı zaman olduğu için betonun geçirimsiz olması çok önemlidir [23].

Deniz suyu ile temas eden betonlara sülfat önemli derecede zarar vermektedir. Deniz suyunda mevcut olan bir başka kimyasal etki ise magnezyum iyon bileşikleridir. Magnezyum iyon bileşikleri betonun ıslanma-kuruması sırasında daha çabuk etkisini gösterir. Ayrıca agrega alkalileri de betonun deniz suyuyla temasında etkili rol oynamaktadır. [31].

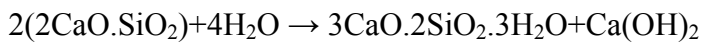
Deniz yapılarında genellikle s/ç oranı 0,45 ve çimento miktarı ise 300-400 kg/m³ arasında olmalıdır. Deniz yapılarında kullanılan betonlarda agregaların büzölmeye şişmeye ve alkali agrega özelliklerine dikkat edilmelidir. Ayrıca çimentonun trikalsiyum alüminat oranı da düşük olmalıdır. Taze betonun sıkıştırılmasında ayrışmaya neden olmadan mutlaka vibrasyon kullanılmalıdır. Kullanılacak betonda donatı var ise pas payı önemli ölçüde yüksek tutulmalıdır. Beton kesitinin mümkün olduğunca büyük olmasına dikkat edilmelidir. Beton içindeki demir donatıların korozyondan etkilenmemesi için mutlaka koruyucu önlem alınmalıdır [31].

Beton dökümünden sonraki ilk günlerde, betonun içinde bulunduğu ortamın sıcaklığı ve bağıl nemi beton kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Dökümden sonra sıcak ve kuru ortamlarda bekletilen betonlar uygun şekilde kristalleşemedikleri için boşluk yüzdelерinde artış meydana gelmektedir [33].

Elektrokimyasal açıdan ise, beton neminin korozyon üzerine iki şekilde etki yaptığı görülmektedir. Birincisi, su korozyon hücrelerinin elektroliti olarak gereklidir. İkinci etki ise, betonun elektriksel direncini azaltıcı olarak rol oynamaktadır. S/ç oranı 0,40 ve 0,70 olan betonların su ile doygunluk derecesi arttıkça rezistivitelerinin büyük ölçüde azalmaktadır. Doygun rutubetli bir betonun rezistivitesi 7.000 ohm.cm civarında olduğu halde bu değer kuru halde bulunan bir betonda 10^6 ohm.cm'ye kadar çıkmaktadır. Beton rezistivitesi 50.000 ohm.cm'den daha yüksek olması halinde korozyon hızı uygulamada önemsiz dereceye düşmektedir. Bu koşullarda beton içinde klorür bulursa da betonarme demirlerinde etkili bir korozyon meydana gelmez [30].

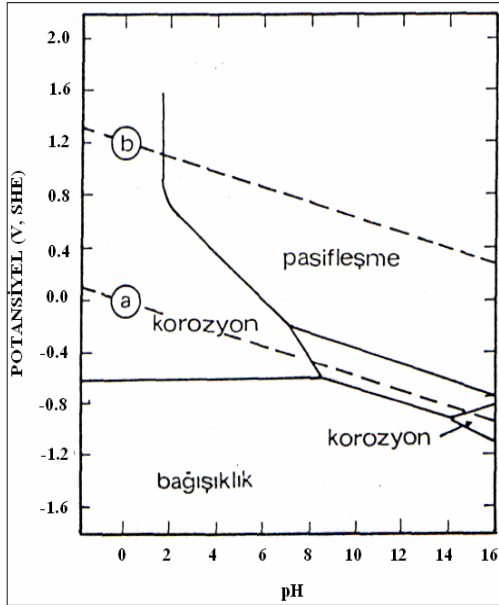
2.6.2. pH etkisi

Portland çimentosu ile üretilmiş bir betonun boşluklarında bulunan su doygun kireç çözeltisi halinde olup, içinde az miktarda ham maddeden kaynaklanan alkali oksitleri (Na_2O ve K_2O) bulunmaktadır ve yüksek alkali özelliğindedir. Taze betonun pH değeri 12,5-13,2 değerleri arasındadır. Betondaki yüksek alkalinite Portland çimentosundaki C_3S ve C_2S ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksitler tarafından sağlanmaktadır. C_3S ve C_2S ' nin su içindeki hidratasyon reaksiyonları aşağıda verilmiştir [34].



Bu reaksiyonlar sonucu açığa çıkan kalsiyum hidroksit beton boşluk suyu içinde çözünerek doygun çözelti haline gelir ve taze betonun pH derecesini 12'ye kadar

çıkartır. Bu pH ortamında çelik pasif halde bulunur. pH değerinin 4,5'den düşük olmasının betona şiddetli kimyasal etki yaptığı bilinmektedir. Sulu çözeltiler içinde çeliğin aktif veya pasif halde olduğu Şekil 2.3'de görüldüğü gibi Pourbaix diyagramlarından anlaşılabilir [30].

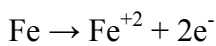


Şekil 2.3. Demir-su sistemi için potansiyel-pH diyagramı [35]

Bu diyagramda çözelti pH değerinin $9 < \text{pH} < 13$ aralığında olması halinde demirin pasif halde olacağı görülmektedir. Çözelti içinde klorür iyonu bulunması halinde durum biraz farklıdır. Diyagramda başlıca üç bölge mevcuttur:

1. Korozyon Bölgeleri: Diyagramda iki korozyon bölgesi bulunmaktadır.

a) pH'nın 9'dan küçük, elektrot potansiyelinin $-0,65 \text{ V (SHE)}$ 'dan daha pozitif olduğu bölgede reaksiyonlar aşağıda verildiği gibi olmaktadır.



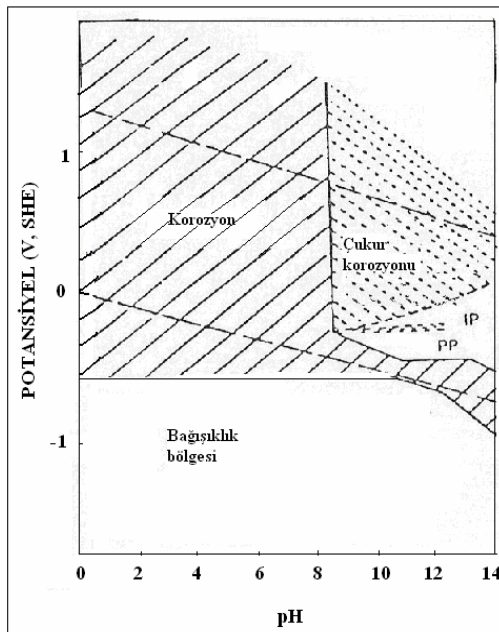
b) pH değerinin 14'den büyük ve elektrot potansiyelinin $-0,8$ ile $-1,2 \text{ V (SHE)}$ arasında olduğu bölgede reaksiyonlar aşağıda verildiği gibi gerçekleşmektedir.



2. Bağımsızlık Bölgesi: Demir elektrot potansiyelinin -0,65 V (SHE)'dan daha negatif olduğu bölgedir. Bu bölgede demir korozyona uğramaz ve pH'dan bağımsızdır. Bu durum, katodik koruma yöntemiyle korozyonu önlemenin temel ilkesini oluşturur.

3. Pasiflik Bölgesi: Bu bölgede, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ oluşumuyla metal yüzeyinde bir oksit film oluşur. Oluşan bu film, metal ile elektrolit arasındaki teması keserek, korozyon reaksiyonunu durdurur. Ancak herhangi bir sebeple, bu film kırılırsa korozyon yeniden başlar. Bu nedenle pasif hal korozyonu önlemede kesin bir çözüm değildir [36].

Şekil 2.4'de görüldüğü gibi klorür iyonlarının etkisi ile korozyon bölgesi genişlemiştir. Diğer taraftan, potansiyelin yüksek olduğu bölgelerde pasiflik bozulmuş ve çukur korozyonu başlamıştır. Klorürlü ortamlarda demir çok dar bir potansiyel aralığında pasif halde bulunmaktadır. Bu bölge içinde pasif tabakanın koruyucu özelliği yeterli değildir [30].

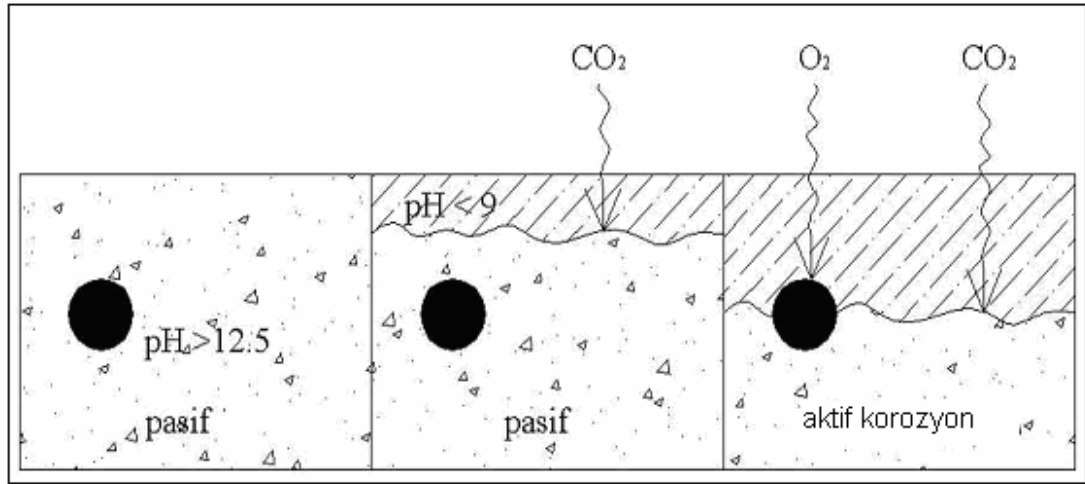


Şekil 2.4. Demir-su-klorür çözeltisi için potansiyel - pH diyagramı [37].

2.6.3. CO₂ etkisi

Fizikokimyasal bir süreç olan karbonatlaşma ise ortamın alkalinitesini düşürerek koruyucu oksit tabakasının tahrip olmasına neden olur. Betonun alkalinitesi, hidrate olmuş çimentonun içerdiği Ca(OH)_2 ile sağlanır ve pH 12 civarındadır. Ancak Ca(OH)_2 zamanla havadaki CO_2 ile reaksiyona girerek CaCO_3 'e dönüşür ve pH 8'in altına düşebilir. CO_2 konsantrasyonu arttıkça karbonatlaşma miktarı artmaktadır. Betonarme donatı üzerinde oluşan pasif tabaka, betonda karbonizasyon ve klor saldırısı sonucunda korunamaz ve donatı korozyonu ortaya çıkar [23].

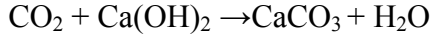
Şekil 2.5'de betonun karbonatlaşması ile karbonatlaşan bölgedeki donatının korozyona açık hale geldiği görülmektedir. Donatının korozyonu ise beton ile donatı arasındaki aderansın zayıflamasına betonun dayanımının düşmesine neden olmaktadır [38,39].



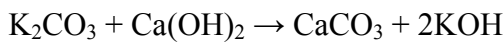
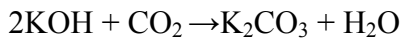
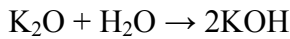
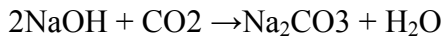
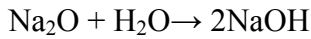
Şekil 2.5. Karbonatlaşma ve korozyon arasındaki ilişki [39].

Çimentolar hem bileşimleri hem de betondaki dozajı açısından karbonatlaşmayı etkiler. CaO çimento içerisinde %60-67 gibi bir yüzdeyle en fazla bileşim olma özelliğindedir. Özellikle bu bileşimin hidratasyonu sırasında oluşan Ca(OH)_2 , karbondioksitin etkisi ile karbonatlaşacağı için kireç yüzdesi fazla olan çimentolarda karbonatlaşma daha fazla gerçekleşir. Ana bileşenlerin (C_3S ve C_2S) her biri su ile

ayrı ayrı reaksiyona girmelerinin ardından karbonatlaşma olayı aşağıdaki reaksiyonda verildiği gibi meydana gelir.



Kirecin dışında bir de karbonatlaşma olayını az miktarda bile olsa etkileyen ve çimento içerisinde %0,2-1,3 oranında bulunan alkaliler Na_2O (sodyum oksit) ve K_2O (potasyum oksit) vardır. Çimentoda %0,2-1,3 arasında bulunan bu iki bileşim su ile reaksiyona girerek ilk önce sodyum hidroksit ile potasyum hidroksit iyonlarını ve ardından havadaki CO_2 ile birleşerek çok kolay çözülebilen potasyum karbonat ile sodyum karbonatı meydana getirirler. Kolay çözülebilen bu iki madde rutubetin durumuna göre çimento pastasındaki serbest kireç ile birleşerek son olarak zor çözülebilen kalsiyum karbonatın oluşmasına sebep olurlar. Bu olaylar sırasında oluşan reaksiyonlar aşağıda verilmiştir [40,41].



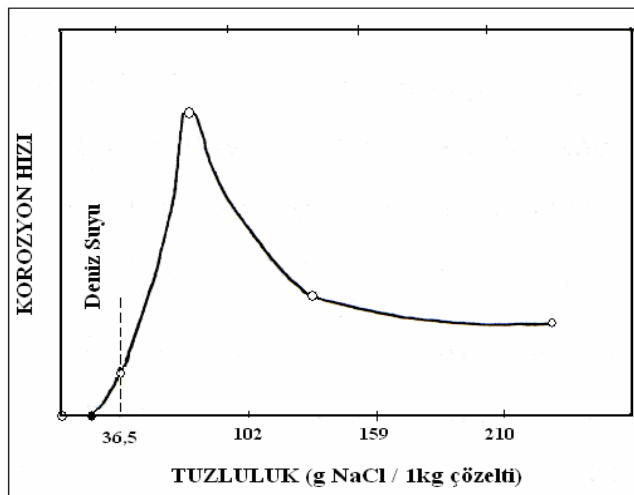
2.6.4. Klorür etkisi

Klorür iyonlarının zararlı etkisi ancak beton içinde % 0,2 'den fazla ($4,5 \text{ kg } [\text{Cl}^-]/\text{m}^3$) klorür bulunması halinde söz konusu olabilir. Korozyon için zararlı sayılan bu klorür konsantrasyonu sınır değeri tartışmalıdır. Literatürde farklı sınır değerleri verilmektedir. Bunun nedeni betonarme donatı korozyonunun yalnız klorür konsantrasyonuna bağlı olmayıp, betonun rutubetine ve pH derecesine de bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Bir çok araştırmacı yalnız klorür limitinin değil $[\text{Cl}^-] / [\text{OH}^-]$ oranının verilmesinin daha doğru olacağını ileri sürmektedir [42].

Betona klorürlerin etkisi başlıca CaCl_2 gibi priz-hızlandırıcı katkıları, beton yapımında kullanılan deniz kumundan veya tuzlu ortamdan elde edilmiş olan agregalar, çimento, kışın betonun üzerindeki buzlanmanın çözülmesi için kullanılan sodyum klorür, kalsiyum klorür gibi tuzlar ve deniz suyu kaynaklı olmaktadır [43].

Karma suyunda toplam Cl^- iyonlarının 500 ppm'i geçmedikçe zararlı etkisi olmadığı belirtilmektedir. Klorür tuzları çimento içindeki bileşenlerle etkileşerek büyük hacimli tuzları meydana getirir. Klorür tuzunun cinsine göre bu ürünler değişmektedir. Kalsiyum klorür su içinde az miktarda bulunursa prizi çabuklaştırmak suretiyle mukavemet artışını hızlandırır. Fakat kalsiyum klorür miktarı fazla olan sular çimentolar için zararlıdır. Magnezyum klorürün su içindeki konsantrasyonu % 5 -15 arasında olduğunda betonu tahrip etmektedir [44].

Çözelti içinde tuz konsantrasyonu arttıkça, korozyon hızı artar. Bu artış NaCl konsantrasyonu 75 g NaCl/kg çözelti değerinde maksimuma ulaşır ve bu değerden sonra tuz konsantrasyonu arttığı halde Şekil 2.6'da görüldüğü gibi korozyon hızı azalmaktadır. Bunun nedeni tuz konsantrasyonunun fazla olması durumunda oksijen çözünürlüğünün azalmasıdır, çözelti içinde yeteri miktarda oksijenin bulunmaması korozyon hızını düşürmektedir. [30].



Şekil 2.6. Sodyum klorürün korozyon hızına etkisi [45]

Beton içinde bulunan klorür iyonlarının pasifliği bozucu etkisi, klorür iyonlarının elektronegativitesi yüksek bir iyon oluşuyla açıklanabilir. Bu nedenle metal yüzeyinde oksijen ve hidroksit iyonlarından daha sağlam şekilde adsorbe edilir. Adsorbe olan bu klorür iyonları korozyon sonucu oluşan demir iyonları ile birleşerek demir klorür halinde çözeltiye geçer. Böylece metal yüzeyinde $\text{Fe}(\text{OH})_2$ çökmesi ve pasif filmin oluşması önlenmiş olur. Bu bölgede korozyon olayı artık oto katalitik olarak devam eder. Çünkü çözelti içine giren demir klorür su ve oksijenle birleşerek pası oluştururken, klorür iyonu yeniden çözelti içine karışır. Aşağıda reaksiyonlarda verildiği gibi klorür iyonu doğrudan korozyon yaratmaz fakat bir katalizör gibi korozyon olayının hızını artırıcı olarak rol oynamaktadır [46,47].

Çukurcuk korozyonu genellikle klor iyonları içeren nötr ortamlarda görülür. Sodyum klorür ve oksijen bakımından zengin olan deniz suyu çukurcuk korozyonu için en uygun ortamı oluşturur. Örneğin; deniz suyuna bırakılan paslanmaz çelikler kısa zamanda çukurcuk korozyonuna uğramaktadır. Ortamın durgun olması çukurcuk korozyonunu hızlandırırken, hareketli olması korozyonu yavaşlatır [36].

2.6.5. Nem etkisi

Korozyon olayının gerçekleşmesi için ortamda suyun bulunması gereklidir. Su beton içine girerken, genellikle beraberinde korozif etkenleri de taşır. Klorür iyonu beton bünyesine su ile birlikte girmektedir. Beton nemi, beton içine oksijen difüzyonu açısından son derece önemlidir. Betonun doygun nemli olması halinde, beton içine oksijen ve karbondioksit girmesi son derece güçleşmektedir.

Beton nemi, betonun elektriksel iletkenliği açısından da önemli olmaktadır. Beton direnci, başlangıçta çok düşüktür. Ancak, beton zamanla kurudukça beton direnci artar. Beton direncinin 50.000-70.000 ohm.cm'den büyük olduğu durumlarda, betonarme donatının korozyonu ihmal edilecek kadar azdır. Yapılan son çalışmalar, beton direncinin 100.000 ohm.cm'den büyük olduğu durumlarda klorür ve oksijen olmasına rağmen korozyon hızının çok düşük olduğunu göstermiştir [30].

2.6.6. Oksijen difüzyonunun etkisi

Beton içindeki çeliğin korozyonu, katotda oksijen indirgenmesi reaksiyonu ile yürümektedir. Bu nedenle korozyon hızı, beton içine difüzlener oksijen hızına bağılıdır. Beton bünyesine oksijen girişı engellenebilirse, korozyon önlenebilir [48].

Betonarme donatının farklı miktarda hava alması durumunda, az hava alan bölgeler anot, çok hava alan bölgeler katot olur. Bu durumda şiddetli derecede korozyon gerçekleşir. Beton içine oksijen difüzyonu kuru betonlarda daha hızlıdır. Oksijen, beton içinde suda çözünmüş halde bulunur [49].

2.7. Korozyon Çeşitleri

Farklı ortamlarda, değişik etki ve mekanizmalar sonucu oluşan on dört ayrı korozyon türü bilinmektedir ancak burada betonarme korozyonu ile ilgili olarak genel korozyon, galvanik korozyon ve çukur korozyonu anlatılmıştır.

2.7.1. Genel korozyon

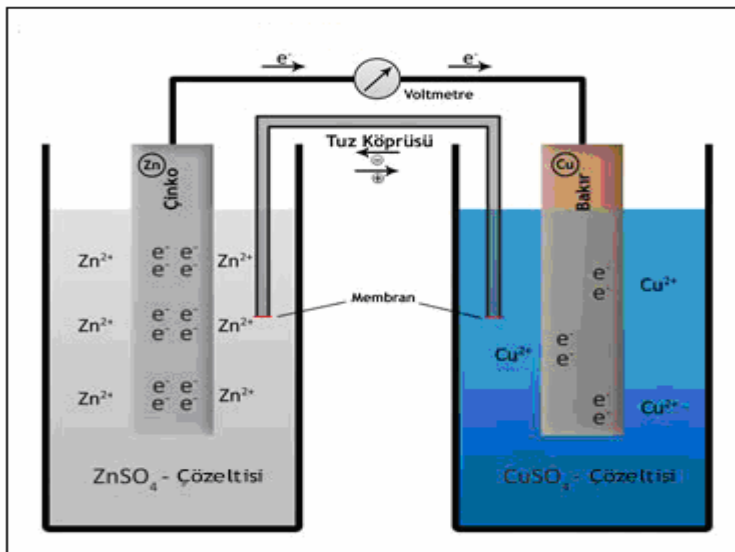
Metal yüzeyinin her noktasında aynı hızla yürüyen korozyon türüdür. Normal olarak korozyon olayının bu şekilde yürümesi beklenir. Eşit dağılımın başlıca nedeni anodik ve katodik alanların devamlı yer değiştirmesidir. Genel korozyon (üniform korozyon) bütün yüzeye dağılmış mikro korozyon hücreleri yolu ile gerçekleşir. Korozyon sonucu metal kalınlığı her noktada aynı miktarda azalır. Genel korozyon hızı, birim zamanda birim yüzey alanına düşen ağırlık kaybı olarak ($\text{mg/dm}^2\cdot\text{gün}$) veya ortalama kalınlık azalması (mm/yıl) olarak ifade edilebilir. Korozyon hızının hesaplanmasında kullanılan bağıntılar, korozyonun üniform şekilde yürüdüğü kabulüne dayandırılır. Genel korozyon dışında diğer korozyon çeşitlerinde yüzeyin bazı bölgelerinde korozyon hızı çok yüksek değerlere ulaşır. Bunu sonucunda o bölgeler beklenenden çok önce korozyon nedeni zarar görür [50].

2.7.2. Galvanik korozyon

Korozif veya iletken bir ortama birbirine benzemeyen iki metal daldırılırsa aralarında bir potansiyel farkı etkisiyle galvanik birim oluşmaktadır. Bu iki metal birbirlerine bir iletkenle bağlandıklarında veya birbirilerine temas ettirildiklerinde oluşan potansiyel farkı nedeni ile elektronlar birinden diğerine doğru akar. Potansiyel farkı düşük olan metal elektrolit içerisinde çözünerek korozyon süreci başlamaktadır.

Metallerin standart elektrot potansiyellerinin indirgenme potansiyelleri cinsinden ifade edilerek dizilmesi ile elde edilen seriye elektrokimyasal seri denir. Standart elektrot potansiyeli (indirgenme potansiyeli) değeri yüksek olan metaller soy, düşük metaller aktif metallerdir. Çelik galvanik birim etkisi ile katodik koruma altına altına alındığında kendisinden daha düşük elektrot potansiyeline sahip olan magnezyum anot olarak kullanılmaktadır. Korozyon hızı, anot ve katot bölgeleri arasındaki potansiyel farkı ve devrenin toplam direncine bağlıdır [51].

Şekil 2.7’de çinko ve bakırdan oluşan galvanik hücre görülmektedir. Çinkonun elektrot potansiyeli, bakırdan düşük olduğu için çinko anot olarak davranmaktadır.



Şekil 2.7. Çinko ve bakırdan oluşan galvanik hücre[52].

Galvanik korozyonun etkili olması aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

Çevrenin koroziflik derecesi: Metallerin içinde bulunduğu çevrenin korozif özelliği ne kadar fazla ise galvanik etki daha şiddetli olmaktadır. Bu durum atmosferik korozyonda daha belirgindir. Deniz atmosferinde ise galvanik etki daha hızlı bir korozyona neden olur. Kuru bir atmosfer söz konusu ise galvanik korozyon olmaz.

Metaller arası mesafe: Galvanik korozyon, iki metalin birbirine bağlandığı noktada en şiddetli olarak kendini göstermektedir. Mesafenin etkisi çözeltinin iletkenliğine bağlıdır. Elektrolit direnci fazla ise korozyon olayı hemen bağlantı yakınında oyuk şeklinde kendini gösterir. Çözelti iletkenliği yüksek ise korozyon olayı daha geniş bir alana dağılacaktır.

Katot / anot yüzey oranı: Küçük bir anot ile büyük bir katotta oluşan galvanik bir hücrede anot kısa sürede yıpranmaktadır. Katot /anot oranının büyük olması anot akım yoğunluğunun büyümesine ve küçük bir bölgede fazla miktarda madde kaybına neden olmaktadır. Örneğin bakır plakaları çelik perçin ile tutturulduğunda, çelik perçinler kısa sürede parçalanır. Kaplama yapılmış bir malzemede, kaplamanın ufak bir hasar görmesi durumunda büyük katot- küçük anot etkisi görülür ve kaplamanın hasar gördüğü yerde malzeme delinme derecesine kadar gelebilmektedir [8].

Galvanik korozyonu azaltmak için yapılan uygulamalar aşağıdaki gibi gruplandırabilir:

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

2.7.3. Çukur korozyonu (Lokalize korozyon)

Metal yüzeyinde, çeşitli noktalarda başlayan korozyon olayının mikro çukurlar haline gelmesi ve gittikçe büyümesi olayıdır. Malzeme kaybı az ancak hızlı ilerleyen bir korozyon türüdür. Korozyonun çok dar bölgelerde yoğunlaşması sonucu malzeme yüzeyinde oluşan çukurcukların morfolojisi metal veya alaşımın cinsine göre değişmektedir [53].

Çukur korozyonuna etki eden başlıca nedenler aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

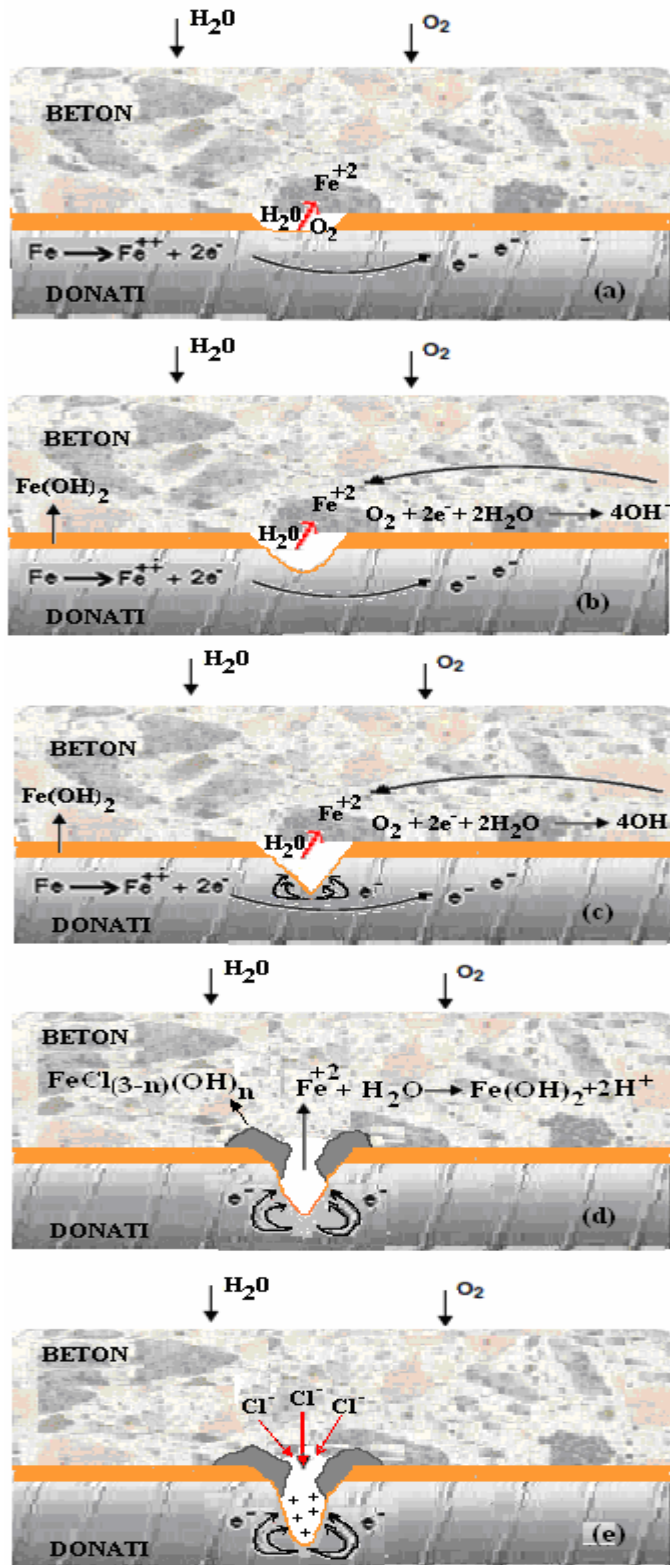
Metalürjik farklılık: Bazı metaller özellikle pasifleşebilen metaller çukur korozyonuna dayanıksızdır. Örneğin paslanmaz çelikler, normal çeliklere göre çukur korozyonuna daha az dayanıklıdır.

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

Çözelti hızının azalması: Çukur korozyonu genelde durgun bölgelerde etkili olur. Eğer çözelti hızı fazla ise çukur korozyonu gelişme ortamı bulamaz [54,55].

Beton içindeki çeliğin korozyonundan elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlar sorumludur. Çimentonun su ile jelleşme reaksiyonu sonucunda oluşan çimento hidratları ve tuzlar, donatı çeliği için korozif ortamdır. Donatı çeliği üzerinde oluşan anot ve katot yerleri, temas ettikleri iletken korozif ortam ile beraber çelik üzerinde birçok mikro korozyon hücresi oluştururlar. Bu mikro korozyon hücreleri, çelik üzerindeki çukurların oluşmaya başladığı yerlerdir. Mikro anot ve katot yerleri arasındaki potansiyel farklarının artması, çukurların derinleşme eğilimindeki artışlara işaret eder.

Betonarme çeliğinin beton ile temas ettiği bölgelerde lokal anot ve katot yerlerindeki korozyon mekanizması tarafımızdan Şekil 2.8’de verildiği gibi önerilebilir:



Şekil 2.8. Betonarme çeliği korozyonunun şematik anlatımı ve çukur korozyonu oluşumu

Lokal anot ve katot yerleri O_2 miktarlarındaki konsantrasyon farkı ile (oksijen konsantrasyon pili) oluşur. Anodik tepkimeler beton boşlukları ile temas eden oksijence fakir mikro anot yerlerinde yürürken, indirgenme reaksiyonu boşluk-beton ara yüzeyinin çelik ile temas ettiği oksijence zengin mikro katot yerlerinde meydana gelir.

Anot bölgesinde demirin elektron kaybetmesi ile oluşan Fe^{2+} iyonları OH^- iyonları ile birleşerek ve/veya su ile hidroliz olarak oyuk kenarlarında oksit filmi parçacıklarını oluşturur. Yüzeydeki oksit filmi parçacıklarının dağılımı, çelik çevresindeki boşluk dağılımına bağlı olarak değişir. Mikro anot ve katot yerleri belirginleştikçe bu bölgeler arasındaki potansiyel ve pH farkı da artar. Donatı yüzeyindeki mikro pH değişimleri de farklı reaksiyonlara izin verir. Anot yerlerindeki pH artışı, burada biriken oksitin çözünürlüğünü artırır.

Yüzeyde yer yer oluşan küçük pas birikimleri (korozyon direnci daha yüksek lokal bölgeler), demiri daha fazla korozyondan bir ölçüde korumaktadır. Fakat sulu ortamlarda bulunan klorür iyonlarının aşağıdaki reaksiyonlarda verildiği gibi lokal anot yerlerinde büyüyen oksit filmine karşı gösterdiği seçimli yönlenme sonucu (seçimli adsorpsiyon) çukur içlerinde pH'nın giderek azalması, çözünen Fe^{3+} iyonlarının katalitik etkisi beraberce oksit filminin çözünürlüğünü artırarak lokal anotlaşmanın (çeliğin potansiyelinin negatif değer alması) yani lokalize korozyonun sürekliliğini sağlar. Oksit filminin korunmasının bozulmadığı bölge ise katot durumundadır.

Demirin oksitlenmesi ile oluşan Fe^{2+} iyonları boşluklardaki O_2 ile tekrar oksitlenerek korozif Fe^{3+} iyonlarını tekrar oluşturur. Bu olay reaksiyonun otokatalitik artışına önemli katkıda bulunur ve yüzeyde lokalize korozyon artar. Reaksiyon süresi boyunca katot yerlerinde oluşan oksit filmi kalınlaşıp, katodik reaksiyonlara karşı dirençli bölgeler oluşturur. Bu durumda, indirgenme reaksiyonları, iletkenliğin daha yüksek olduğu anodik oyuklar içinden devam eder.

Bütün bunların sonucunda, katot yerlerinde oksit oluşumu ve anot yerlerinde oyulmaların otokatalitik hızı daha da artar. Yüzeyde elektronik iletkenlikleri ve çözünürlükleri farklı olan farklı türde oksitlerin bir arada bulunması da lokalize korozyonu artıran bir diğer etkidir.

2.8. Korozyona Karşı Alınacak Önlemler

Betonarme demirlerinin korozyonuna neden olan bileşenler beton içine dışarıdan gelmektedir. Porozitesi ve permeabilitesi düşük bir beton üretilerek betonarme demirlerinin korozyonu büyük ölçüde azaltılabilir. Ayrıca beton çevresinden izole edilerek zararlı bileşenlerin özellikle klorür ve oksijenin beton içine difüzyonu tam olarak önlenabilir. Bu amaçla beton yüzeyleri geçirimsiz bir malzeme ile kaplanır veya boyanır. Beton permeabilitesini azaltmak veya beton yüzeylerini geçirimsiz hale getirmek için uygulamada çeşitli önlemler alınmaktadır.

2.8.1. Beton permeabilitesinin azaltılması

Betonun geçirgenliği, beton içerisindeki boşluklar ile çimento hamuru ve agrega ara yüzeyindeki mikro çatlakların bir fonksiyonudur. Betonun iç yapısında büyüklü küçüklü, sürekli veya süreksiz boşluklar bulunur. Boşlukların özellikle büyük ve sürekli olanları malzeme içerisinden sıvı ve gazların geçmesine, dış yüzeyleri tarafından gaz ve sıvıların emilmesine neden olurlar. Malzeme içerisindeki boşluk yapısı düzensiz ve çok karışık olduğundan tam bir sınıflandırma yapmak zordur, ancak boşlukları genel olarak sürekli ve süreksiz boşluklar olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür. Bu boşluk sistemlerinin sürekli ve büyük olması betonun permeabilitesi, basınç dayanımı ve durabilitesi bakımından önemlidir.

Betonda ayrıca rötrenin neden olduğu çatlak ve boşluklar da bulunur. Hidratasyon ilerledikçe çimento ve suyun mutlak hacmi kademeli olarak azalır. Hidratasyon sonunda herhangi bir su/çimento oranına sahip çimento hamuru, taze çimento hamurunun başlangıçta doldurduğu hacmi tamamen doldurmaz, rötne çatlakları oluşur [56,67].

Yapı sistemlerine etki yönünden en tehlikeli suların saf sular, sülfat, klorür, nitrat gibi anorganik asitlerin tuzlarını içeren çözeltiler, asetik asit, laktik asit gibi organik asitli çözeltiler sayılabilir. Bu sulardan etkilenen beton yapılarda zamanın bir fonksiyonu olarak korozyondan söz edilmektedir. Beton koroziif ortam etkilerine altında kaldığında, ortamdaki çözeltilerle çimento hidratasyon ürünleri Ca(OH)_2 ile $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ arasındaki reaksiyonlar sonucu yeni bileşikler oluşur. Bu reaksiyon ürünleri hacim genişmesi ve beton yapısının çözülmesine neden olur. Bunun sonucu olarak beton özelliklerinde çözeltinin türüne, konsantrasyonuna, sıcaklığına ve etki süresine bağlı olarak olumsuz değişimler meydana gelir. Bu tip koroziif problemleri en aza indirmek için alınacak önlemler; özel tip çimentolar ile beton üretmek, özel katkı maddeleri kullanmak veya her ikisini birlikte kullanarak beton üretmek şeklinde özetlenebilir. Puzolanlı çimentolar da betonla ilgili bu tür sorunlara belirli oranda çözüm getirmektedir. Puzolanın agresif ortamda daha dayanıklı oluşu; Ca(OH)_2 'in azalmış olması, ürünün düşük geçirgenliği, çimento jelinin farklı kompozisyonu, puzolanlı çimentoda oluşan etrenjitin kararsızlığı ile açıklanabilir [5].

Puzolanlar, kimyasal olarak çok miktarda aktif SiO_2 ve az miktarda Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO gibi oksitler içeren maddelerdir. Puzolanlar, çimentonun suya karşı dayanıklılığını olumlu yönde etkiler. Çimentonun içerisine belirli miktarda puzolan ilave edilmesi, betonun plastikliğini artırır, su kuma ve çözülme olaylarını önler, hidratasyon ısısını ve betonun geçirgenliğini azaltır [58].

Bir betonarme yapıdan beklenen; dayanım, durabilite (dayanıklılık), ekonomi, fonksiyon ve estetiğin sağlanmasıdır. Betonarme yapılar zaman içinde değişik nedenlerle hasar görmekte ve yıpranmaktadır. Beton içindeki çelik donatının korozyonu sonucu betonda çatlak ve bozulmalar oluşabilir. Soğuk iklimlerde ise donma-çözülme etkisi altında benzer bozulmalar ortaya çıkabilir. Bunların dışında, farklı durabilite problemleri nedeni ile betonda sorunlar oluşabilir. Betonarme yapıların tasarımında önceliğin dayanımdan çok durabiliteye göre yapılması anlayışı günümüzde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle donatı korozyonuna bağlı çatlakların betonarme yapının durabilitesini olumsuz biçimde etkilediği ve performansını azalttığı bilinmektedir [2].

Maksimum s/ç oranı ile minimum çimento içeriğindeki sınırlamalar betonun dayanım ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkiler. Genel olarak betonun çevresel etkilere (durabiliteye) göre tasarımı bu iki parametreye göre yapılır.

Deprem bölgelerindeki betonlarda granülometriye ve beton kalitesine özen gösterilmediği, yeterli pas payının oluşturulmadığı, böylece betonun betonarme çeliğini koruyamadığı görülmüştür. Betonarme içindeki demiri koruyan betondur. Beton, hem basınç gerilmelerini karşılar hem de demirin korozyona uğramasını önler. Beton kalitesiz, yani boşluklu ve geçirimli olursa demiri koruyamaz. Bu, betonarmenin kusuru olarak değerlendirilmemelidir. Durabilitedeki olumsuzluğa bağlı olarak performansın zamanla azalması kalan dayanımın azalması anlamına gelir. Böylece, betonda donatı korozyonuna bağlı çatlama ile sismik yükler arasında sıkı bir ilişkinin olduğu kesinlik kazanır. Beton; agrega, çimento hamuru ve agrega-çimento hamuru temas yüzeyinden oluşan bir malzeme olarak düşünülürse en zayıf halkanın ara yüzeyler olduğu ortaya çıkar. Beton teknolojisindeki gelişmenin anahtarı çimento hamuru ile agrega arasındaki ara yüzeylerin güçlendirilmesidir. Geçirimsizlik ile betonun durabilitesi arasında sıkı bir ilişki vardır. Geçirimsiz ve boşluksuz bir beton üretimi ile donatı korozyonuna, asit, sülfat, don ve alkali reaktivitesine karşı gereken önlem alınmış olur [59].

2.8.2. Standartlara uygun pas payı (Beton örtüsü)

Demir donatı enerji yoğun bir malzeme olması nedeniyle ekolojik yönden olumsuz olarak değerlendirilmektedir. Metaller yapı malzemeleri arasında, hammaddelerinin çıkarılışı, üretimi ve taşınmaları ile ilgili olarak tükettikleri enerji açısından en yüksek çevresel etkiye sahiptir [60]. Betonarme içinde kullanılan demir donatının dayanıklılığı da betonarmenin hizmet ömrünü etkilemektedir. Demir donatının uygun yere yerleştirilmemesi, yapıya uygun özellikler taşınamaması ve pas payının yetersiz olması betonarmenin dayanıklılığını etkileyen unsurlardır. Beton yüzeyinin porozitesi ve aktif maddelerin yüzeyden itibaren nüfuz etme derinliği önemlidir. Bu durumda demir donatının paslanmasını önleyen betonarme elemanın kabuk kalınlığı (pas payı) önem kazanmaktadır. [61]. Pas payı tabakası, donatı korozyonunu fiziksel

ve kimyasal olmak üzere iki şekilde engellemektedir. Fiziksel koruma beton geçirimsizliği ile ilgili olup zararlı maddelerin donatı çeliğine ulaşmasının engellenmesi ile sağlanmaktadır [62].

Pas payının az olması, fiziksel ve kimyasal geçişleri arttırmakta ve korozyon oluşumuna sebep olmaktadır. Betonarme içinde kullanılan demir donatının korozyona uğraması, betonarme yapının hizmet ömrünü etkileyen en önemli etken olmaktadır [61]. Korozyon, donatı ve betonda birbirini takip eden reaksiyonlar olarak ortaya çıkmaktadır. Betonarmede donatıyı paslanmaya karşı koruyan betonun yüksek alkali seviyesi düşmeye başladığı zaman donatı paslanmaya başlamaktadır. Paslanan donatının hacmi genişlemekte ve betonarmede donatılara paralel çatlaklara sebep olmaktadır. Betonda bu çatlamlar başladıktan sonra beton atmosferik etkilere açık duruma gelmekte ve yapı elemanı hızla hizmet ömrünü tamamlamaktadır[62].

Betonarme yapılarda klorür donatının korozyonuna neden olmaktadır. Betonarme donatısının korozyon başlangıcının en önemli nedenleri klorid iyonlarının ve karbondioksitin çelik yüzeyine doğru girişidir. Klorid iyonları pasif filmin lokal olarak göçmesine ve lokal korozyon oluşumuna neden olur. Betonarme donatısı üzerindeki pas payı ne kadar fazla olursa betonarme donatıları korozyondan o derece iyi korunmuş olur. Donatı genellikle 5,0-7,5 cm derine konulmaktadır. Klorür konsantrasyonu belirli bir düzeye ulaştığında, betonun donatıya sağladığı koruyucu ortam zarar görür ve korozyon süreci başlar. Bu nedenle betonun klorür geçirimsizliği gömülü donatı çeliğinin korozyonunda kritik rol oynamaktadır. Bu problem özellikle deniz yapılarında, buz çözücü tuzların sık kullanıldığı köprü ve yollarda yapısal tahribatlara yol açmaktadır [63,64].

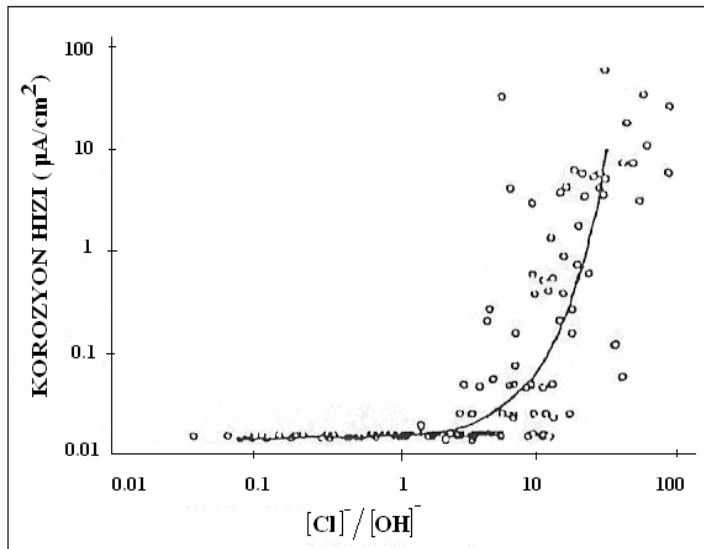
2.8.3. Zararlı klorür limiti

ASTM Standartlarına göre, korozyonun başlamaması için beton içinde ağırlıkça en fazla % 0,2 oranında klorür bulunması gerekmektedir. Ön gerilmeli betonlar için klorür sınır değeri % 0,08 olarak verilmektedir [30].

Betonarme donatılarının korozyonuna sadece klorür konsantrasyonu ile karar vermek doğru olmaz. Aşağıdaki durumların da incelenmesi gerekmektedir:

- Beton içindeki klorür iyonunun bağlı olduğu katyon,
- Klorürün beton içine prizden önce veya beton sertleştikten sonra girmiş olduğu,
- Beton içinde örneğin sülfat gibi başka iyonların bulunup bulunmadığı,
- Beton içinde bazı bölgelerde klorür konsantrasyonunun farkının bulunup bulunmadığı,
- Beton rutubeti ve pH derecesi.

Beton pH derecesi düşük olduğu zaman klorür iyonlarının betonarme donatısı üzerine etkisinde artış olmaktadır. Bu nedenle yalnız klorür konsantrasyonu için limit değer vermek yerine $[Cl^-]/[OH^-]$ molar oranı için limit verilmesinin daha doğru olacağı ileri sürülmektedir. Yapılan deneyler betonarme donatısının korozyon hızının $[Cl^-]/[OH^-]$ oranına bağlı olarak değiştiğini açıkça ortaya koymaktadır [37].



Şekil 2.9. Betonarme donatısına ait korozyon hızı ile beton boşluk suyu içindeki $[Cl^-]/[OH^-]$ oranı ilişkisi [37].

Şekil 2.9'da görüldüğü gibi $[Cl^-]/[OH^-] > 5$ olması halinde korozyon hızında şiddetli artış olmaktadır. Bu değer beton pH derecesinin 12,4 olması halinde yaklaşık olarak 3,6 kg Cl^-/m^3 betona (% 0.16 kg Cl^-/kg beton) karşı gelmektedir.

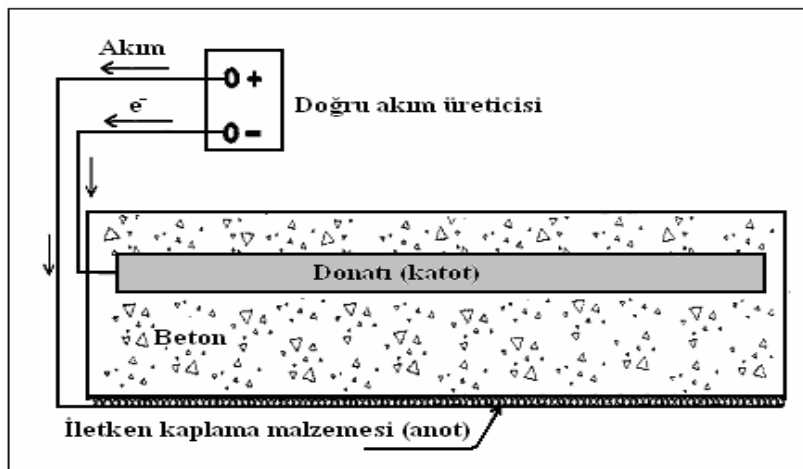
Beton içine girmiş olan klorürü yüzeyden basınçlı su ile yıkayarak kısmen temizlemek mümkündür. Bu amaçla 10MPa basıncındaki temiz su beton yüzeylerine püskürtülür. Bu su beton boşluklarına girerek orada bulunan klorür iyonlarını çözerek dışarı taşıyabilir. Ancak bu tip temizleme yüzeylerde etkili olur. Daha etkili bir klorür giderme yöntemi ise elektrokimyasal olarak “iyon temizleme” yöntemidir [37].

2.8.4. Katodik koruma

Katodik koruma, metalin potansiyelini katodik yönde değiştirerek çözünmesini önleyen bir uygulamadır. Korozyona uğrayan M metali aşağıdaki tepkimeye göre çözünürken, katotta H^+ iyonlarının indirgendiği varsayılmıştır [48].



Betonda donatı korozyonuna ait tipik bir katodik koruma sistemi Şekil 2.10’da görülmektedir. Burada doğru akım sağlayan güç kaynağının negatif ayağı donatıya ve pozitif ayağı devreyi tamamlamak üzere anot fonksiyonu gören bir karşı elektrotla bağlanmaktadır. Karşı elektrot tüm beton yüzünü örten ve elektriksel iletkenliğe sahip platin, grafit, gümüş-kurşun alaşımı gibi uzun ömürlü teller yerleştirilmiş polimer malzemelerdir [65].



Şekil 2.10. İletken örtü malzemesi ile beton donatısının katodik koruması [65].

Katodik koruma iki türlü uygulanmaktadır:

- a) Galvanik anot yöntemi
- b) Dış kaynaklı akım yöntemi

a) Galvanik anot yöntemi

Farklı elektrot potansiyeline sahip iki metalin meydana getirdiği galvanik bir hücrede soy olan (potansiyeli yüksek) metal korozyondan korunurken aktif olan (potansiyeli düşük) metal korozyona uğrayacaktır. Bu prensip çerçevesinde eğer metalik bir yapı kendinden daha aktif bir metalle birleştirilecek olursa, galvanik hücrenin anodunu meydana getiren bu aktif metal korozyona uğrarken kendisi korunacaktır. Aktif metal gözden çıkarılıp kurban edilmektedir. Çeliklerin korunmasında kurban anot olarak Mg, Al ve Zn alaşımları kullanılmaktadır.

b) Dış kaynaklı akım yöntemi

Katodik koruma sağlamak için bir doğru akım kaynağı ve yardımcı anot gerekmektedir. Bu yardımcı anot genellikle grafit, demir veya son yıllarda geliştirilmiş titanyum bazlı malzemelerden oluşur. Anot doğru akım kaynağının pozitif kutbuna, yapı da negatif kutba bağlanır. Bu durumda anot elektrolit yoluyla yapıya akım geçmesine izin verir. Uygulanan voltaj korunacak yapıya yeterince akım yoğunluğu sağladığı sürece sorun olmamaktadır.

Son yıllarda, betonarme demirlerinin katodik olarak korunması uygulama alanına girmiş bulunmaktadır. Betonarme demirleri, hem galvanik anot (çinko), hem de dış akım kaynaklı katodik koruma sistemleri ile korunabilmektedir. Katodik koruma için en önemli şart betonarme demirlerinin elektriksel bağlantısının tam olmasıdır. Normal halde betonarme demirleri kendi arasında temas etmekle beraber, bu temas düşük voltajlı elektrik akımını iletme için yeterli değildir. Bu nedenle betonarme demirlerinin birbirine kaynak yapılması gerekmektedir.

Beton içinde çok fazla klorür bulunsa bile katodik koruma uygulanarak betonarme donatısının korozyonu tam olarak önlenabilir. Yeraltı ve su içinde bulunana yapılara uygulanabildiği gibi, atmosfer içindeki beton yapılara da katodik koruma uygulanabilir. Köprüler, viyadükler, iskeleler, otoparklar, deniz yapıları ve ön gerilmeli beton borular gibi betonarme yapılara katodik koruma uygulanarak korozyon önlenilmektedir [66].

Katodik koruma uygulamalarında karşılaşılabilecek problemlerin en önemlilerinden birisi kaçak akımlar nedeniyle oluşabilecek girişim olayı ile çevredeki diğer yapıların etkilenmesidir. Korunan yapı yüzeyinde bazı kimyasal reaksiyonlar meydana gelebilir. Örneğin söz konusu katodik reaksiyon hidrojenin indirgenme reaksiyonu ise meydana gelen hidrojen gazının zararlı etkileri olabilir. Metalde kabarmaya ve kaplamaların kalkmasına neden olabilir. Bazı metallerde içeriye hidrojen girişi metal gerilim altında ise çatlamaya neden olabilir [67].

2.8.5. Anodik koruma

Demir ve çeliklerde olduğu gibi bazı metallerin elektrot potansiyelinin daha soy potansiyellere ötelenmesi aktif durumdan pasif duruma bir geçiş sağlar. Pasifleşme potansiyeli denilen bir potansiyele erişildiği zaman termodinamik olarak bir oksit filmi meydana gelmektedir. Bu pasif filmin oluşmasıyla birlikte korozyon akımında oldukça büyük azalmalar meydana gelir. Buna göre anodik koruma, anodik bir akımın uygulanması sonucu metal yüzeyinin pasif hale gelmesidir. Anodik akımın uygulanması ile birlikte metalin potansiyelinde bir artış meydana gelir. Metal potansiyeli pasifleşme potansiyelini geçer geçmez akımda ani bir düşme görülür.

Anodik koruma pratikte paslanmaz çeliklere, titanyuma ve belli durumlarda karbon çeliklerine de uygulanır. Gerekli anodik akım yükü dış bir akım kaynağından sağlanır. Katodik korumada olduğu gibi yardımcı bir elektrot kullanılır. Tek fark yardımcı elektrodun devrenin eksi kutbuna bağlanmasıdır. Potansiyelin pasif bölgede tutulması potansiyostat denilen bir cihazla sağlanmaktadır [68].

2.8.6. İnhibitör kullanarak korozyonun önlenmesi

Metal yüzeyine adsorplanan iyon ya da moleküllerin genel etkileri korozyonda büyük önem taşımaktadır. Ortama az miktarda eklendiğinde korozyonu yavaşlatan ya da durduran iyon veya moleküllere inhibitör denir. Bazı inhibitörler metal yüzeyinde adsorplanarak etkin olurlar. Metal yüzeyinde adsorplanan her iyon inhibitör değildir [69].

Çok çeşitli tip ve bileşimde inhibitör mevcuttur. İnhibitör olarak adlandırılan maddeler korozyon reaksiyonundan sorumlu olan elektrokimyasal reaksiyonların kinetiği üzerine etki edebildiği oranda korozyon hızını değiştirirler. İnhibitörler elektrokimyasal reaksiyonun türüne göre Evans tarafından anodik inhibitörler, katodik inhibitörler ve karma inhibitörler olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. İnhibitörlerin etki mekanizmaları göz önüne alındığında organik inhibitörler ve inorganik inhibitörler olarak sınıflandırılabilir. İnorganik inhibitörler çoğunlukla nötr elektrolitler içinde kullanılırlar ve anodik reaksiyon üzerine etki ederek metalin pasifleşmesini sağlarlar. Organik inhibitörler çoğunlukla asit elektrolitler içinde kullanılırlar. Metal yüzeyinde oluşturdukları adsorpsiyon tabakası fazla kararlı olmaz ve etki mekanizmaları moleküler yapılarıyla ilgili olarak çok farklıdır [70].

Cl^- gibi iyonların pasif metaller üzerinde çukur korozyonunu önlemek üzere kullanılacak inhibitörler, metalin potansiyelini çukur korozyonuna karşı dirençli bölgede tutabilecek tür ve miktarda olmalıdır. Bu amaçla kullanılabilecek inhibitörlerin çoğu yüzeyin pasifleşmesini sağlayan ve anodik inhibitör diye adlandırılan türdendir. Ortamın pH'ı metalin yüzey koşullarını, kullanılacak inhibitörün tür ve etkinliğini belirleyeceği için önemlidir.

İnhibitör konsantrasyonu da önemli parametrelerden birisidir. Yüzeyin oksitle kaplanmasını sağlayan anodik inhibitörler için derişim mutlaka belirli bir sınır değerinin üzerinde olmalıdır. Bu sınır değere kadar korozyon hızlanır. Daha sonra yüzey kapanarak pasifleşir ve korozyon hızı küçülür [43].

Beton hazırlanırken katılan inhibitörler donatı korozyonunu kontrol altına almaktadır. Bu amaçla kullanılan bazı inhibitörler kromatlar, fosfatlar, nitritler, organik esaslı inhibitör karışımlardır [66].

Korozyona karşı dayanıklı fakat pahalı olan bir malzeme kullanmak yerine bazı durumlarda ortama inhibitör katılarak daha ucuz malzemelerin kullanılması tercih edilmektedir. İnhibitör kullanımı çukur tipi korozyona karşı en ekonomik çözüm yoludur [71].

2.9. Korozyon Ölçüm Yöntemleri

2.9.1. Polarizasyon direnci yöntemi

Stern ve Geary aktivasyon polarizasyonu tarafından denetlenen bir sistemde, korozyon potansiyelinden uygulanan ΔE (± 10 mV) potansiyel farkı ile buna karşın devreden geçen ΔI akımı arasında aşağıdaki bağıntılar vardır (Eş 2.1, Eş 2.2).

$$\Delta E / \Delta I = \beta_a \beta_c / [2,303(\beta_a + \beta_c)] \quad (2.1)$$

$\beta_a \beta_c / [2,303(\beta_a + \beta_c)]$ yerine B yazılarak :

$$i_{cor} = B \Delta I / \Delta E = B / R_p \text{ elde edilir.} \quad (2.2)$$

Burada;

R_p : Polarizasyon direnci

$(dE/di)_{i \rightarrow 0}$: Polarizasyon eğrisinin eğimi

β_a : Anodik tafel eğimi, $\beta_a = 2,303RT/\alpha_a ZF$

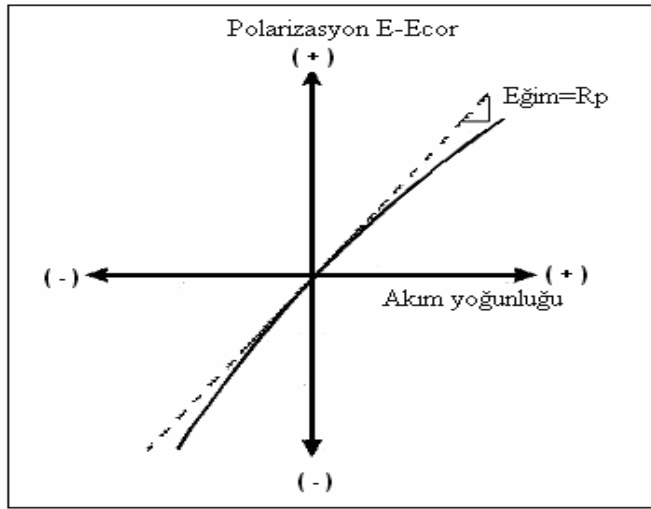
β_c : Katodik tafel eğimi, $\beta_c = 2,303RT/\alpha_c ZF$

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

Transfer katsayıları, verilen elektrokimyasal kinetik bağıntıların deneysel olarak elde edilen akım-potansiyel eğrilerine uygunluklarını sağlamak için bağıntıya eklenen

katsayılarıdır. Büyükleri genellikle 0,5 dir. Z, ilgili elektrot tepkimesi için elektron sayısını, F ise faradayı (96500 kulon) göstermektedir. E ile İ arasındaki bağıntı gerçekte üstel bir bağıntıdır [72,73].

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



Şekil 2.11. Polarizasyon direnç yöntemiyle korozyon hızı belirlenmesinde akım potansiyel eğrisi

Güç kaynağından değişken bir direnç yardımıyla çalışma elektrotu ile karşı elektrot arasında belirli potansiyeller uygulanarak bunlara karşılık gelen akım değerleri ölçülür. Bu şekilde çizilen $\Delta E/\Delta I = R_p$ eğrileri elde edilir (Şekil 2.11). Bu metotta uygulanan potansiyel değişme hızı 0,1-10 mV arasında olmalıdır. Potansiyel değişme hızı ne kadar yavaş olursa o kadar doğru sonuç elde edilir [72,73].

2.9.2. Tafel ekstrapolasyon yöntemi

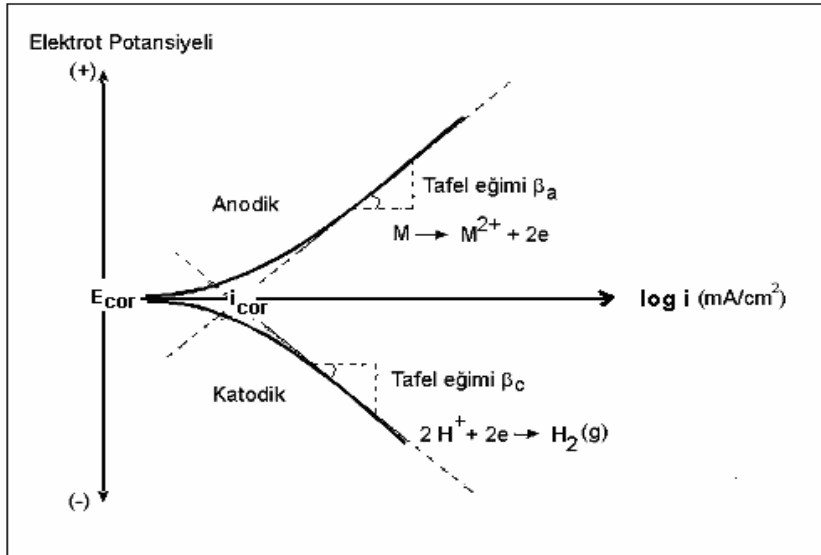
Elektrotlara Stern-Geary uygulamasına göre daha büyük bir potansiyel aralığında polarizasyon uygulanması sonucu elde edilen akım-potansiyel eğrilerinin yarı logaritmik skalada değerlendirilmesi ile Tafel ekstrapolasyon yöntemi elde edilir. Bu yöntemde elektrotlar arasında uygulanan elektrik akımı veya potansiyel farkı ile ara yüzey reaksiyonlarını anodik veya katodik yönde hızlandırarak malzemenin korozyon özelliği kısa zamanda belirlenebilir.

Bu uygulamanın grafiksel değerlendirilmesi ile (Tafel ekstrapolasyon yöntemi) malzemenin korozyon hızını ve çeşitli korozyon davranışlarını belirlemeye yarayan parametreler elde edilir. Bu yöntem korozyonu incelenecek malzemenin genel korozyon özelliği göstermesi durumunda daha sağlıklı olarak kullanılabilir. Ancak malzemede lokalize korozyon daha belirgin ise Tafel ekstrapolasyon yöntemine göre elde edilecek kantitatif bulguların doğruluğu, malzemenin lokalize korozyon eğilimi derecesinde azalır. Bu yüzden lokalize korozyona uğrayan kompozit malzemeler için bu yöntem sağlıklı olmayı, korozyon özelliği belirlenmesinde sadece belli bir yaklaşım getirmek için kullanılabilir. Böyle bir metale ait elektrokimyasal korozyon özelliklerinin araştırılmasında, çeşitli şekillerde çukur oluşum potansiyellerinin belirlenmesi ve gürültü ölçüm teknikleri (electrochemical noise technique) daha çok önem kazanmaktadır [74,75].

Potansiyodinamik tarama süresince metal yüzeyinde farklı birkaç kimyasal reaksiyon meydana gelebilir. Genelde anodik polarizasyonda aktif, pasif, transpasif ve yeniden pasifleşme bölgeleri oluşur. Buradan metal veya alaşımlar için korozyon akımı, korozyon potansiyeli, pasifleşme kararlılığı hakkında genel anlamda fikir sahibi olunabilir. Kararlı akım-potansiyel bulguları elde etmek için potansiyodinamik tarama hızının yeterince düşük olması gerekir [74,75].

Şekil 2.12’de görüldüğü gibi E-logi polarizasyon eğrilerinde, uygulanan dış akım belirli bir değere eriştikten sonra polarizasyon eğrileri doğrusal hale gelmektedir. Aşırı gerilim ile uygulanan dış akımın logaritmasının lineer olarak değiştiği bu

bölgelere Tafel bölgesi denir. Bu bölgede Tafel doğrusunun eğimi deneysel olarak elde edilerek korozyon hızının belirlenmesinde kullanılır. Korozyona uğrayan bir elektrotta anodik ve katodik reaksiyonlar elektrot yüzeyinde aynı anda yürürler.



Şekil 2.12. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri

Tafel ekstrapolasyonu yönteminde korozyona uğrayan metal için anodik ve katodik Tafel eğrileri elde edilir ve bunların çizgisel olan kısımları uzatılarak kesim noktalarından o sistem için korozyon hızı i_{cor} ve korozyon potansiyeli E_{cor} bulunur. Tafel eğrilerinin ekstrapole edilecek kısmı çok önemlidir. Bu bölgenin güvenli olması için korozyon potansiyelinden 40-50 mV sonra başlamalı ve akımın en az 10 kat olmasına kadar sürmelidir [72].

2.9.3. Elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemleri

Açık devre koşullarında korozyona uğrayan elektrotun akım veya potansiyelinde titreşim şeklinde kendiliğinden olan değişimler, çok iyi bilinen ve kolayca gözlenebilen bir olaydır. Gelişigüzel olan bu değişimler aralık korozyonu ve çukur korozyonunun meydana geldiği durumlar için incelenmiştir. İster elektrot dıştan polarize edilsin, isterse açık devre koşullarında bulunsun akım veya potansiyeldeki bu titreşimlerin kaynağı, yüzeyde oluşan mikro korozyon hücreleri ve aynı yüzeyde

yürüyen reaksiyonların farklı bölgelerde farklı hızlarda devam etmesidir. Elektrokimyasal sistemlerde kendiliğinden olan bu titreşimler için elektrokimyasal gürültü ifadesi kullanılmaktadır [74,75].

Son yıllarda elektrokimyasal gürültü ölçümü üzerine başlatılmış bu çalışmalarda, Pt, Al, Mg, Fe, yumuşak çelik ve Zn gibi çeşitli elektrotları kendileri ile galvanik eşleştirme yapıldığında, aralarında ölçtüğü potansiyellerin titreşimli olduğu bulunmuştur. Al ve Mg'da 100 μV 'dan daha büyük genlikli ve frekansı 1-2 Hz olan titreşimli ölçümler elde edilmiştir. Fe, çelik ve Zn genliği 50-60 μV arasında değişen, frekansı 0,2-0,6 Hz olan titreşimli ölçümler vermektedir. İki Pt elektrot arasındaki potansiyel de titreşimli olmakla beraber, genliği korozyona uğrayan elektrotlarla karşılaştırıldığında ihmal edilecek kadar küçüktür [74,75].

Bu çalışmalara göre titreşimlerin nedeni, elektrotların korozyonu sırasında anodik ve katodik reaksiyonların farklı yerlerde lokalize olması sonucu yüzeydeki farklı yerlerin farklı elektrik yükü ile yüklenmesinden kaynaklanmaktadır. Farklı yüklü yerler arasındaki yük geçişi potansiyel veya galvanik akımda titreşimlere neden olur. Bu titreşimlerin korozyon olayının bir karakteristiği olduğu kabul edildiğinden korozyonun incelenmesinde kullanılabileceği öne sürmüştür Elektrokimyasal gürültü, korozyon sırasında korozyon potansiyelinin üzerinde gözlenebilir. Bu gürültüyü kantitatif olarak korozyon hızına bağlayabilmek için çalışmalar yapılmaktadır [74,75].

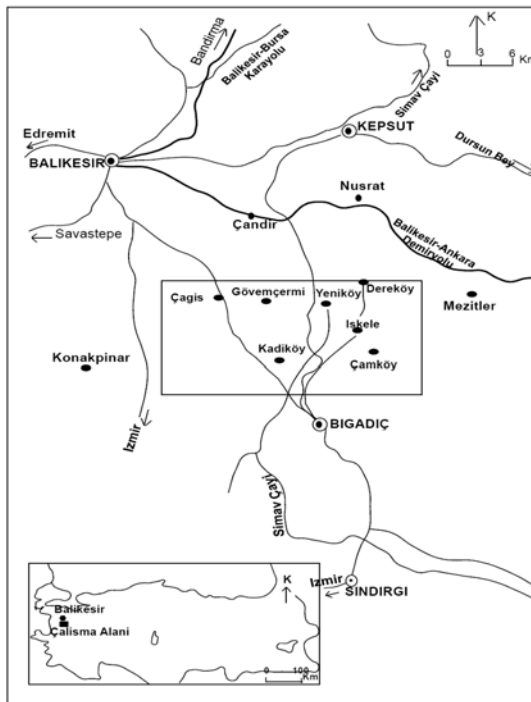
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu araştırmada zeolitik tuf (ZT), CEM I 42,5 R çimentosu, CEN standard kumu, agrega, deniz suyu, içme suyu ve betonarme çeliği kullanılmıştır. Deneysel çalışmada harç prizmaları, çeşitli boyutlarda beton ve betonarme numuneler kullanılmıştır.

3.1.1. Zeolitik Tuf (ZT)

Bu çalışmada kullanılan ZT numunesi Balıkesir ili Bigadiç ilçesinde yüzeylenen kayalardan alınmıştır (Harita 3.1).

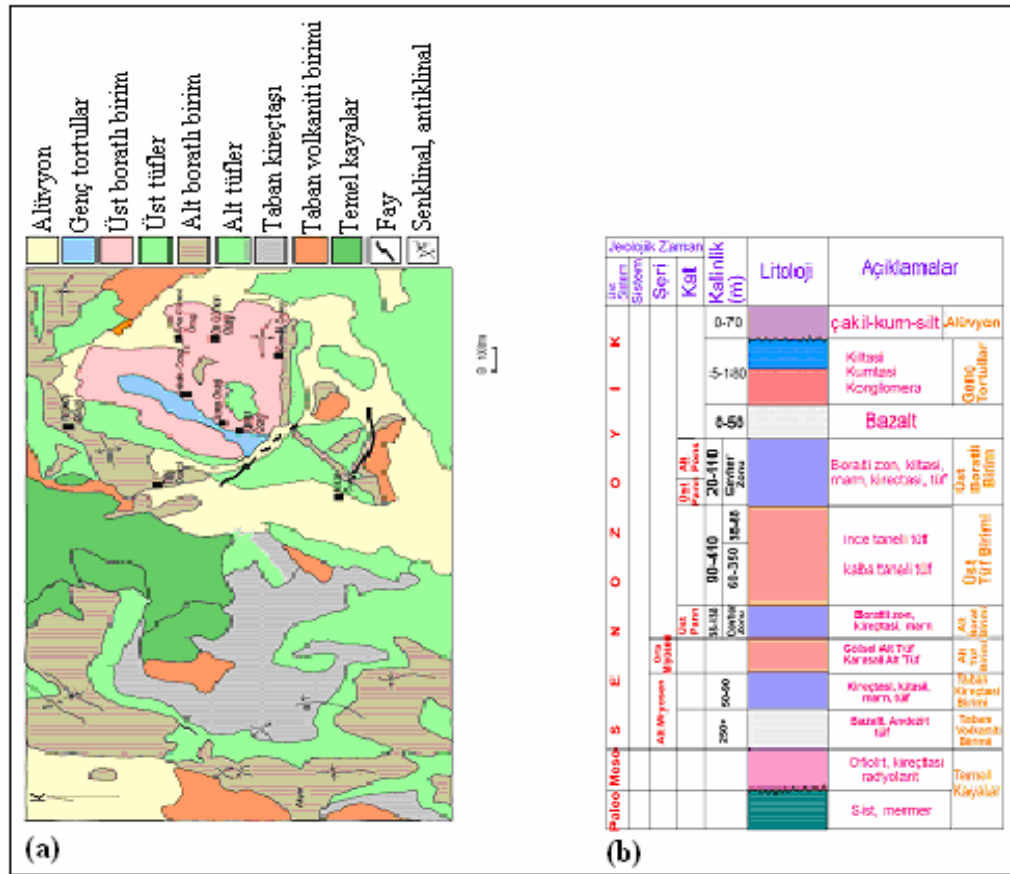


Harita 3.1. Çalışma alanı yer bulduru haritası

Bigadiç yöresinde üst tuf olarak adlandırılan oluşumlarda zeolitleşmenin yaygın olduğu bilinmektedir. Çalışma alanının jeoloji haritası ve genelleştirilmiş kesiti

üzerinde bölge jeolojisine ait ayrıntılar Harita 3.2’de görülmektedir. Buradaki Neojen yaşlı oluşumlar 1000 m kadar kalınlık gösterirler ve tabandaki Mesozoyik yaşlı ofiyolit karmaşığı üzerinde uyumsuz olarak yer alırlar. Ofiyolit karmaşığı metamorfitler, rekristalize kireçtaşları ve serpantinlerden oluşur. Neojen yaşlı oluşumlar ise tabandan itibaren temel volkanitleri, kireçtaşları, alt tüfler, alt borat formasyonu, üst tüfler ve üst borat formasyonu şeklinde bir dizilim göstermektedir [77].

Üst tüfler 250 m kalınlıktadır. Riyolitik bileşimde olan bu tüfler üstte ince taneli camsı toz tüflerinden, altta ise kaba taneli camsı kül tüflerinden oluşmaktadır. Her iki oluşumda büyük ölçüde zeolitlenme görülmektedir. Zeolitlenme oranı ortalama % 80 klinoptilolittir ve bu değer yer yer % 100’lere ulaşmaktadır [78].



Harita 3.2. Çalışma alanının jeolojik özellikleri

(a) Jeoloji haritası (b) Genelleştirilmiş kesiti [76]

3.1.2. Çimento

Bu çalışmada; Çizelge 3.1’de kimyasal kompozisyonu, fiziksel ve mekanik özellikleri verilen, Set Çimento Güvercinlik Ankara tesislerinden temin edilen CEM I 42,5 R çimentosu (TS EN 197-1) kullanıldı [79].

Çizelge 3.1. Çimento kimyasal kompozisyonu, fiziksel ve mekanik özellikleri

Kimyasal kompozisyon	(%)	TS EN 197-1 sınırları	Fiziksel özellikler		TS EN 197-1 sınırları
Silisyum oksit (SiO_2)	20,35		Özgül ağırlık (g/cm^3)	3,10	
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	5,98		Özgül yüzey (cm^2/g)	3200	
Demir oksit (Fe_2O_3)	3,06		Hacim genleşmesi (mm)	3	En çok 10
Kalsiyum oksit (CaO)	63,35		Priz Başlangıcı (dak)	200	En az 60
Magnezyum oksit (MgO)	1,89	En çok 5,0	Priz sonu (dak)	310	En çok 600
Sodyum oksit (Na_2O)	0,58		Mekanik özellikler		TS EN 197-1 sınırları
Potasyum oksit (K_2O)	0,88		Basınç dayanımı 2 gün (MPa)	22,9	En az 20
SO_3	2,89	En çok 3,5	Basınç dayanımı 7 gün (MPa)	47,2	
Kızdırma kaybı	0,50	En çok 4,0	Basınç dayanımı 28 gün (MPa)	57,0	En az 42,5
Çözünmeyen kalıntı	0,52	En çok 1,5			

3.1.3. CEN Standard Kumu

CEN Standard Kumu her tanecik büyüklüğüne göre ayrı ayrı ve karıştırılmış, deneye hazır şekilde plastik torbalar içinde, TS EN 196-1’de belirtilen özelliklerine uygun olarak temin edildi [80].

3.1.4. Agreg

Çalışmada Çizelge 3.2’de verildiği üzere Set Beton firmasından temin edilen 0-4 mm, 4-12 mm ve 12-22 mm olmak üzere üç farklı grup kırmataş agrega kullanıldı. Agregalar üzerinde TS 3530 EN 933-1’e göre agrega tane büyüklüğü dağılımı [81].

TS 3529' e göre agrega gevşek ve sıkışık birim ağırlığı [82], TS EN 1097-6'ya göre agrega özgül ağırlık ve su emme oranı [83], TS EN 1097-2'e [84] göre agrega parçalanma direnci Los Angeles metodu kullanılarak belirlendi.

Çizelge 3.2. Kullanılan agregaların özellikleri

Agrega boyutu (mm)	Elekten geçen (%)								
	0.25	0.5	1	2	4	8	12	16	22
0-4	20,8	29,3	45,5	70,4	99,3	100	100	100	100
4-12	0	0	0	1,6	4,3	66,3	99,2	100	100
12-22	0	0	0	0	0	2,1	17,2	72,3	100
Agrega boyutu (mm)	Özgül ağırlık	Su emme (%)	Gevşek birim hacim ağırlık (g/cm ³)	Sıkışık birim hacim ağırlık (g/cm ³)	Los Angeles (LA)				
0-4	2,68	0,62	1719,0	1937,6					
4-12	2,70	0,45	1414,3	1611,3					
12-22	2,70	0,38	1379,6	1640,6					
Standart	TS EN 1097-6	TS EN 1097-6	TS 3529	TS 3529	TS EN 1097-2				

3.1.5. Su

Bu çalışmada karışım suyu olarak Ankara şehir şebeke suyu, olgunlaştırma suyu olarak Çizelge 3.3'de kimyasal özellikleri verilen Balıkesir Edremit Körfezinden alınan Ege Denizi suyu ve şehir şebeke suyu kullanıldı.

Çizelge 3.3. Ege Denizi suyunun kimyasal özellikleri

Bileşenler	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ⁺²	NH ₄	CO ₂
Miktar (mg/l)	1460	2832	18671	11860	540	0,003	4,49

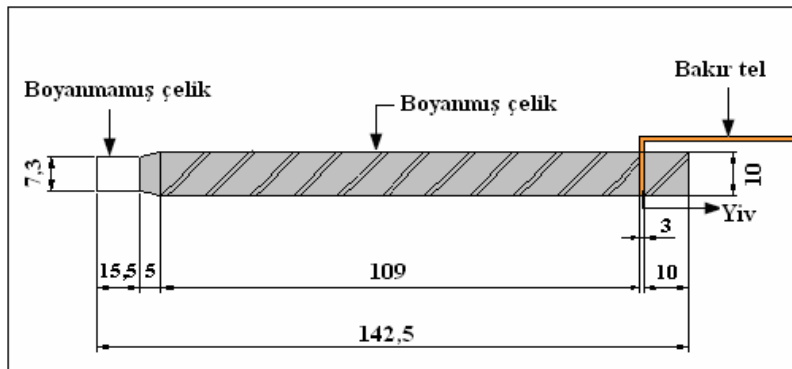
3.1.6. Betonarme çeliği (Çalışma elektrotu)

Korozyon ölçümleri için kullanılacak olan TS 708' e uygun BÇ III A, $\Phi 10$ nervürlü betonarme çeliği, Samsun Yeşilyurt Demir Çekme San. Tic. Ltd. Şti.'den temin edilmiştir. Betonarme çeliği 142,5 mm uzunluğunda kesildi. Bir ucu çapı 7,30 mm ve boyu 15,5 mm olacak şekilde tornalanarak mekanik olarak temizlendi. Tüm çelik çubuklar aynı pürüzlük katsayısında tornalandı ve bu yüzeyler zımpara ile pürüzsüz hale getirildi. Çeliğin diğer ucunda, 3 mm genişliğinde ve derinliğinde yiv açıldı. Korozyon ölçümlerini yapabilmek için açılan bu yive yumuşak bakır tel bağlandı. Daha sonra çelikler, tornalanan kısım boyanmayacak şekilde önce antipas boya daha sonra epoksi boya ile boyandı. Tornalanan kısım ile boyanan kısmın birleştiği yerde kabuk altı korozyonu oluşmaması için bu kısım itina ile boyanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan betonarme çeliğinin boyutları Şekil 3.1'de ve kimyasal bileşimi Çizelge 3.4'de verildi.

Boyama işi bittikten sonra açık olan kısmın alanı;

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

$$A = 3,14(3,65)^2 + 2(3,14)(3,65)(15,5) = 400 \text{ mm}^2 = 4,0 \text{ cm}^2 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$



Şekil 3.1. Betonarme çeliği boyutları (mm)

Çizelge 3.4. Betonarme çeliği kimyasal bileşimi

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

3.2. Metot

Bu çalışmada ZT katkısı, CEM I 42.5 R çimentosuyla ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirilerek (ikame edilerek) harç, beton ve betonarme numuneler üretildi ve sırasıyla ZT0, ZT10, ZT20, ZT30 ve ZT40 olarak adlandırıldı. Karışım suyu olarak içme suyu, olgunlaştırma suyu olarak içme ve deniz suyu (İİ ve İD) kullanıldı. Çimento harçları dayanım deneyleri için 40×40×160 mm boyutlarında harç prizma numuneler; beton basınç dayanımı ve hızlandırılmış hızlı klor iyon geçirimsizlik deneyleri için 100×200 mm beton silindir numuneler; su işleme derinliği, ultrasonik ses hızı deneyleri için 200×200×120 mm beton prizma numuneler ve korozyon ölçümleri için 50×100 mm silindir betonarme numuneler üretildi.

3.2.1. Zeolitik tütün puzolanik aktivite deneyi

Çalışmanın bu aşamasında, Balıkesir ili Bigadiç ilçesinde yüzeylenen kayalardan alınan ZT tek başına öğütüldü ve kimyasal, fiziksel, mekanik özellikleri belirlendi. Öğütme işlemi için bilyalı değirmeni kullanıldı ve 40µ elekten geçen % değerlerine göre öğütülerek ZT numuneleri hazırlandı. Ayrıca zeolit numunesine ait XRD kırınım grafiği, x-ışını difraktometresi kullanılarak, 2-70° 2-teta açıları arasında elde edilmiştir.

ZT numunesi üzerinde puzolanik aktivite deneyi Çizelge 3.5’de verildiği gibi TS 25’e göre [12], TS EN 196-1’de tanımlanan standart kum kullanılarak yapıldı [80]. Numunelerin 7 günlük kür süresi sonrasında eğilme ve çekme dayanımı belirlendi.

Çizelge 3.5. Puzolanik aktivite harçlarının karışım oranları [12]

Malzeme	Miktar (g)
Sönmüş Kireç- CaOH_2	150
Tras	$T = 300 \times \text{Trasın Özgöl Ağırlığı} / \text{Sönmüş Kirecin Özgöl Ağırlığı}$
Standart Kum	1350
Su	$0,5 \times (150 + T)$

3.2.2. Çimento priz süresi ve hacim genleşmesi tayini

Çimento priz süresi ve hacim genleşmesi tayini için CEM I 42,5 R çimentosu yerine ağırlıkça belirtilen oranlarda ZT yer değiştirecek şekilde ilave edilip, İİ ve İD grup çimento hamurları hazırlandı. Çimento hamurlarının standard kıvam belirlenmesi, priz süreleri ve hacim genleşmesi deneyleri TS EN 196-3 esas alınarak yapıldı. Bu deneyler sırasıyla otomatik Vicat aleti ve Le Chatelier aleti kullanılarak yapıldı [85].

3.2.3. Çimento harçlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Çimento harçlarının mekanik özelliklerini belirlemek için belirtilen karışımlarda TS EN 196-1 esas alınarak 40x40x160mm boyutunda harç numuneleri üretildi [80]. Çimento harçlarına ait üretim planı Çizelge 3.6'da verildi.

Çimento harçlarının mekanik özelliklerini belirlemek için 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları incelendi. Eğilme dayanım sonuçları alınan aynı numunelerin parçaları üzerinde basınç dayanım değerleri elde edildi.

Çizelge 3.6. Çimento harçlarının eğilme ve basınç dayanımı deney planı

Deney günleri	Karışım suyu	Olgunlaş. suyu	Numune türleri				
			ZT0	ZT10	ZT20	ZT30	ZT40
7	İ	İ	3	3	3	3	3
28	İ	İ	3	3	3	3	3
90	İ	İ	3	3	3	3	3
7	İ	D	3	3	3	3	3
28	İ	D	3	3	3	3	3
90	İ	D	3	3	3	3	3
TOPLAM:			90 ADET				
İ:	İçme suyu		D:	Deniz suyu			

3.2.4. Beton karışım hesabı

Beton karışım hesabı TS 802 ve TS EN 206-1 esas alınarak yapıldı [86,87]. Karışımın beton sınıfı C25 olarak seçildi. Karışım hesabında en büyük tane çapı 22 mm ve agrega tane sınıfları 0-4 mm % 33, 4-12 mm % 20, 12-22 mm % 47, s/ç oranı 0,44 (sabit), çökme değeri 70 mm, karışım suyu 167 lt/m³ (sabit), çimento miktarı 380 kg/m³ olarak hesaplandı. Beton karışım hesabına ait 1m³ beton karışımı için kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.7’de verildi.

Çizelge 3.7. 1m³ beton karışımı içinde kullanılan malzeme miktarları

Agrega (kg)			ZT	ZT	Çimento	Su	s/b
0-4	4-12	12-22	(%)	(kg)	(kg)	(kg)	
611	373	875	0	0	380	167	0,44
611	373	875	10	38	342	167	0,44
611	373	875	20	76	304	167	0,44
611	373	875	30	114	266	167	0,44
611	373	875	40	152	228	167	0,44

3.2.5. Taze beton deneyleri

ZT katkılı ve katkısız taze betonlara ait çökme deneyi TS EN 12350-2, hava miktarı TS EN 12350-7 ve birim hacim ağırlık deneyi TS EN 12350-6 esas alınarak yapıldı [88,89,90].

3.2.6. Sertleşmiş beton deneyleri

ZT0, ZT10, ZT20, ZT30, ZT40 beton numunelerin basınç dayanımları, hızlı klor geçirimsizlikleri, ultrases hızı ve elektrokimyasal korozyon ölçümlerine ait üretim planı Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Sertleşmiş beton deneylerine ait numune üretimi

Numune yaşı	Karışım suyu	Olgunlaş. suyu	Numune türleri				
			Basınç dayanımı / hızlı klor geçirimsizlik numuneleri (10×20 cm silindir)				
			ZT0	ZT10	ZT20	ZT30	ZT40
7	İ	İ	3	3	3	3	3
28	İ	İ	3	3	3	3	3
90	İ	İ	3	3	3	3	3
180	İ	İ	3	3	3	3	3
360	İ	İ	3	3	3	3	3
7	İ	D	3	3	3	3	3
28	İ	D	3	3	3	3	3
90	İ	D	3	3	3	3	3
180	İ	D	3	3	3	3	3
360	İ	D	3	3	3	3	3
TOPLAM: 150 ADET							
			Su işleme derinliği / ultrases hızı numuneleri (20×20×12 cm prizma)				
			ZT0	ZT10	ZT20	ZT30	ZT40
90	İ	İ	3	3	3	3	3
90	İ	D	3	3	3	3	3
TOPLAM: 30 ADET							
			Korozyon numuneleri (5×10 cm silindir)				
			ZT0	ZT10	ZT20	ZT30	ZT40
			4	4	4	4	4
TOPLAM: 20 ADET							

Beton basınç dayanımı deneyi

ZT0, ZT10, ZT20, ZT30, ZT40 beton numunelerin basınç dayanımlarını belirlemek için Çizelge 3.8’de verildiği gibi 100×200 mm boyutlarında toplam 150 adet silindir numunelerin TS EN 12390-2’ye göre İİ ve İD grup olarak üretildi [91]. Farklı ortamlarda olgunlaştırılmış beton basınç dayanım numuneleri Resim 3.1’de görülmektedir.



Resim 3.1. Farklı ortamlarda olgunlaştırılmış beton basınç dayanım numuneleri

Basınç dayanımı deneyi için maksimum 3000 kN yükleme kapasiteli, dijital kumanda ünitesi ve yükleme hızı ayarlanabilen tek eksenli beton basınç test cihazı kullanıldı. Silindir numuneler, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak konumda cihaza yerleştirildi [92].

Beton basınç dayanımlarının belirlenmesinde TS EN 12390-3 esas alınarak aşağıdaki eşitlik kullanıldı (Eş 3.1).

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

Burada;

f_c = Basınç dayanımı, MPa

F = Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A_c = Numunenin en kesit alanı, mm²

Hızlı klor geçirimsizliği deneyi

Hızlı klor iyon geçirimsizliği deneyi 360 günlük silindir beton numuneler üzerinde ASTM C 1202 standardına göre yapıldı. Deney sonunda beton numunelerden geçen akım şiddeti - zaman grafiğinden elde edilen alan yardımıyla iletilen elektrik akımı miktarı coulomb cinsinden hesaplandı.

ASTM C 1202 standart hızlandırılmış klor iyon geçirgenliği testi, beton numunelerin geçirimsizliğini doğrudan ölçmese de genel olarak boşluk oranı, geçirgenliği ve dayanıklılığı konusunda fikir veren hızlı bir yöntemdir. Bu standarda göre deney sonuçlarının yorumlanması için Çizelge 3.9’da verilen değerler önerilmiştir [93].

Çizelge 3.9. ASTM C 1202 standardına göre betonun değerlendirilmesi [93]

Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Klor iyonu geçirimsizliği yönünden değerlendirme
> 4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Beton su işleme derinliği deneyi

Su işleme derinliği deneyi için 200×200×120 mm boyutlarında 30 adet prizma beton numuneler İİ ve Dİ grup olmak üzere üretildi. TS EN 12390-8’e göre deney numunelerinin; küp, silindir veya prizma şeklinde olması, deney örneğinin kenar uzunluğu veya çapının 150mm’den daha küçük olmaması ve en az 28 günlük olması gerekmektedir [94].

90 günlük beton numuneleri Resim 3.2’de görüldüğü gibi cihaza yerleştirildi ve (72±2) saat süreyle (500±50) kPa su basıncı uygulandı. Beton numuneleri bu işlem sonunda, basınçlı su uygulanan yüzeye dik şekilde ortasından yarılarak ikiye bölündü.

Beton numunelerin bölünmesi ve incelenmesi sırasında basınçlı su uygulanan yüzeyi alta getirilmiştir. Beton numunelerin bölünmesi ile ortaya çıkan yüzeyinin su işleyen yerin kesiti belirgin şekilde görülünceye kadar kurutulup, ıslak alanın sınırları işaretlendi. Basınç uygulanan deney yüzey alanından itibaren suyun işlediği

derinlikler çeşitli noktalardan ölçüldü ve tüm numunelerin su işleme derinlik miktarları değerlendirildi.



Resim 3.2. Beton su işleme derinliği tayini cihazı

Beton ultrases geçiş hızı deneyi

Beton ultrases geçiş hızları 30 adet prizma numune üzerinde ASTM C 597'ye göre belirlendi. Ultrasonik test cihazı ile numunenin bir yüzeyinden gönderilen ses dalgasının, diğer bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı aşağıdaki gibi (Eş.3.2) hesaplanmaktadır:

$$V = l/t \quad (3.2)$$

Burada;

V: Ses hızı, (km/s)

t: Ses geçiş süresi, (saniye)

l: Ölçü boyu, (km) [95].

Ölçüm noktaları cihazın alıcı-gönderici uçları karşılıklı ve birbirine paralel olacak şekilde seçildi. Alıcı-gönderici uçlara jel sürüldü. Bu uçlar beton numunelerin ölçüm noktalarına Resim 3.3'de görüldüğü gibi sıkıca bastırılıp, geçiş süreleri birçok noktadan tekrar edilerek kaydedilmiştir.



Resim 3.3. Ultrases ses hızı ölçüm cihazı

Ultrasonik ses hızı ile betonun kalitesinin tahmin edilmesi Çizelge 3.10'a göre yapılabilir.

Çizelge 3.10. Ses hızı ile betonun kalitesinin tahmin edilmesi

Ses hızı (V) km/s	Beton kalitesi
>4,5	mükemmel
3,5-4,5	iyi
3,0-3,5	şüpheli
2,0-3,0	zayıf
<2	çok zayıf

Beton boşluk oranının belirlenmesi

Beton boşluk oranı TS 3624'e (Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu) uygun olarak küp numuneler üzerinde belirlenmiştir [96].

3.2.7. Betonarme numunelerin üretimi ve elektrokimyasal korozyon ölçümleri

Elektrokimyasal korozyon ölçümleri için Resim 3.4’de görüldüğü gibi 100×100 mm boyutlarında ZT0, ZT10, ZT20, ZT30 ve ZT40 küp betonarme numuneler üretildi ve daha sonra Resim 3.5’de görüldüğü üzere karotla 50×100 mm silindir boyutlarına getirildi.



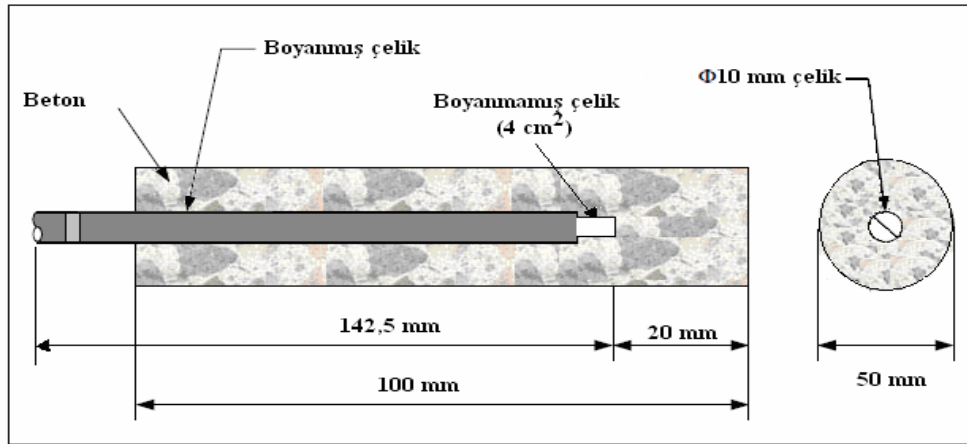
Resim 3.4. 100×100 mm boyutlarında üretilmiş betonarme küp numuneler



Resim 3.5. Karotla 50×100 mm boyutlarına getirilmiş betonarme silindir numuneler

Betonarme çeliğinin beton içindeki durumu Şekil 3.2’de verilmiştir. Ölçüm yapılacak çelik elektrodun yüzey alanı büyüdükçe potansiyel saçılma aralığı artmakta ve korozyon hızında gelişigüzel bir değişim olmaktadır. Beton içindeki çeliğin çevreden aldığı korozyon etkilerini daha spesifik olarak belirleyebilmek ve tekrarlanabilir

sonuçlara ulaşmak için donatı çeliği kısmen boyanmıştır. Ölçüm yapılan elektrot alanı sağlıklı elektrokimyasal ölçümlerin elde edilebileceği bir ölçüye kadar ($4,0 \text{ cm}^2$) Şekil 3.2’de görüldüğü gibi küçültüldü



Şekil 3.2. Betonarme çeliğinin beton içindeki durumunun şematik gösterimi

Betonarme çeliği korozyonunun elektrokimyasal ölçüm parametreleri başlıca R (direnc), E (potansiyel) ve I (akım) değerleridir (Şekil 3.3.). Bu değerler ıslak ve kuru betonlar için büyük değişimler göstermektedir. İletken ve sulu ortamda bulunan bir betonarme çeliğinin korozyon özelliklerini belirlemek için Eş 3.3’de verilen I, R ve E değerlerini kapsayan ohm kanununu temel alarak türetilen çeşitli elektrokimyasal eşitlikler (Tafel extrapolasyon yöntemi, polarizasyon direnci yöntemi v.b.) vardır [97].

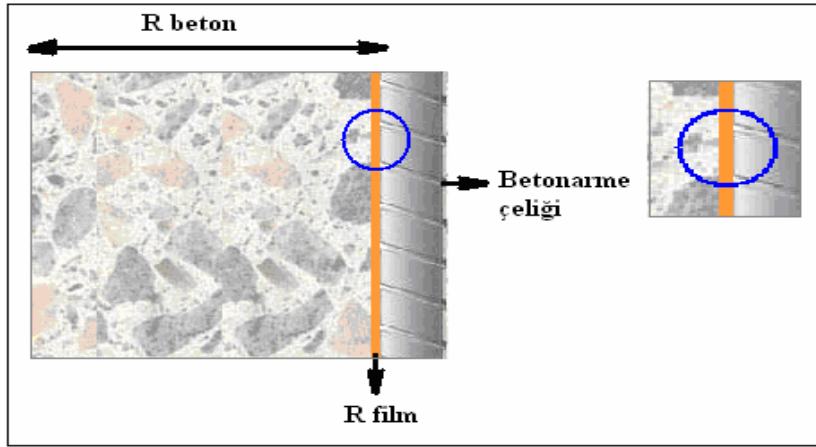
Ohm yasasına göre;

$$E = I \times (R_{\text{film}} + R_{\text{beton}}) \quad (3.3)$$

Burada;

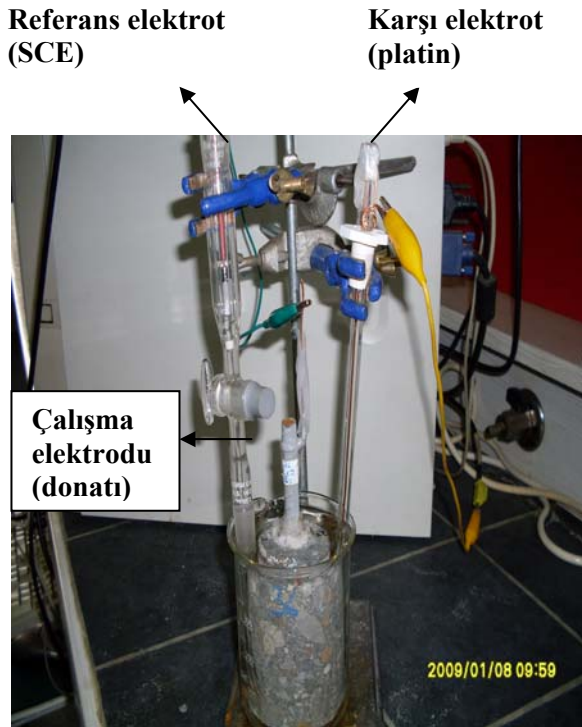
R_{film} ; Tuzlu su içindeki beton ortamında demir üzerinde oluşan filmin direnci

R_{beton} ; Beton direnci



Şekil 3.3. Bir betonarme numunede çeliğin korozyon özelliklerini belirleyen bölgelerin şematik gösterimi

Betonarme çeliğinde elektrokimyasal korozyon parametrelerinin belirlenmesinde üç elektrotlu ölçüm yöntemi kullanıldı (Resim 3.6) ve voltametrik ölçümler bilgisayar kontrollü Voltalab 40 PGZ 301 model potansiyostat cihazı kullanılarak yapıldı (Resim 3.7).

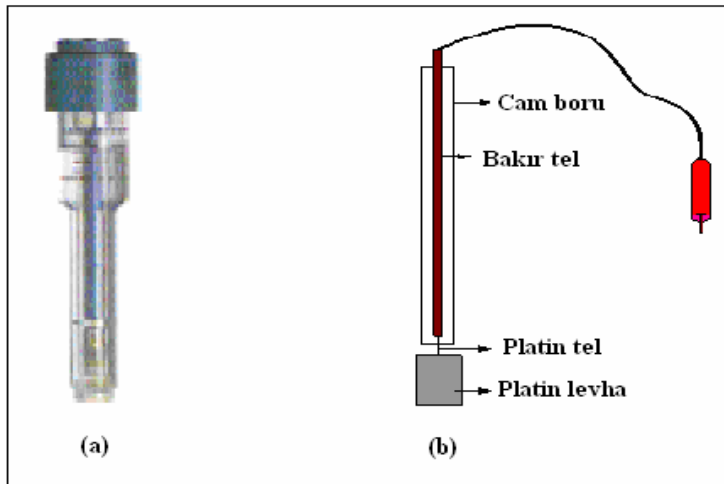


Resim 3.6. % 3,5 NaCl içeren korozif ortamda betonarme numunelerin korozyon ölçümlerinde kullanılan düzenek



Resim 3.7. Potansiyostat cihazı

Bu yöntemle göre çalışma elektrotu olarak korozyonu ölçülecek betonarme çeliği, karşıt elektrot olarak platin ve karşılaştırma elektrodu olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) kullanıldı (Resim 3.8).



Resim 3.8. Elektrotların şeması (a) Karşılaştırma elektrodu (b) Karşıt elektrot

Betonarme numunelere önce koroziv ortamdaki bekleme sürelerine bağlı açık devre potansiyel ölçümleri (OCP, half cell potential), kronoamperometrik ölçümler, elektrokimyasal gürültü tekniği (ENT), polarizasyon direnci (R_p) gibi tahribatsız elektrokimyasal testler uygulandı.

Korozyon ortamında bekleme süresinin 126. gününde numunelere aşırı polarizasyon uygulaması ile tahribatlı elektrokimyasal uygulamalar yapıldı. Bu deneyler sonucunda elde edilen bulgulara ait çeşitli elektrokimyasal parametreler grafik ve çizelgeler halinde düzenlenerek malzeme korozyon özellikleri karşılaştırıldı ve korozyon mekanizmaları belirlendi.

Korozyon deneyleri sonrası beton-çelik ara yüzeyi ile beton mikro yapı özellikleri taramalı elektron mikroskop (SEM) kullanılarak incelendi.

Tahribatsız yöntemler

Bu bölümde betonarme numunelerin yapay olarak aşındırılmadığı, serbest korozyon koşullarında zamana bağlı olarak tahribatsız elektrokimyasal ölçümler yapıldı. Tahribatsız ölçümler olarak adlandırılan ve çalışma elektroduna küçük gerilimlerin uygulanması ile yapılan deneylerde pratik olarak yüzeyin korozyon özelliklerinin değişmediği kabul edilir.

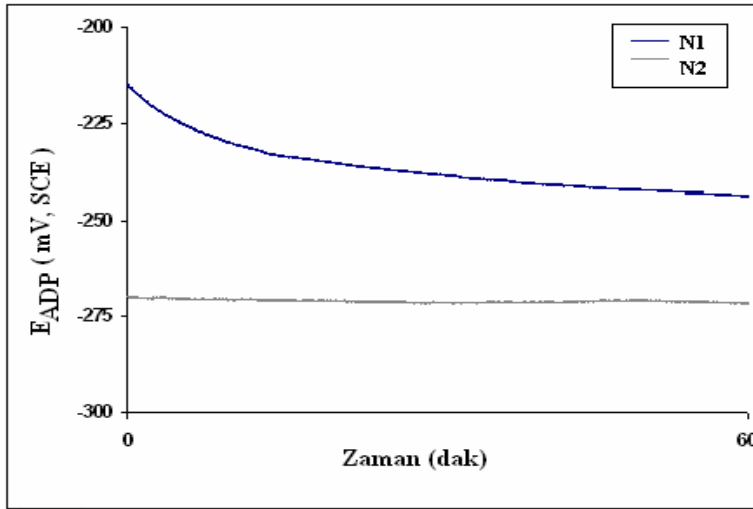
Çalışma elektrodu betonarme numune olan üç elektrotlu elektrokimyasal düzenek ile % 3,5 NaCl içeren koroziif ortamda bilgisayar kontrollü olarak yapılan deneyler aşağıdaki gibi gruplandırılmıştır:

- Yarı hücre veya açık devre potansiyeli (ADP) ölçümleri,
- Kronoamperometri uygulaması ile açık devredeki korozyon yüklerinin (Q_{ADP}) ölçümü,
- Polarizasyon direnci yöntemi ile (Tafel ekstrapolasyon ve Stern-Geary) korozyon potansiyeli (E_{cor}), korozyon direnci (R_p), korozyon akımı (i_{cor}) ve korozyon hızının bulunması,
- Elektrokimyasal gürültü tekniklerinin (ENT) uygulanması ile donatı çeliğinin lokalize korozyon eğiliminin belirlenmesi.

Yarı hücre potansiyel yöntemi

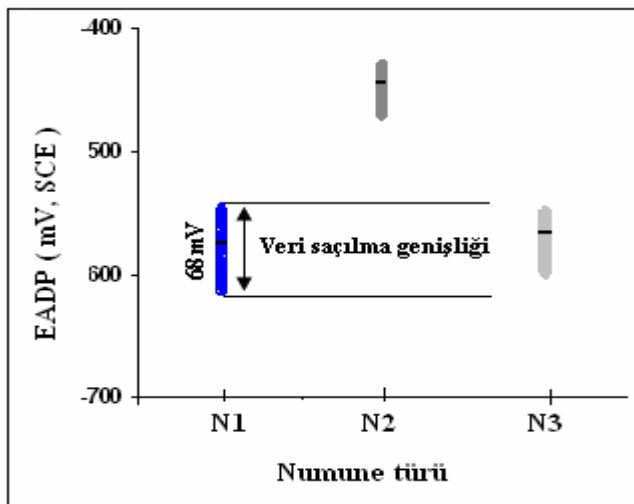
Üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede açık devre potansiyelinin (ADP) ölçülmesine dayanan bu yöntem genel olarak elektrokimyasal korozyon eğilimi hakkında pratik bilgiler vermektedir. Donatının elektriksel yarı hücre potansiyeli ölçümü korozyon riskini belirlemede basit bir yöntem olmasına rağmen elde edilen sonuçların hangi koşullar için güvenilebilir olduğunun yorumunun dikkatli yapılması gerekmektedir. Örneğin klasik uygulamada potansiyelde negatif değerlere kayma eğilimi, yüzey direnç filminin zayıf olduğu ve korozyonun aktifleştiği (hızlandığı) şeklinde yorumlanır. Ancak negatif potansiyele kayma eğilimi her zaman korozyonun hızlanması, pozitif potansiyele kayma eğilimi de yavaşlaması anlamına gelmez. Özellikle genel korozyona izin vermeyen donatı çeliği gibi kompozit malzemelerde görülen lokalize korozyon oldukça karmaşık bir mekanizma gösterir ve korozif ortamda bekleme süresi arttıkça korozyon seyri de değişkenlik gösterir. Üstelik iklim değişimi ve suyun gel-git etkisi gibi korozif ortamı farklılaştıran unsurlar bu değişimi hızlandırabilir. Bu yüzden betonarme yapılarda korozyonun belirlenmesi, çok yönlü araştırmaları gerektirir.

Elektrokimyasal çalışmaların bu bölümünde betonarme numunelere ait açık devre potansiyel değerleri (ADP) suda % 3,5 NaCl içeren korozyon ortamında hazırlanan üç elektrotlu düzenek ile 135 gün boyunca belirli aralıklarla ölçüldü. Her bir ölçüm 0,2 saniye aralıklarla bilgisayar kontrollü olarak elde edilen 18000 potansiyel verisini içerir. Elde edilen potansiyel-zaman grafikleri Şekil 3.4’de görülmektedir. Farklı türdeki numunelerin farklı zaman aralıklarında elde edilen elektrokimyasal ADP verileri toplu olarak grafiklendirilip, numune cinsine, zamana ve ortam koşullarına bağlı potansiyel değişimleri (Şekil 3.4) ve dağılımları (Şekil 3.5) belirlenerek karşılaştırıldı.



Şekil 3.4. Farklı numuneler için elde edilen açık devre potansiyellerinin (E_{ADP}) zamana göre değişimi (N1: 1 no'lu numune, N2: 2 no'lu numune)

Değişken karakterdeki korozyon özelliklerinin daha ayrıntılı incelenebilmesi için veri dağılım grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 3.5'de görüldüğü gibi bu grafiklerdeki değerler ve veri saçılma genişlikleri belirlenerek, örneklerin özellikle kararsız lokalize korozyon eğilimleri karşılaştırılmıştır

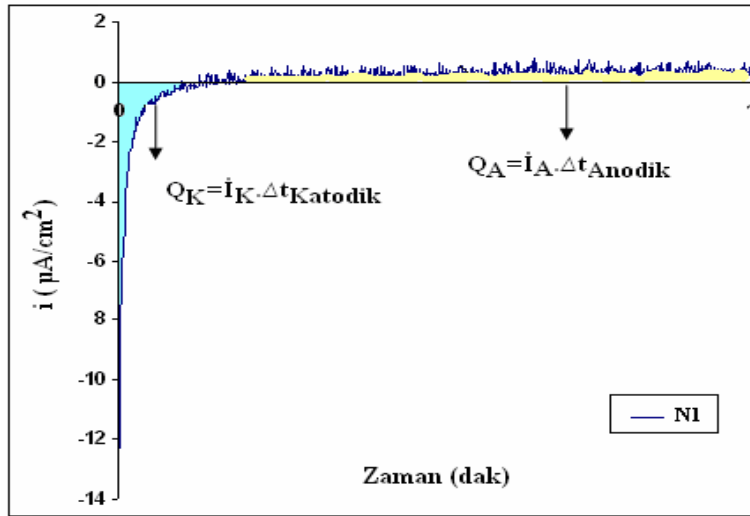


Şekil 3.5. Açık devre potansiyel (E_{ADP}) değerlerinin numune türüne göre değişim ve dağılımları (N: 1 no'lu numune, N2: 2 no'lu numune, N3: 3 no'lu numune)

Kronoamperometrik ölçüm yöntemi

Amperometrik ölçümler sabit gerilim altında geçen akımı ölçmeye dayalı olarak yapılır. Ölçüm sonunda elde edilen zamana karşı akım değerleri, elektrokimyasal reaksiyon hızının bir göstergesidir ve Faraday Kanunu ($Q=i \times t$) ile ifade edilmektedir.

Bu çalışmadaki kronoamperometrik ölçümler farklı zaman aralıklarında ölçülen açık devre potansiyellerinde elde edildi. Belirli günlerde 0,2 saniye aralıklarla bilgisayar kontrollü olarak elde edilen her ölçüm 600 akım verisini içerir. Kronoamperometrik ölçümlerden elde edilen akım - zaman grafiklerinden serbest korozyon yükleri (ADP'deki yükler) Şekil 3.6'da görüldüğü gibi hesaplandı, günlere ve numune cinsine göre yük dağılım grafikleri oluşturuldu.



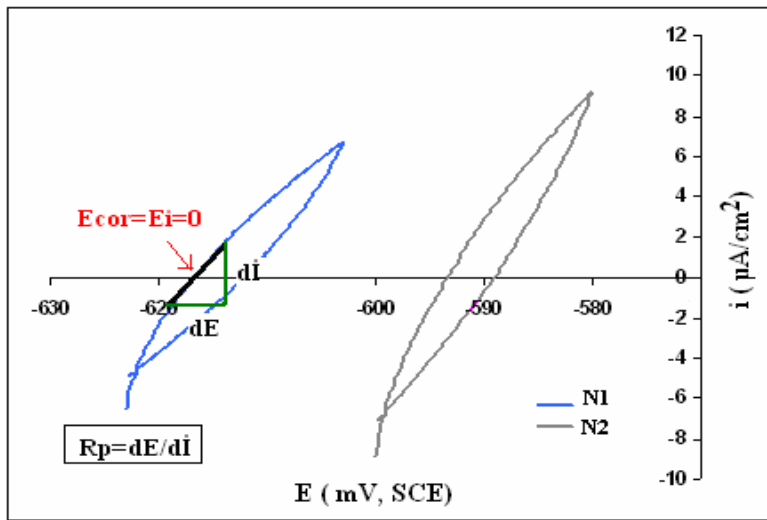
Şekil 3.6. Açık devre potansiyellerindeki korozyon akımlarının zamana göre değişimi (N: 1no'lu numune)

Polarizasyon direnci (R_p) yöntemi

Polarizasyon direnci yöntemi betonda donatı korozyonu direncini belirlemek için kullanılan tahribatsız elektrokimyasal yöntemlerden biridir. Bu çalışmada numuneler üç elektrotlu deney düzeneği ile elektriksel bağlantılı Voltalab 40 PGZ 301 model potansiyostat cihazı ile polarize edilmiştir. Polarizasyon, çalışma elektrotu ile karşıt

elektrot arasında belirli potansiyeller uygulanarak bunlara karşılık gelen akım değerlerinin ölçülmesi prensibine dayanır (Şekil 3.7).

Çizgisel polarizasyon direnci yöntemine göre (Stearn- Geary yöntemi) çalışma elektroduna ait (korozyonu incelenecek malzeme) akım-potansiyel ilişkisi açık devre potansiyelinin(ADP) ± 10 mV civarındaki 20mV'luk küçük bir potansiyel aralığında gerçekleştirildi.



Şekil 3.7. Polarizasyon direnci yöntemine göre elde edilen akım-potansiyel eğrileri(N: 1no'lu numune, N2: 2 no'lu numune)

Bu yöntemle elde edilen akım-potansiyel eğrilerine ait grafiklerden yararlanılarak korozyon potansiyeli (E_{cor}) ve korozyon direnci (R_p) gibi korozyon parametreleri bulundu.

Elektrokimyasal gürültü teknikleri (ENT)

Korozyona uğrayan bir metalin referans elektroda göre potansiyel ve galvanik akımında istatistiksel olarak gözlenen titreşimlere elektrokimyasal gürültü denir. Bu titreşimler elektrotların korozyonu sırasında anodik ve katodik reaksiyonların yüzeyde lokal olarak farklı yoğunluklarda oluşması sonucu yüzeyin farklı yerlerinin farklı elektrik yükü ile yüklenmesinden kaynaklanmaktadır. Bu farklı yüklü yerler

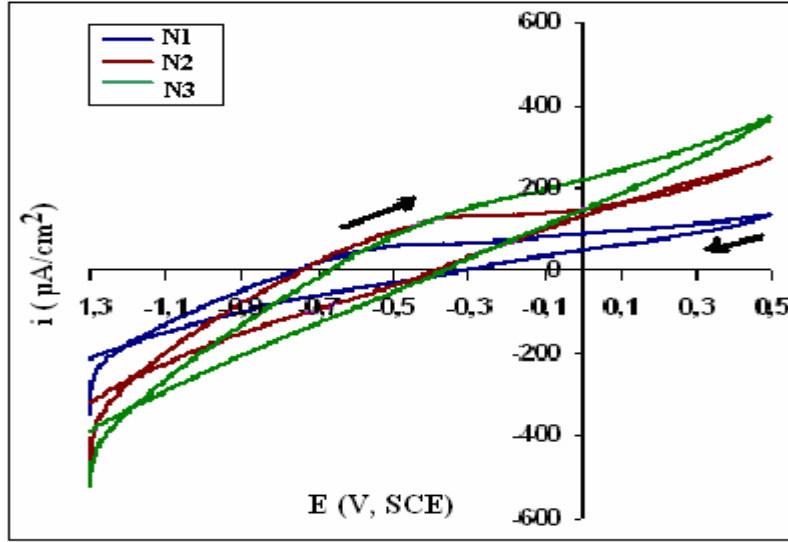
arasındaki yük geçişi elektrokimyasal ölçümlerdeki potansiyel veya akımda hızlı değişmelere yol açar titreşimlere neden olur. Potansiyel veya akımda gözlenen bu titreşimlerin genliği ve frekansı özellikle metaldeki bölgesel (lokal) korozyon için belirleyici özelliklerdir.

Bu çalışmada betonarme numuneler lokalize korozyon bakımından literatürden farklı bir uygulama ile zamana bağlı incelendi ve çeşitli beton türleri karşılaştırıldı. 135 gün süre ile belirli aralıklarla alınan açık devre potansiyel (ADP, yarım hücre potansiyeli) ve ADP'deki akımın zamana göre değişiminde gösterdiği titreşimleri belirlendi ve gürültü ölçüm tekniğine göre düzenlenip değerlendirildi. Bu işlemler belirli günlerde 0.2 saniye aralıklarla bilgisayar kontrollü olarak elde edilen (18.000) potansiyel ve (600) akım verisi için yapıldı. Verilerin 0.2 saniye zaman aralığındaki farkları ardışık olarak alındı ve istatistik hesaplamalar yapılarak karşılaştırıldı.

Tahribatlı yöntemler

Çalışmanın bu bölümünde tahribatlı deneyler Şekil 3.8'de görüldüğü gibi numunelere -1,3V ile +0,5V aralığında anodik ve katodik yönlerde ve 0,5 mV/s potansiyel tarama hızında aşırı polarizasyon uygulanarak gerçekleştirildi.

Islak beton-elik ara yüzeyinde yarı kararlı potansiyodinamik yöntemle elde edilen polarizasyon eğrilerinde, polarizasyon sırasında ara yüzeyde oluşan elektrokimyasal ürünlerin uzaklaşması normal bir çözelti ortamına göre yavaş olmaktadır. Bu nedenle polarizasyon eğrileri (akım-potansiyel eğrileri) 0,5mV/s gibi küçük bir potansiyel tarama hızında elde edildi. Normal bir çözelti ortamındaki kinetik çalışmalarda böyle bir polarizasyon eğrisi genellikle (1-5 mV/s) tarama hızında yapılabilmektedir.



Şekil 3.8. % 3,5 NaCl ortamında bekletilen farklı numunelerin -1,3 V ile 0,5 V aralığında 0,5mV/s potansiyel tarama hızında polarize edilmesi ile elde edilen akım potansiyel eğrileri (N: 1no'lu numune, N2: 2 no'lu numune, N3: 3 no'lu numune)

Potansiyodinamik tarama süresince metal yüzeyinde farklı birkaç kimyasal reaksiyon meydana gelebilir. Genelde anodik polarizasyonda aktif, pasif, transpasif ve yeniden pasifleşme bölgeleri oluşur. Buradan metal veya alaşımlar için korozyon akımı, korozyon potansiyeli, pasifleşme kararlılığı hakkında genel anlamda fikir sahibi olunabilir. Kararlı akım-potansiyel bulguları elde etmek için potansiyodinamik tarama hızının yeterince düşük olması gerekir.

Potansiyodinamik polarizasyon tekniğinde uygulanan potansiyele göre örneğin yüzeyinden geçen akımların izlenmesi esasına göre değerlendirilmektedir. Potansiyodinamik teknikte, uygulanan potansiyeller ile kontrol edilen ortamının koroziv etki derecesine karşı, ölçülen akım değerleri malzemenin korozyon büyüklüğü ile orantılı olur. Belirli bir potansiyel aralığında devreden geçen akımın azalması malzemede korozyon direncinin artışına işaret eder.

Genel korozyona uğrayan bir metalin korozyon hızı, akım-potansiyel eğrilerinden elde edilen kinetik parametrelere göre düzenlenerek belirlenebilir. Bununla beraber elektrotta korozyon sırasında yüzeyin farklı bölgelerdeki farklı hızlarda cereyan

etmiyor ve korozyon hızları lokal değişkenlikler göstermiyorsa veya bu değişkenlikler kabul edilebilir seviyedeysen, bu yöntemler korozyon hızı belirlemede uygun olarak kabul edilebilir. Ancak korozyon bölgesel değişimler gösteriyorsa ve bu durum zaman içinde giderek artıyorsa metalde lokalize korozyon vardır. Böyle bir metalin korozyon hızını ve servis ömrünü bulmak, genel korozyon koşullarına göre daha karmaşıktır. Lokalize korozyonda metalin korozyon özelliklerinde zamana ve ortama göre hızlı değişimler vardır. Bu değişimler deneysel verilerdeki saçılmalar ve veri dağılım aralığının genişlemesi ile ortaya çıkar. Bu oluşum genel anlamda çukur korozyonudur.

Yüzey filmi direnci ve polarizasyon potansiyel duvarı

Aşırı polarizasyon ölçümlerinden elde edilen eğriler üzerindeki anodik ve katodik akımların mutlak değerlerine göre potansiyel duvarları grafikleri oluşturuldu. Bu düzenleme sonucunda, örneklerin korozyon özelliklerinin doğrudan karşılaştırılabileceği aşağıdaki parametreler elde edilmiştir:

Potansiyel Duvarı Genişliği (ΔE_{PD}): Aşırı korozyon koşulları altında, yüzeyde oluşan koruyucu film tarafından akım geçişinin engellendiği potansiyel aralığıdır. Yüzeyde oluşan filmin koruyuculuğu arttıkça potansiyel duvarının genişlemesi beklenmektedir.

Son İndirgenme Potansiyelindeki Akım Miktarı (I_{KS}): Metal yüzeyi ile korozif çevre arasında elektron akış hızının yani filmin elektriksel geçirgenliğinin (indirgenme eğiliminin) bir ölçüsüdür. Bu akımın büyük olması filmin çok çözündüğünü ve poröz olduğunu göstermektedir.

Son Yükseltgenme Potansiyelindeki Akım Miktarı (I_{AS}): Yüzey filmindeki ve buna bağlı olarak metaldeki anodik çözünmenin ölçüsüdür. Bir numunede ΔE_{PD} değeri azalıp I_{KS} ve I_{AS} akımlarının artması yüzey filmi direncinin düşük ve korozyon eğiliminin daha büyük olmasını işaret etmektedir.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Zeolitik Tüfün Pozolan Olarak Kullanılabilirliği

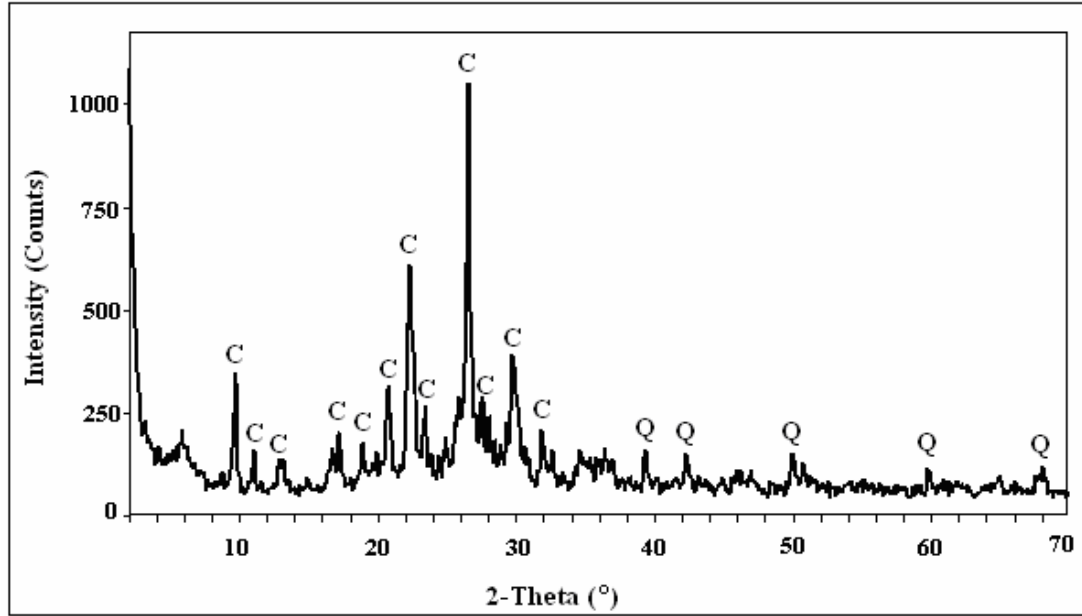
Bu çalışmada ilk olarak ZT numunesinin çimento üretiminde kullanılabilirliğini araştırmak üzere kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri incelendi. Elde edilen sonuçların TS 25, TS EN 196-1, TS EN 196-3 ile karşılaştırılması ayrı başlıklar altında yorumlandı.

ZT numunesinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1’de verildi. Kimyasal analiz sonucu elde edilen değerler TS 25’de belirtilen özellikler ile karşılaştırıldığında; ZT numunesinin $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriğinin % 77,08 değerine ulaştığı ve standart değerlerin üzerinde olduğu ve SO_3 , MgO içeriğinin standart değerlerin altında kaldığı görüldü.

Çizelge 4.1. ZT numunesinin kimyasal analiz sonuçları

SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	Kızdırma kaybı (%)	Toplam (%)
64,59	11,09	1,40	3,59	2,94	0,15	0,00	3,45	5,17	100,1
TS 25				ZT					
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)			>70		77,08				
MgO (%)			<5		2,94				
SO_3 (%)			<3		0,15				

Zeolitik tüf numunesinin X- ışını kırınımı (XRD) analizi sonucuna göre başlıca zeolit (klinoptilolit) minerallerinden oluştuğu belirlendi (Şekil 4.1). Klinoptilolit dışındaki mineral kuvarsdır. Klinoptilolite simektit, feldispat grubu mineraller, biraz camsı madde ve çok az illit mineralleri eşlik etmektedir.



Şekil 4.1. Zeolitik tüf numunesinin XRD deseni (C: Klinoptilolit, Q: Kuvars)

ZT numunesinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için yoğunluk, özgül yüzey, puzolanik aktivite deneyleri (7 günlük eğilme ve çekme dayanımı) yapıldı. ZT numunesinin fiziksel özellikleri ve puzolanik aktivite deneyi sonuçları Çizelge 4.2’de TS 25’te belirtilen standart değerlerle karşılaştırmalı olarak verildi. TS 25’e göre trasların eğilme dayanımının 1 MPa’dan büyük ve basınç dayanımının 4 MPa’dan büyük olması istenmektedir. ZT numunesinin puzolanik aktivite özelliğine sahip olduğu Çizelge 4.2’de görülmektedir. Harç numunesinin eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerinin, TS 25’de istenen minimum değerlerin sırası ile 2,1 ve 2,2 katı olduğu görüldü.

Çizelge 4.2. ZT’ün fiziksel ve mekanik özellikleri

	Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül yüzey (cm ² /g)	Puzolanik aktivite	
			Eğilme dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)
ZT	2,30	6333	2,1	8,5
TS 25		>3000	>1	>4

ZT numunesinin özgül yüzeyinin, TS 25’de istenen minimum değerin 2,1 katı olduğu belirlendi. Örneğin yüksek yüzey alanına sahip olması, yüzey alanı ile artma eğiliminde olan basınç dayanımı üzerine olumlu etki yapmaktadır.

4.2. Çimento Deneyleri

Çimento hamuru karışımlarının ZT yer değiştirme (ikame) miktarı, kıvam suyu miktarları, çimento hamuru priz başlama ve sona erme süreleri ve hacim genleşmesi değerleri Çizelge 4.3’de verildi. Çimento hamurunun priz süresi ve hacim genleşmesi özelliklerinin belirlenmesinde kıvam için 12-14 mm aralığı esas alındı.

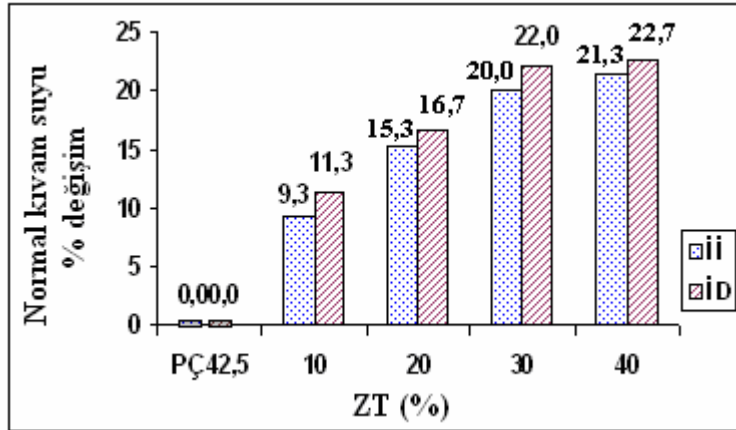
Çizelge 4.3. ZT ikameli çimento hamuru fiziksel özellikleri

Kür tipi	ZT İkame Oranı (%)	ZT İkame Miktarı (g)	Çimento Miktarı (g)	Su Miktarı (ml)	s/b (%)	Priz Başlama Süresi (dak.)	Priz Sona Erme Süresi (dak.)	Katılaşma Süresi (dak.)	Hacim Genleş. (mm)
İİ	0	0	500	150	0,30	160	215	55	1
	10	50	450	164	0,33	150	210	60	1
	20	100	400	173	0,35	130	160	30	2
	30	150	350	180	0,37	135	165	30	2
	40	200	300	182	0,39	140	170	30	3
İD	0	0	500	151	0,30	150	210	60	1
	10	50	450	167	0,33	140	200	60	1
	20	100	400	175	0,35	120	155	35	3
	30	150	350	182	0,37	125	160	35	3
	40	200	300	184	0,38	130	165	35	4

4.2.1. Çimentoda standart kıvam tayini

Şekil 4.2’de çimento hamurlarının kıvam suyu analiz edildiğinde; ZT katkısı, CEM I 42.5 R çimentosuyla ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirilerek kullanıldığında normal kıvam için gereken içme suyunun sırasıyla; % 9,3, % 15,3, % 20,0 ve % 21,3 oranında arttığı görüldü. Buna göre çimento içerisindeki ZT ikame oranı arttıkça, normal kıvam için gereken su miktarı da artmaktadır. Bu bulgulara

göre % 30 ZT miktarından sonra su ihtiyacı önemli derecede değişim göstermedi. ZT'ün özgül ağırlığının 2,30 ve özgül yüzeyinin 6333 cm²/g olması yani çimentoya göre daha hafif ve ince olması, çimento hamurunun normal kıvam suyu gereksinimini arttırmaktadır.



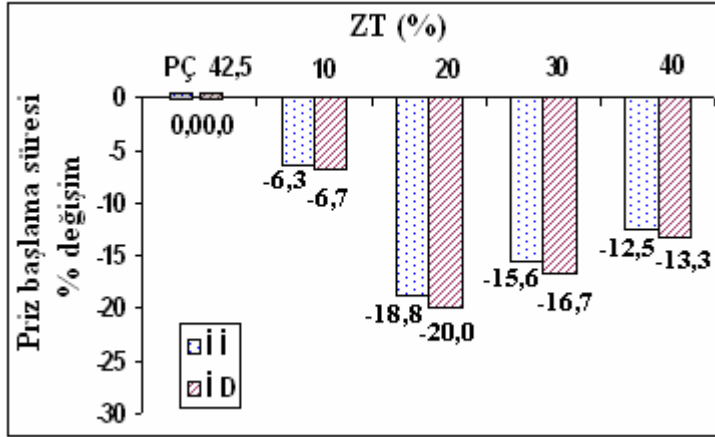
Şekil 4.2. ZT ikameli çimento hamurlarının kıvam suyu miktarının kontrol numunesine göre % değişim oranları

4.2.1. Çimento priz süreleri

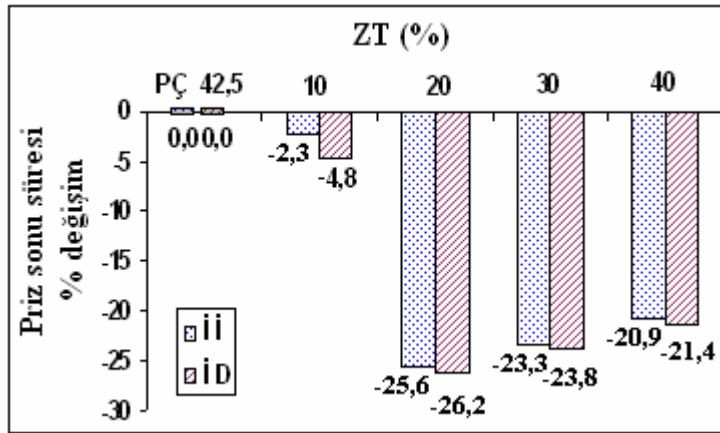
Şekil 4.3'de ZT katkısı, CEM I 42.5 R çimentosuyla ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirilerek kullanıldığında II grup çimento hamurlarının priz başlangıç ve Şekil 4.4'de priz sona erme sürelerinin sırasıyla; % 6,3, % 18,8, % 15,6, % 12,5 oranında ve % 2,3, % 25,6, % 23,3, % 20,9 oranında azaldığı görüldü. % 20 ZT ikameli çimento hamurunun priz başlama ve sona erme süresi en kısa olduğu; bu orandan daha fazla ZT katkılarında ise jelleşme reaksiyon süreleri bir miktar artmaktadır. Bu durum iyonik karakterli ZT miktarındaki belirli bir orandan sonraki artışla suyun aktifliğinin azalması ile açıklanabilir.

Çimento hamurunun priz süreleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de görüldüğü gibi normal kıvam suyundaki artışla ters orantılı olarak azalmaktadır. Bu bulgulara göre priz başlangıcı ve priz sonu süreleri ZT katkı oranının artışı ile kısalmaktadır. Bu bulgu

ZT'ün özgül yüzeyinin çimentodan fazla olması ve taneler inceldikçe aynı sürede hidratasyona giren tane miktarı artması teorisini doğrulamaktadır.



Şekil 4.3. ZT ikameli çimento hamurlarının priz başlangıcı süresinin kontrol numunesine göre % değişim oranları



Şekil 4.4. ZT ikameli çimento hamurlarının priz sonu süresinin kontrol numunesine göre % değişim oranları

Deniz suyunun olgunlaştırma ortamı olarak kullanıldığı İD grup çimento hamurları, priz başlangıç süreleri bakımından İİ grupla karşılaştırıldığında birbirine benzer özellikler gösterdiği belirlendi. Ancak deniz suyundaki yüksek iyonik aktivitenin priz reaksiyonunu hızlandırdığı, priz başlangıç ve sona erme sürelerini bir miktar kısalttığı görüldü.

Yapılan bir araştırmada deniz suyunun beton karma suyu olarak kullanılabilirliği araştırılmış ve deniz suyunun şehir şebeke suyuna göre, betonda priz sürelerini hızlandırdığı ve kıvamı düşürdüğü tespit edilmiştir [98]. Deneysel bulgulara göre deniz suyunun olgunlaştırma suyu olarak kullanılması, priz sonu ve başlangıcı sürelerini kısaltması ile literatüre paralel bir durum göstermektedir.

4.2.3. Çimento hacim genleşmesi

Çizelge 4.3 analiz edildiğinde, hacim genleşmesi değerlerinin % 20 ve üzeri ZT karışım oranlarında arttığı, bu artışın İD gruplarda İİ gruplara göre biraz daha fazla olduğu görüldü. % 20 ZT ikameli İD grup çimento harçlarında hacim genleşmesinin 3mm, % 40 ZT ikameli İD grup çimento harçlarında hacim genleşmesinin 4mm olmasına rağmen TS EN 196-3’de önerilen sınırın oldukça altındadır.

4.3. Çimento Harçlarının Mekanik Özellikleri

Çimento harçlarının mekanik özelliklerini belirlemek için 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları incelendi.

4.3.1. Çimento harçlarının eğilme dayanımı sonuçları

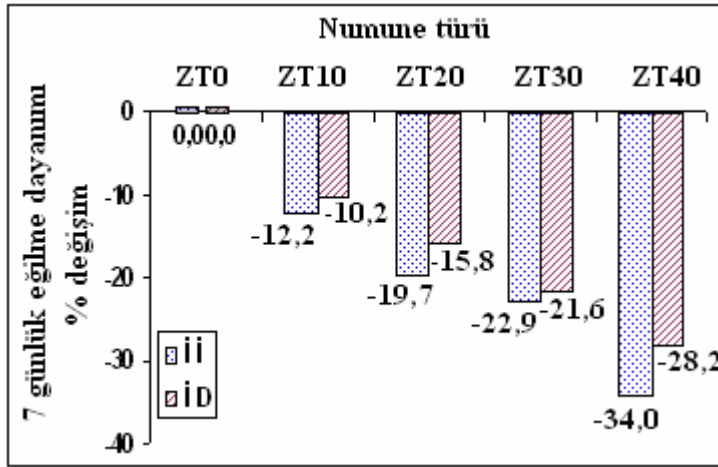
ZT katkılı çimento harç prizmalarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.4’de verildi. ZT’ün çimento içerisine ikame oranı, karışım ve olgunlaştırma suyu etkisinin çimento harcının mekanik özelliklerine etkisi incelendi. Çizelge 4.4 incelendiğinde 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarında en yüksek dayanımı kontrol numuneleri verirken, en düşük dayanımı % 40 ikameli karışım numuneleri verdi. En yüksek ve en düşük numune dayanım farkının (İİ grup) sırasıyla 7 günlükte 2,79 MPa, 28 günlükte 2,71 MPa ve 90 günlükte 1,88 MPa olduğu saptandı. Bu farklar analiz edildiğinde, harç numunelerinin test yaşları arttıkça aradaki farkın azaldığı söylenebilir.

Çizelge 4.4'e göre İD grup örneklerde de 7 ve 28. günlerde yapılan eğilme dayanımı deneylerine göre en yüksek değerler kontrol numuneleri için bulundu. En yüksek ve en düşük numune dayanım farkının sırasıyla 7 günlükte 2,82 MPa, 28 günlükte 2,01 MPa ve 90 günlükte 1,90 MPa olduğu saptandı.

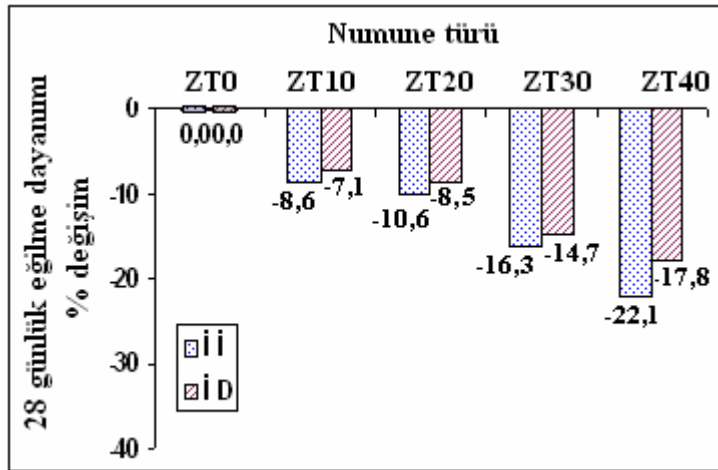
Çizelge 4.4. Harç prizmalarının eğilme dayanım değerleri

Kür türü	Numune türü	Eğilme dayanımı (MPa)		
		7 gün	28 gün	90 gün
İİ	ZT0	5,6	6,8	7,2
	ZT10	4,9	6,2	7,5
	ZT20	4,5	6,1	7,4
	ZT30	4,3	5,7	6,5
	ZT40	3,7	5,3	6,1
İD	ZT0	5,7	6,8	7,0
	ZT10	5,1	6,3	7,2
	ZT20	4,8	6,2	7,1
	ZT30	4,5	5,8	6,0
	ZT40	4,1	5,6	5,8

Şekil 4.5'de 7 ve 28 günlük İİ grup ZT10, ZT20, ZT30 ,ZT40 harç numunelerinin eğilme dayanımlarının kontrol numunesine göre sırasıyla % 12,2, % 19,7, % 22,9, % 34,0 ve % 8,6, % 10,6, % 16,3, % 22,0 oranında azaldığı görüldü. 7 ve 28 günlük İD grup harç prizma numunelerinin eğilme dayanımları ise (Şekil 4.5, Şekil 4.6) İİ grup numunelere göre daha yüksektir.



Şekil 4.5. ZT ikameli harç numunelerinin 7 günlük eğilme dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları

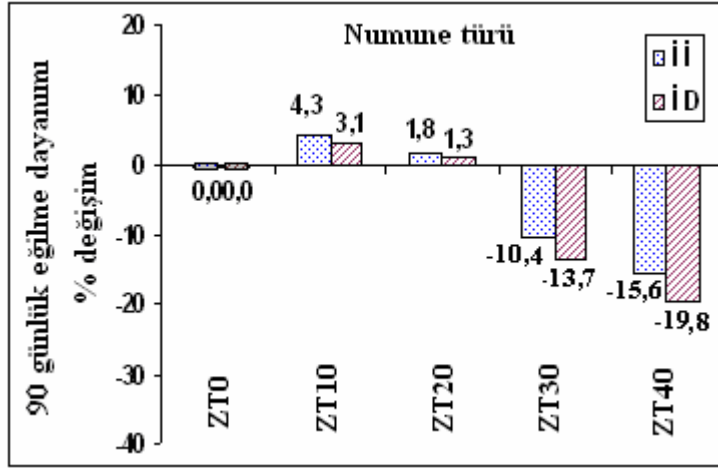


Şekil 4.6. ZT ikameli harç numunelerinin 28 günlük eğilme dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları

Şekil 4.7’de 90 günlük İİ grup ZT10, ZT20, ZT30 ,ZT40 harç numunelerinin eğilme dayanımlarının kontrol numunesine göre sırasıyla % 4,3, % 1,8 oranında arttığı ve % 10,4 ve % 15,6 oranında azaldığı görüldü.

Şekil 4.7’ye göre 90 günlük İD grup harç prizma numunelerinin, İİ grup numunelere göre eğilme dayanımlarının 7 ve 28. günlerdeki bulguların tersine daha düşük olduğu görüldü. Bu durum kimyasal açıdan değerlendirildiğinde deniz suyundaki jelleşme

tatlı suya göre daha hızlıdır. Ancak deniz suyunda bekleme süresi arttığında oluşan kimyasal yapının bağları (C-S-H jelleri) da daha hızlı bozulmaktadır.



Şekil 4.7. ZT ikameli harç numunelerinin 90 günlük eğilme dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları

4.3.2. Çimento harçlarının basınç dayanımı sonuçları

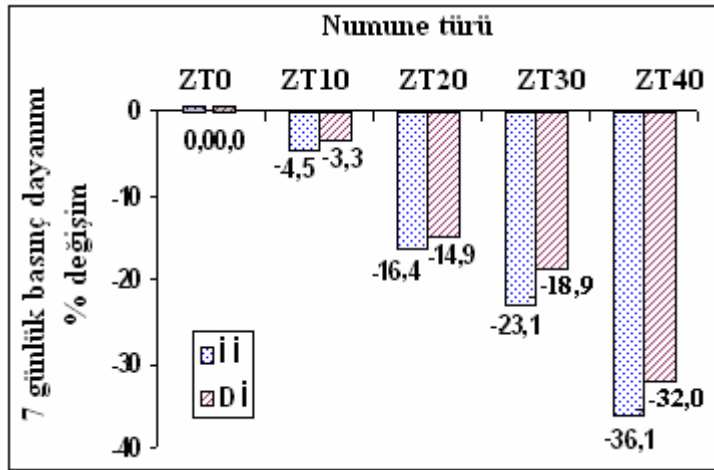
ZT katkılı çimento harç prizmalarının 7, 28 ve 90 günlük basınç test sonuçları Çizelge 4.5’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre İİ ve İD grup örneklerde test günü arttıkça basınç dayanımının bütün ikame oranlarında arttığı görüldü. İİ grup numunelerde 7 ve 28. günlerdeki yaşlarda ikame oranı arttıkça çimento harçlarının basınç dayanımı düşmüştür. Bu grupta en yüksek dayanım kontrol örneklerinde, en düşük dayanımı ise % 40 ikameli karışımlarda görüldü. 7 günlük basınç dayanımında en yüksek ve en düşük arasındaki farkın 15,71 MPa, 28 günlük numunelerde 15,06 MPa, 90 günlük numunelerde ise 14,75 MPa olduğu belirlendi.

İD grup numuneler analiz edildiğinde (Çizelge 4.5) bütün yaşlarda ikame oranı ile basınç dayanımı arasında ters ilişki olduğu görüldü. Bu grubun en yüksek dayanımı kontrol örneklerinde, en düşük dayanımı ise % 40 ikameli karışımlarda saptandı. 7 günlük basınç dayanımında en yüksek ve en düşük arasındaki farkın 16,13 MPa, 28 günlük numunelerde 14,01 MPa, 90 günlük numunelerde ise 13,26 MPa olduğu belirlendi.

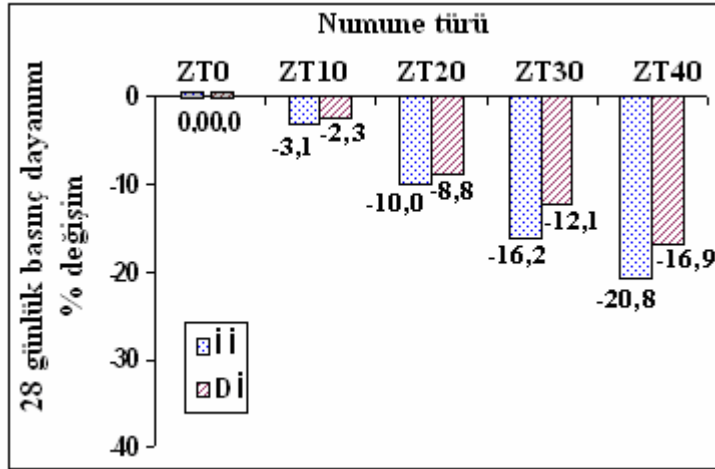
Çizelge 4.5. Harç prizmalarının basınç dayanım değerleri

Kür türü	Numune türü	Basınç dayanımı (MPa)		
		7 gün	28 gün	90 gün
İİ	ZT0	35,3	47,9	56,7
	ZT10	33,7	46,5	59,6
	ZT20	29,5	43,1	58,8
	ZT30	27,2	40,2	57,9
	ZT40	22,6	38,0	49,9
İD	ZT0	37,5	48,5	55,0
	ZT10	36,2	47,4	57,3
	ZT20	31,9	44,2	56,0
	ZT30	30,4	42,6	54,6
	ZT40	25,4	40,3	46,7

Şekil 4.8’de 7 ve 28 günlük İİ grup ZT10, ZT20, ZT30 ,ZT40 harç numunelerinin basınç dayanımlarının kontrol numunesine göre sırasıyla % 4,5, % 16,4, % 23,1, % 36,1 ve % 3,1, % 10,0, % 16,2, % 20,8 oranında azaldığı görüldü. 7 ve 28 günlük İD grup harç prizmalarının basınç dayanımları ise (Şekil 4.8, Şekil 4.9) İİ grup numunelere göre daha yüksektir.



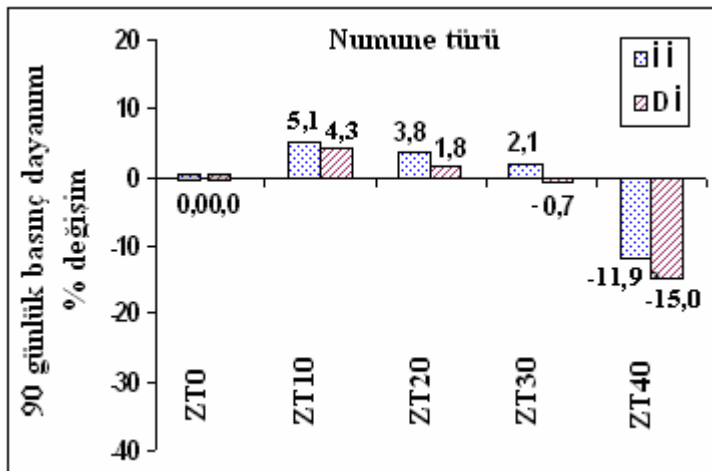
Şekil 4.8. ZT ikameli harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları



Şekil 4.9. ZT ikameli harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları

Şekil 4.10'da 90 günlük İİ grup ZT10, ZT20, ZT30, ZT40 harç numunelerinin basınç dayanımlarının kontrol numunesine göre sırasıyla % 5,1, % 3,8, % 2,1 oranında arttığı ve % 11,9 oranında azaldığı görüldü.

Şekil 4.10'a göre 90 günlük İD grup harç prizma numunelerinin, İİ grup numunelere göre basınç dayanımlarının 7 ve 28. günlerdeki bulguların tersine daha düşük olduğu görüldü.



Şekil 4.10. ZT ikameli harç numunelerinin 90 günlük basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları

Yapılan araştırmalara göre deniz suyunun içerdiği çeşitli tuzlar nedeniyle (NaCl , CaCl_2 , vb.) deniz suyu betonun priz süresini kısaltıcı ve erken dayanımını bir miktar yükseltici bir etki gösterebilir. Ancak, deniz suyunda bulunan sülfat iyonları (MgSO_4 , CaSO_4) dayanıklılığı ve 28. günden sonraki dayanımları olumsuz etkilemektedir [99]. 90 günlük İD grup harç prizma numunelerinin, İİ grup numunelere göre basınç dayanımlarının daha düşük olması literatüre paralel bir göstermektedir.

4.4. Taze Beton Deney Sonuçları

ZT katkı oranlarına göre beton karışımların çökme değerleri, hava miktarı içeriği ve beton birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Taze beton özellikleri

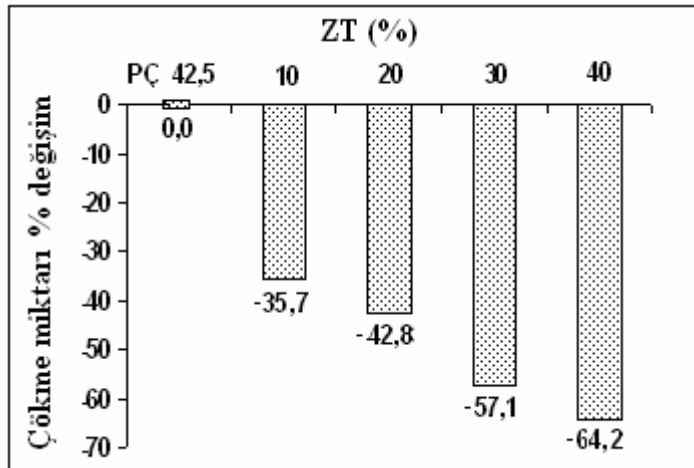
ZT katkı oranı (%)	Çökme (mm)	Hava Miktarı (%)	Birim hacim ağırlık (kg/dm^3)
PÇ 42,5	70	3,4	2,538
10	45	2,8	2,397
20	40	2,6	2,320
30	30	2,5	2,288
40	25	2,3	2,252

Çizelge 4.6’ya göre % 3,4 - % 2,3 oranında hava içeriği belirlenen beton karışımlarda, bu değerlerin standartta belirtilen miktarı aşmadığı ve ZT içeren beton karışımlarındaki hava miktarı kontrol karışımlarına göre daha düşük olduğu belirlendi. Ayrıca ZT katkı miktarı arttıkça beton birim hacim ağırlık değerleri de azaldı. Karışımlardaki ZT oranının artması ile bu fark daha belirgin hale geldi.

Beton karışımındaki hava miktarının azalması ve çeşitli katyonik ve anyonik grupların ZT ikame oranına bağlı olarak artması, jelleşme sırasında tanecikler arası bağlanmaları arttırarak (puzolanik reaksiyonlar) jelleşmenin tanecikli yapıdan sürekli

yapıya dönüşme eğilimini artırır. Böylece oluşan puzolanik ürünlerin çimento hamuru matrisinde ve çimento hamuru-agrega ara yüzeyinde meydana getirdiği boşluklar da azalır ve betonun çevrenin fiziksel ve kimyasal etkilerine karşı daha dayanıklı olması sağlanır.

Şekil 4.11’de ZT katkısı, CEM I 42.5 R çimentosuyla ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirilerek kullanıldığında beton karışımları çökme miktarlarının kontrol numunesine göre % 35,7, % 42,8, % 57,1 ve % 64,2 oranında azaldığı görüldü. Doğal zeolit içeren katkılı beton karışımların normal kıvam suyu ihtiyaçları, ZT ikame miktarı ile doğrusal olarak arttığından, sabit s/ç oranına sahip beton karışımlarının çökme değerleri azalmaktadır.



Şekil 4.11. ZT ikameli beton karışımların çökme miktarının kontrol numunesine göre % değişim oranları

4.5. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Çalışmanın bu aşamasında çeşitli beton numunelerin basınç dayanımları, klor iyonu geçirimsizlikleri, su işleme derinlikleri, ultrases hızları ve beton boşluk miktarları belirlendi.

4.5.1. Beton basınç dayanımı

CEM I 42,5 R çimentosu içerisine farklı oranlarda ZT ilave edilerek üretilen betonlara ait (ZT0, ZT10, ZT20, ZT30, ZT40) 7, 28, 90 ,180 ve 360 günlük basınç dayanımı deneyi sonuçları Çizelge 4.7’de, basınç dayanım değerlerinin günlere, numune ve olgunlaştırma suyu türüne göre değişimleri ise Şekil 4.11-Şekil 4.14’de görülmektedir.

Çizelge 4.7 toplu olarak gösterilen sonuçlara göre deniz suyunun 28. güne kadar beton basınç dayanımlarını olumlu yönde etkilemesine rağmen, 90.gün ve sonrasında olumsuz etkilediği görüldü.

ZT10 beton numunelerinde 7 ve 28.günlerde kontrol numunelerine (ZT0) yakın değerlerde olduğu belirlenen basınç dayanım bulgularının, 90. gün ve üzeri yaşlarda tüm ZT katkılı beton numuneleri için kontrol numunelerinden daha yüksek olduğu görüldü (Çizelge 4.7).

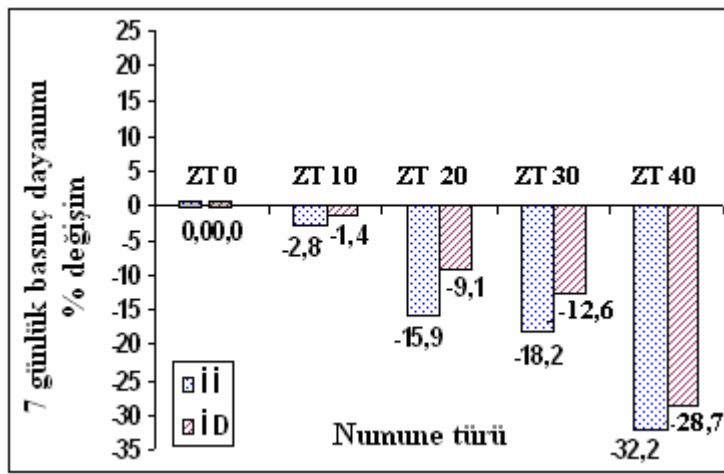
Çizelge 4.7. Beton numunelerin basınç dayanım değerleri

Kür türü	Numune türü	Basınç dayanımı (MPa)				
		7 gün	28 gün	90 gün	180 gün	360 gün
İİ	ZT 0	21,4	30,2	39,3	43,1	60,2
	ZT 10	20,8	29,4	42,1	49,7	71,2
	ZT 20	18,0	28,3	41,8	47,4	68,6
	ZT 30	17,5	25,8	36,2	46,2	65,5
	ZT 40	14,5	24,5	34,4	44,8	63,4
İD	ZT 0	23,0	33,8	36,5	40,9	57,9
	ZT 10	22,6	33,6	38,2	45,3	65,5
	ZT 20	20,9	31,7	35,9	44,1	64,2
	ZT 30	20,1	29,8	32,6	43,6	61,8
	ZT 40	16,4	28,3	31,4	41,5	60,3

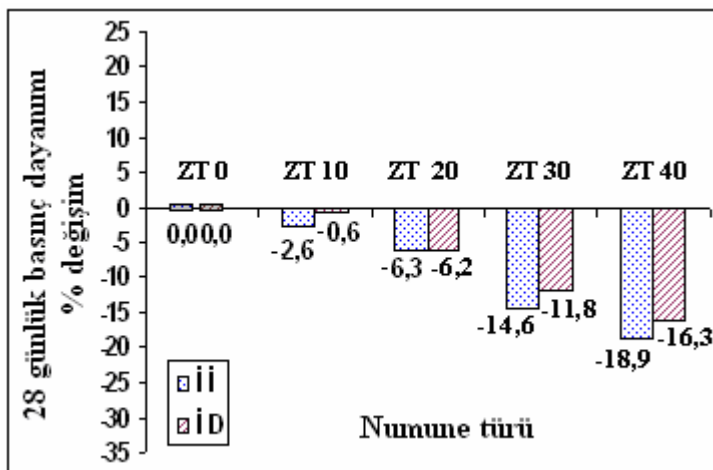
Şekil 4.12’ye göre 7 günlük İİ grup ZT10, ZT20, ZT30 ve ZT40 beton numunelerinin basınç dayanımının kontrol numunesine göre sırasıyla % 2,8, % 15,9,

% 18,2 ve % 32,2 oranında azaldığı görüldü. Şekil 4.12 ve 4.13 birlikte incelendiğinde betondaki ZT katkı oranının artması ile numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının kontrol numunelerine göre azaldığı görüldü.

7 ve 28 günlük İİ ve İD grup örnekler birlikte değerlendirildiğinde deniz suyu kür edilen numunelerin (İD) daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği görüldü (Şekil 4.12 - Şekil 4.13).



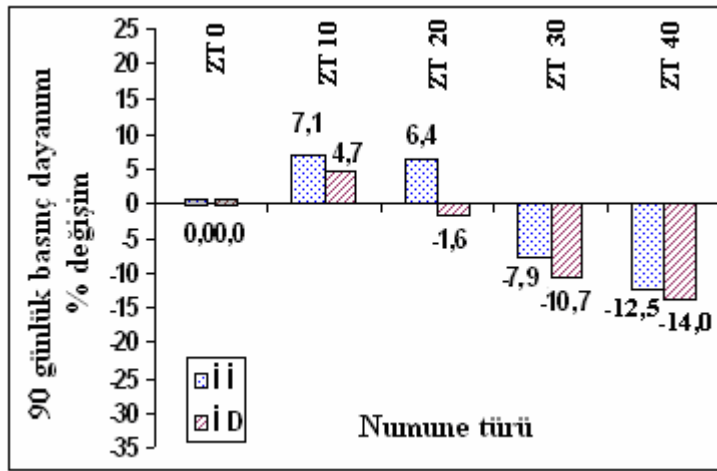
Şekil 4.12. ZT ikameli 7 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları



Şekil 4.13. ZT ikameli 28 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları

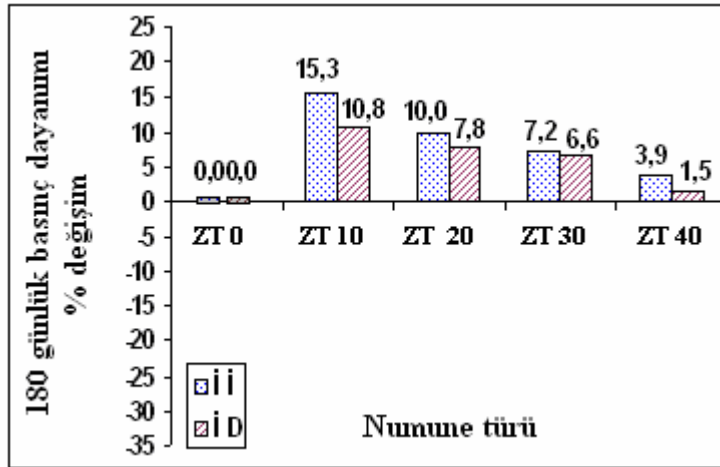
Şekil 4.14’de gösterilen deney sonuçlarına göre İİ grup ZT10 ve ZT20 beton numunelerine ait 90 günlük basınç dayanım değerlerinin kontrol numunelerinden (ZT0) sırasıyla %7,1 ve %6,4 daha yüksek; ZT30 ve ZT40 beton numunelerin ise sırasıyla %7,9 ve % 12,5 daha düşük olduğu görüldü.

Deniz suyunda kür edilme süreleri artan 90, 180 ve 360 gün olan İD grup numunelerin basınç dayanımlarının, İİ grup numunelere göre daha düşük olduğu görüldü (Şekil 4.14 - Şekil 4.16).

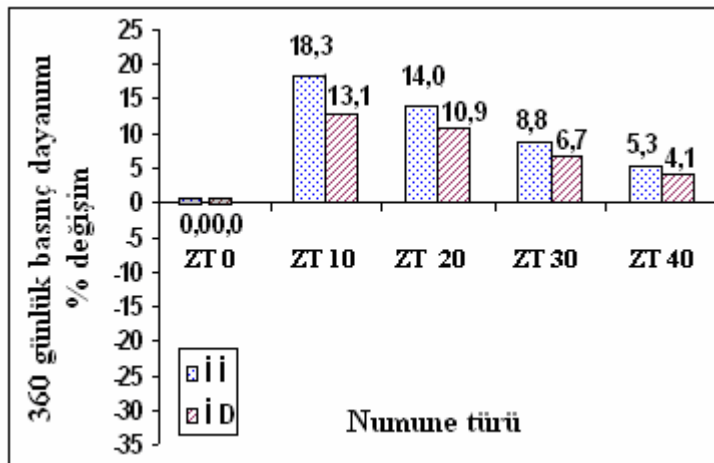


Şekil 4.14. ZT ikameli 90 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 incelendiğinde İİ grup ZT10, ZT20, ZT30, ZT40 beton numunelerin 180 ve 360 günlük basınç dayanım değerlerinin kontrol numunelerinden sırasıyla; %15,3, %10,0, %7,2, %3,9 ve %18,3, %14,0, %8,8, %5,3 daha yüksek olduğu görüldü.



Şekil 4.15. ZT ikameli 180 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine % göre değişim oranları



Şekil 4.16. ZT ikameli 360 günlük betonların basınç dayanımının kontrol numunesine göre % değişim oranları

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.16'ya göre yüksek miktarda (%40) ZT ikamesi ile hazırlanan beton numuneler bile kontrol numunelerinden daha yüksek basınç dayanımı performansı göstermiştir. Bu durumda %40 daha az Portland çimentosu kullanılarak (228kg/m^3) 360. günde 63,4 MPa basınç dayanımı gösteren bir beton karışımı elde edilmiştir.

Yapılan araştırmalara göre %15, %35, %55 Bigadiç zeoliti kullanılarak üretilen betonların 7 günlük basınç dayanımlarının kontrol numunelerinden düşük, 28.gün ve

üzeri yaşlarda tüm ikamelerde kontrol numunelerine göre yüksek olduğu bulunmuştur [100]. Bu çalışmada da ZT katkısının 90.gün ve üzeri yaşlarda beton basınç dayanımı olumlu etkilemesi literatüre paralel bir durum göstermektedir.

Yukarıdaki bulgulara göre ZT katkılı çimento hamurundaki yüksek silis bileşimi puzolanik reaksiyonları ve betonların basınç dayanım değerlerini arttırmaktadır. Bu durum yüksek iyonik aktivitedeki karışımın jelleşme sırasında ara yüzeylerde artan iyon-dipol, dipol-dipol etkileşim kuvvetinin artması ile açıklanabilir. Böyle bir etkileşim sonucunda çimento matrisi ve çimento hamuru-agrega ara yüzeylerinde gerçekleşen puzolanik reaksiyonlar ile tanecikli yapı yerine betonda sürekliliği sağlayan daha homojen, boşluksuz bir yapılanma oluşur ve betondaki zayıf noktalar azalır.

4.5.2. Hızlı klor iyonu geçirimsizliği

ASTM C 1202'e göre 360 günlük beton numunelerde elektriksel gerilim uygulaması ile hızlandırılan klor iyonu difüzyonuna bağlı elektriksel yük miktarları (betonun klorür iyonu geçirimsizliği ile doğru orantılı olan) Çizelge 4.8'de verildi.

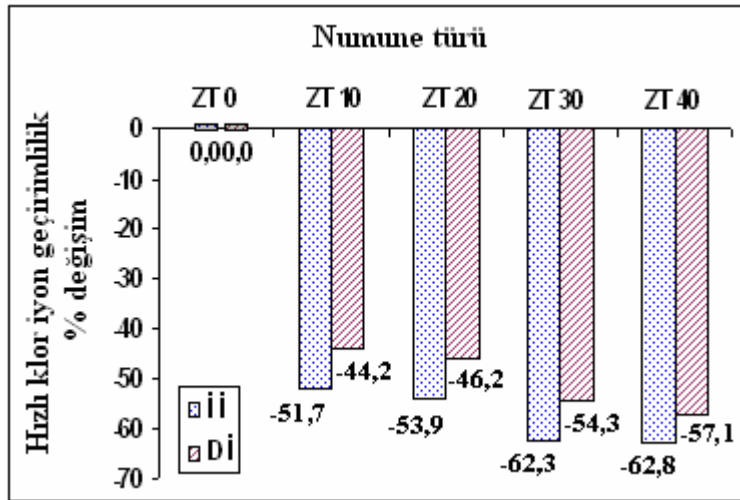
Çizelge 4.8. 360 günlük beton numunelerin elektrik akımı etkisi altında klorür iyonu geçirimsizliğine ait yük değerleri

Kür türü	Numune türü	Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)
İİ	ZT 0	2560
	ZT 10	1235
	ZT 20	1180
	ZT 30	965
	ZT 40	950
İD	ZT 0	2780
	ZT 10	1550
	ZT 20	1495
	ZT 30	1270
	ZT 40	1190

Şekil 4.17’deki deneysel bulgulara göre İİ grup ZT10, ZT20, ZT30 ve ZT40 beton numunelerin hızlı klor iyon geçirimliliklerinin kontrol numunesine göre sırasıyla % 51,7, % 53,9, % 62,3 ve % 62,8 oranında azaldığı görüldü.

Betonda klor geçirimliliğine karşı görülen bu azalış betondaki ZT katkısının sulu ortamda klorür iyonunun difüzyonunu sağlayan boşluk miktarının azalmasını dolaylı yoldan gösteren diğer bir bulgudur. ZT ikamesiyle elde edilen beton karışımları, kontrol karışımlarına kıyasla çok daha düşük klor iyon geçirgenliği göstererek, ASTM C 1202 sınıflandırmasına göre “düşük geçirgenlik” sınıfına girmişlerdir.

Olgunlaştırma suyu cinsinin beton özelliğine etkisi incelendiğinde ise İD grup beton numunelerin, İİ grup beton numunelerine göre klor geçirimlilikleri daha yüksektir.



Şekil 4.17. ZT ikameli 360 günlük betonların klor iyon geçirimliliklerinin kontrol numunesine göre % değişim oranları

4.5.3. Beton su işleme derinliği

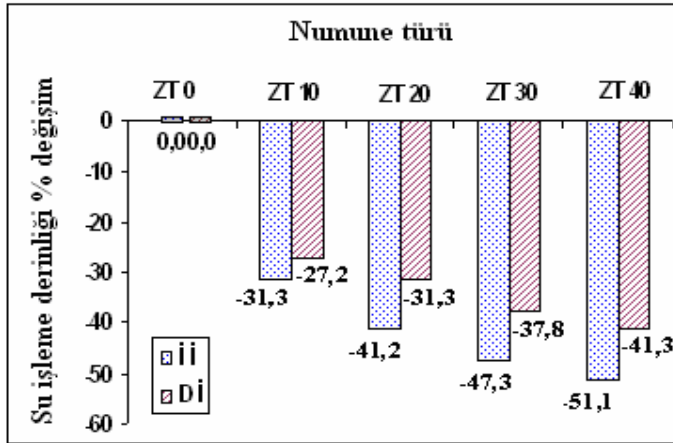
90 günlük küp beton numuneler üzerinde yapılan beton su işleme derinliği deney sonuçları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. 90 günlük beton numunelerin su işleme derinlik miktarları

Kür türü	Numune türü	Su işleme derinliği (mm)
İİ	ZT0	47,5
	ZT10	32,6
	ZT20	27,9
	ZT30	25,0
	ZT40	23,2
İD	ZT0	41,8
	ZT10	30,4
	ZT20	28,7
	ZT30	26,0
	ZT40	24,5

Beton numunelerde suyun işleme derinliği boşluk ve boşlukların bir biriyle bağlantısı ile ilişkilidir. Betonun su geçirimsizliği, içindeki boşluk oranına bağlıdır. Boşluk oranı ile sürekli yani birbiri ile bağlantılı boşluklar kastedilmektedir. Kapalı boşlukların kılcallık ve su emmeye herhangi bir etkisi yoktur. Büyüklü küçüklü, sürekli veya süreksiz olabilen bu boşlukların betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkilediği bilinmektedir. Bu yüzden beton numunelerin bu özelliğini araştırmak üzere su işleme özellikleri incelendi (Şekil 4.18).

Şekil 4.18’ e göre İİ grup ZT10, ZT20, ZT30 ve ZT40 beton numunelerinin su işleme derinlik miktarlarının kontrol numunesine göre sırasıyla % 31,3, 41,2, 47,3 ve % 51,1 oranında azaldığı görüldü. Zeolitin normal çimentoya göre özgül yüzeyinin büyük olması moleküler elek özelliğini artırarak suyun ve çeşitli iyonların beton içindeki mobilitesini ve aktifliğini azaltan bir etki oluşturur. Deneysel çalışmada bu durum kendisini ıslanmanın ve geçirimsizliğin azalması şeklinde gösterir.



Şekil 4.18. ZT ikameli 90 günlük betonların su işleme derinliklerinin kontrol numunesine göre % değişim oranları

Farklı ZT katkılı İD grup beton küp numunelerinin su işleme derinlik miktarlarına ait resimler verilmiştir (Resim 4.1). Bu resimlerden de görüldüğü gibi ZT katkı miktarı arttıkça beton su işleme derinliğinin kontrol numunelerine göre azaldığı görülmektedir.



Resim 4.1. Farklı oranlarda ZT içeren betonların su işleme derinlik miktarları
(a) ZT0 (b) ZT10 (c) ZT20 (d) ZT30 (e) ZT40

4.5.4. Beton ultrases hızı

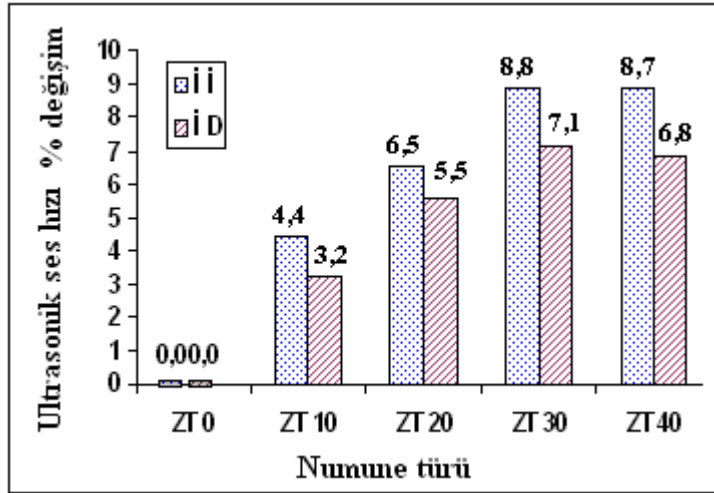
Çalışmanın bu bölümünde 90 günlük çeşitli betonlara ait ultrasonik ses hızları kontrol numunesi ile karşılaştırılarak ölçülen boşluk yoğunluğu ile ilişkisi incelendi (Çizelge 4.10).

Yoğunluğu az olan yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda ses dalgasının betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bu bulgu betonun ultrasonik ses dalga hızları ile boşluk miktarının ters orantılı olarak değişmesi anlamına gelir. Her hangi bir beton içerisinden geçen ses dalgasının hızı o betonun içerdiği boşluk miktarı ve yoğunluğu ile yakından ilgili olduğu için, elde edilen ses hızları ile beton kalitesi hakkında genel bir fikir sahibi olunabilir.

Çizelge 4.10. Beton numunelerin ultrases hızı ve boşluk oranı değerleri

Kür türü	Numune türü	Ultrases Hızı (km/s)	Boşluk Oranı (%)
İİ	ZT0	5,146	8,24
	ZT10	5,375	6,69
	ZT20	5,483	6,38
	ZT30	5,602	5,53
	ZT40	5,600	5,50
İD	ZT0	4,896	8,32
	ZT10	5,054	6,80
	ZT20	5,168	6,45
	ZT30	5,246	5,68
	ZT40	5,230	5,65

İİ grup ZT10, ZT20, ZT30 ve ZT 40 beton numunelerinin ultrasonik ses hızlarının kontrol numunesine göre sırasıyla % 4,4, % 6,5, % 8,8 ve % 8,7 oranında arttığı görüldü (Şekil 4.19). Doğal mineral olan zeolitın çimentoya ilave edilen diğer mineral katkılara göre üstünlüğü düşük yoğunluğu, kristal yapısının bozulmadan dehidrasyona uğrayabilmesi, yüksek silis bileşimine bağlı iyon değişim kapasitesi ve moleküler elek özelliği gibi birçok elverişli koşulları sağlamasından kaynaklanır.



Şekil 4.19. ZT ikameli 90 günlük betonların ultrases hızının kontrol numunesine göre % değişim oranları

4.6. Betonarme Numunelerin Elektrokimyasal Korozyon Çalışmaları

Çalışmanın bu bölümünde farklı oranlarda ZT içeren betonarme numunelerin doğal ortamda ve zaman içinde karşılaştıkları çevre değişim etkileri laboratuvar koşullarında tahribatsız ve tahribatlı elektrokimyasal uygulamalarla araştırılarak korozyon eğilimleri karşılaştırıldı.

Çevre koşullarının değişmesine bağlı olarak gelişen donatı çeliği korozyonu, yukarıda verilen tahribatlı ve tahribatsız yöntemler kullanılarak bir birini takip eden üç aşamada (A-B-C aşamaları) ve çeşitli yönleriyle incelendi.

A: % 3,5 NaCl içeren sulu ortamdaki betonarme numuneler 98 gün boyunca sudan çıkarılmamış ve bu süreçte beton içindeki donatı çeliği elektrokimyasal denge değerlerine ulaşırken korozyon eğilimleri serbest korozyon koşullarında (tahribatsız elektrokimyasal yöntemler kullanılarak) belirlendi. A koşulunda elde edilen veriler başlangıç (1-3.günler “A₁”) ve dengeye gelme (39-86. günler “A₂”) durumu olmak üzere kendi içerisinde iki farklı aşamada değerlendirildi.

B: Betonarme numuneler 98. günün sonunda tuzlu sudan çıkarılarak 3 gün boyunca açık havada oksijeni daha bol bir ortamda bırakılarak oksidasyon şekli değiştirilmiştir. Numuneler daha sonra tekrar tuzlu su ortamına daldırılarak yine 3 gün bekletilmiştir. Betonarme çeliğinin sudaki korozyon davranışı üzerine suyun gelgit etkisini görebilmek için bu işlem 3 defa tekrar edilmiştir (98-117.gün).

C: A ve B koşullarında betonarme numunelerin korozyon özellikleri incelendikten sonra tahribatlı (aşırı polarizasyon) deneyler (126.gün) yapılmıştır. Bu tahribatlı deneylerin sonunda alınan elektrokimyasal ölçüm sonuçları “CV sonu” (dönüşümlü voltametri yöntemine göre elde edilen anodik katodik polarizasyon eğrileri) olmak üzere (134. gün) kendi içerisinde ayrıca değerlendirilmiştir.

4.6.1. Betonarme numunelerin korozyonunun tahribatsız elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi

Betonarme yapılardaki korozyon mekanizması diğer birçok metalik malzemeye göre oldukça karmaşıktır. Çevrenin değişken etkileri ve alaşımın özelliklerine ilaveten çimentonun su ile jelleşme reaksiyonu sonucunda oluşan çimento hidratları, tuzlar ve sulu ortam donatı çeliği için korozif ortamı oluşturmaktadır. Temas ettikleri iletken, heterojen korozif ortama bağlı olarak donatı çeliği üzerinde oluşan anot ve katot yerleri, çelik üzerinde birçok mikro lokal korozyon hücresi oluşturur. Bu mikro korozyon hücreleri çelik üzerindeki çukurların oluşmaya başladığı yerlerdir. Bu anot-katot yerleri arasındaki oluşan potansiyel farkları yüzeydeki korozyon aktivitesi devam ettikçe küçük zaman aralıklarında bile sürekli olarak değişimler gösterir. Yarım hücre potansiyel farklarının artması çukurların derinleşme eğilimini de gösterir. Böyle bir eğilim deney sonuçlarına yüzey karma potansiyeli ile akım titreşim frekansı ve genliklerindeki artışlarla yansır.

Oluşan lokal yerlerin korozyonla giderek derinleşip aktifleşmesi durumunda korozyon akımı ve akım-potansiyel titreşim genlikleri büyür; yüzey film yapısı heterojenleşir. Özellikle klorür gibi agresif iyonlar içeren ortamlarda bu olay otokatalitik olarak hızlanır. Bu durumda başlangıçta oksit oluşumu ile yükselen potansiyel değerleri

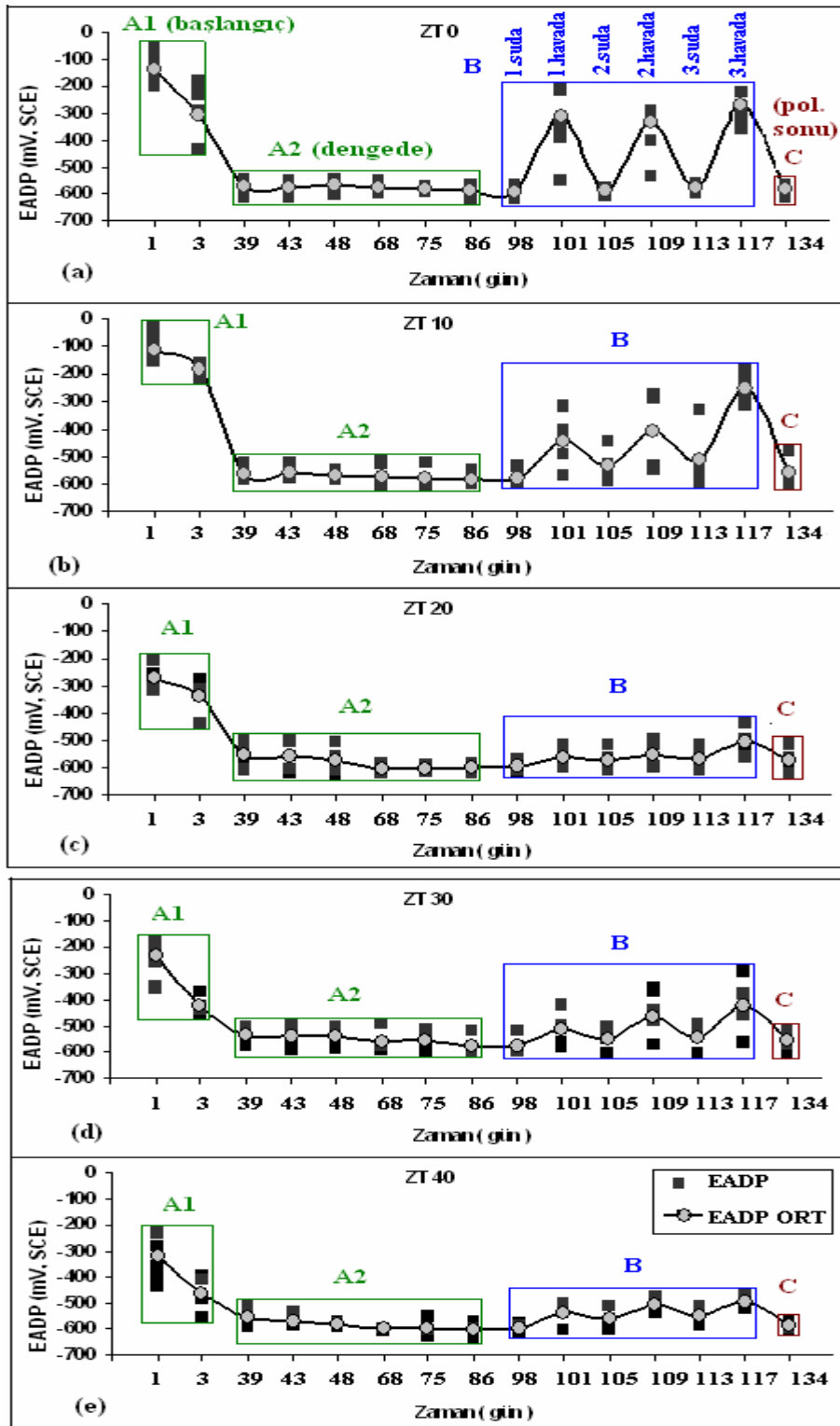
zamanla daha negatife kayar ve korozyon akımı da yükselir. Bu yüzden betonarme korozyonu çeşitli değişkenler kontrol altında tutularak farklı yöntemlerle farklı açılardan incelenmelidir. Betonarme korozyonu çalışılırken klasik korozyon yöntemlerini bire bir kullanmak hatalar oluşturacağı için malzemeye uygun yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Üstelik kompozit bir malzeme olan beton ve bir alaşım olan donatı çeliğinin sulu ortamda temas etmesi ile ortaya çıkacak korozyon reaksiyonları, ara yüzeyin çok değişkenli olması nedeni ile birçok malzemeye göre oldukça karmaşıktır. Aynı zamanda betonarme malzemenin çok değişkenli ortamlarda kullanılıyor olması, beton/atmosfer ara yüzeyinde çeşitli etkilere maruz kalarak oluşan korozyonun zamana ve çevreye bağlı olarak daha detaylı araştırılması gerektirir.

Bu çalışmada çeşitli betonarme numunelerde korozyon mekanizması ve zeolitik tütün (ZT) donatı korozyonuna etkileri çeşitli elektrokimyasal yöntemlerle çok yönlü araştırılarak bulunan sonuçlar beton numunelerin fiziksel özellikleri ile birlikte değerlendirildi

Açık devre potansiyelleri (ADP) ölçümü (Yarı hücre potansiyel yöntemi)

Bu bölümde farklı oranlarda ZT katkısı içeren betonarme numunelerin %3,5 NaCl ortamında 134 gün boyunca takip edilen farklı koşullardaki (A-B-C) açık devre potansiyellerinin zamana göre değişim ve dağılımları özetlendi (Şekil 4.20) ve ana hatlarıyla yorumlandı.

Şekil 4.20'deki "A1" koşulu numunelerin başlangıç potansiyellerini, "A2" koşulu sulu ortamdaki bekleme süresi içinde beton çelik ara yüzeyinin dengeye gelmesinden sonraki potansiyel dağılımlarını, "B" koşulu korozyona suyun gel-git etkisinin incelenmesi amacı ile elde edilen potansiyel dağılımlarını ve "C" koşulu ise -1,3V ile +0,5V potansiyelleri arasında 0,5mV/s tarama hızında elde edilen aşırı polarizasyon sonucunda yüzeydeki tahribatı görmek ve karşılaştırmak amacı ile elde edilen potansiyel dağılımlarıdır.



Şekil 4.20. Betonarme numunelerin 134 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A-B-C koşullarında) açık devre (E_{ADP}) potansiyellerinin zamana göre değişim ve dağılımları (a) ZT0 (b) ZT10 (c) ZT20 (d) ZT30 (e) ZT40 (Farklı koşulların uygulandığı zaman aralıkları çerçeve içine alındı)

Donatı çeliği korozyonunun başlangıcında (“A1” 1-3. günler) tüm numuneler için geniş bir aralığa yayılan potansiyel değişimleri dengeye gelmeden önceki reaksiyon kinetiği ile ilgilidir (Şekil 4.20). Korozyon kinetiğine göre ara yüzey potansiyel farklarının başlangıç koşullarına veya zamana göre yükselmesi yüzeyde korozyon ürünlerinin yol açtığı film oluşumuna bağlı oksit oluşumu hızının artmasına, potansiyelin azalması ise oksit oluşum hızının azalıp korozyon hızının artmasına işaret eder. Bu yüzden yarım hücre potansiyellerinde(ADP) gözlenen yüksek değerler korozyon açısından yüzeyde direnç filmi oluşturduğuna işaret ettiği için elverişli kabul edilir.

Bununla birlikte donatı çeliğinin beton ve dış çevreye bağlı olarak karşılaştığı etkilerin heterojen değişimi, çelikteki lokalize korozyonun başlaması ve gelişmesi için elverişli ortam oluşturur. Bu durum, elektrokimyasal bulgulara, (yarım hücre potansiyeli zamanla yükselse bile) genliği ve frekansı giderek büyüyen titreşimler (elektrokimyasal gürültü) şeklinde yansır. Oksitli yüzeylere ait gözlenen potansiyel ve akım titreşimlerinin zaman içinde yoğunlaşarak genliklerinin giderek büyümesi bu duruma bağlı olarak açıklanır [101]

Bu yüzden potansiyelin sadece pozitif kayması donatı yüzeyinde çöken dirençli filmlerin her durumda kesiksiz koruma yaptığı anlamına gelmez. Elektrokimyasal bulgulardaki titreşimler, filmli yüzeyde lokalize korozyona eğilimi olan zayıf bölgeler olduğunu gösterir. Bu titreşimlere ait frekans ve genliklerin artışı ise, genellikle bu zayıf bölgelerde korozyon aktivitesinin lokal olarak arttığını, yüzey filminin ise buna bağlı olarak daha kesikli hale geldiğini gösterir. Bu yüzden pasifleşmeye bağlı olarak artan lokalize korozyon tehlikesi kimyasal çevresi doğal olarak değişken olan donatı çeliği için her zaman mevcuttur. Metal yüzeyinde ara yüzeylerde yürüyen böyle bir korozyon aktivitesini, polarizasyon eğrilerinden Tafel ekstropolasyon yöntemine göre elde edilen parametrelerle (i_{cor} , R_p), açıklamak yeterli değildir; hatta bazen çok yanıltıcı sonuçlar verebilir [102]. Çünkü bu yöntemlerin yüzeyin uniform (genel) korozyona uğraması durumu için doğru kullanılabilirlikleri vardır. Deneyler sonucunda elde edilen elektrokimyasal verilerin lokalize korozyon bakımından değerlendirilmesi gerekir. Korozyon şekli ve

mekanizması bu şekilde belirlendikten sonra, malzeme açısından koşulların en zararsız olduğu duruma getirilmesi için koruma yolları araştırılmalıdır.

Bununla birlikte bir numunede başlangıçtaki korozyonun büyük olması korozyonun aynı hızla devam edeceği anlamına gelmez. Hızlı başlayan korozyon ile eş zamanlı olarak yüzeyde düzgün ve dirençli bir oksit yapılanması da oluyorsa, ilerleyen zamanda ara yüzeyden geçen akım ve elektriksel yüklerin azalması ve direncin artması da izlenebilir. Bu durumda film başlangıca göre ince de olabilir; ancak korozyon bir şekilde engellenmiştir. Korozyonun engellenmesi; filmin direnç kazanması (direnç polarizasyonu/ R_{film}), korozif maddelerin ara yüzeye difüzyonunun engellenmesi (difüzyon kontrollü korozyon) ve ara yüzeydeki korozif maddelerin aktifliğinin azalması (aktivasyon polarizasyonu) şeklinde gerçekleşebilir. Ara yüzeyde çeşitli oksit, hidroksit ve klorürlerin oluşumu ve bozunması söz konusudur. Başlangıçta ölçülen potansiyeller ara yüzeyde çeşitli çözünmeyen bileşiklerin (çeşitli oksit, hidroksit ve klorürlerin) kararlı halde dengeye ulaşmadan önceki oluşma ve bozunma hızlarına bağlı potansiyellerdir.

Bu çalışmanın 1.ve 3.günlerdeki (A1 koşulu) potansiyel verileri, yüzeyde suyun betona işleme süresi ile kısıtlanmış olan korozyon dengesi ara yüzeydeki oksit, hidroksit ve klorürlerin oluşma ve bozunma hızları gibi çeşitli değişkenlere de bağlıdır. Bütün numunelerdeki su işleme süreleri birbirine eşit olsa bile bu süreçte ölçülen açık devre potansiyelleri betonarme korozyon özellikleri hakkında geçerli bilgi vermeyecektir.

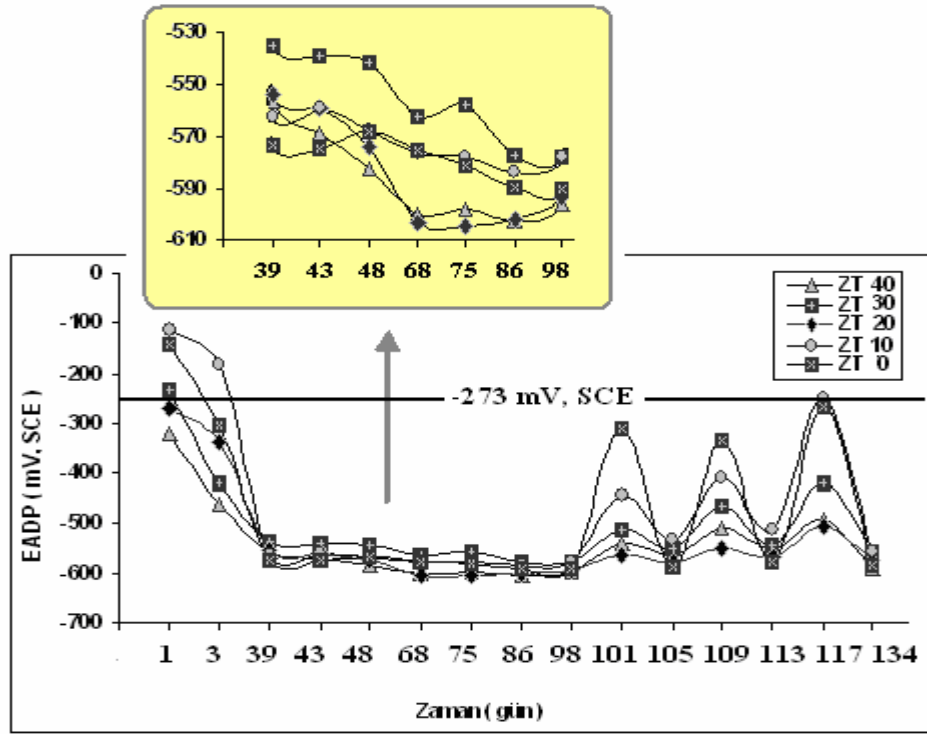
Şekil 4.20’de tüm numunelerin E_{ADP} potansiyelleri 39-86. günlerde (A2 koşulu) denge durumunda değerlendirildiğinde ZT0, ZT10, ZT20, ZT30 ve ZT40 numunelerin potansiyel farklarının 55-85 mV arasında değiştiği görüldü. Suyun gel-git etkisinin numunelerde oluşturduğu korozyon şeklini anlayabilmek için belirli sürelerde ardışık olarak üç kez tekrarlanarak ölçülen suda ve havada (B koşulu) potansiyel dağılım aralıklarının ise suda beklediği duruma göre (A2 koşulu) daha fazla genişlediği (50-185 mV) görüldü. Bu farklar numunelerin çevre değiştirmesine bağlı olarak korozyon özelliklerinin de değişmesinden kaynaklanmıştır.

Şekil 4.20’de tüm numunelerin 98-117. günler arasında suda ve havada ardışık olarak 3 kez belirlenen E_{ADP} verileri (B koşulu) incelendiğinde çevre değiştiren numunelerin potansiyel ve potansiyel dağılım aralıklarının numune cinsine ve ortama göre değişkenlik göstermesi dikkat çekicidir. ZT0 numunelerin suda-havada gösterdiği potansiyel dağılım aralıklarının ZT katkılı numunelerden daha fazla olduğu görüldü.

ASTM C 876’ya göre betonarme demirleri potansiyel kriterleri incelendiğinde -273 mV/SCE’den daha negatif potansiyelerde %90 güvenirlikle donatının korozyona uğrama olasılığı vardır [103].

Şekil 4.21’e göre tüm numunelerin 39.günden itibaren potansiyellerinin -273 mV/SCE’den daha negatif olduğu görüldü. Bu nedenle zeolitik tüfün (ZT) betonarme korozyonu üzerindeki etkisini belirlemede sadece potansiyel değer okumaları yeterli değildir. Çünkü potansiyel değişimleri sadece oksit filminin kalınlığına ve sudaki betonun bileşimi ile ilgili iletkenliğine bağlı olarak değerlendirilir. Örneğin potansiyelin yükselmesi oksit filminin kalınlaşması, azalması da oksit filminin incilmesi ile açıklanır. Ancak oksit filmi ince ve dirençli olduğu zaman da korozyon yavaşladığı halde potansiyel yine düşük değerlerde olacaktır.

Betonarme çeliğinin korozyon davranışını araştırmak için çimento içerisine uçucu kül ilave edilen bir çalışmada; %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki tüm numunelerin 30.gün sonunda açık devre potansiyellerinin -273 mV/SCE’den daha negatif olduğu belirlenmiştir. Ayrıca korozyonun kıyaslanabilecek eşit koşullarda başlaması için beton karma suyunda %3,5 NaCl koşulu oluşturulup, sulu ortamda betonun iletkenlik kazanması sağlanmış ve böylece potansiyel değerleri daha kısa zamanda negatif değerlere düşmüştür. Bu durum numunelerin korozyon tepkimelerini hızlandırarak, betona gömülü çeliğin korozyon davranışı hakkında kısa bir sürede ve daha kıyaslanabilir sonuçların alınmasını sağlamaktadır [104].

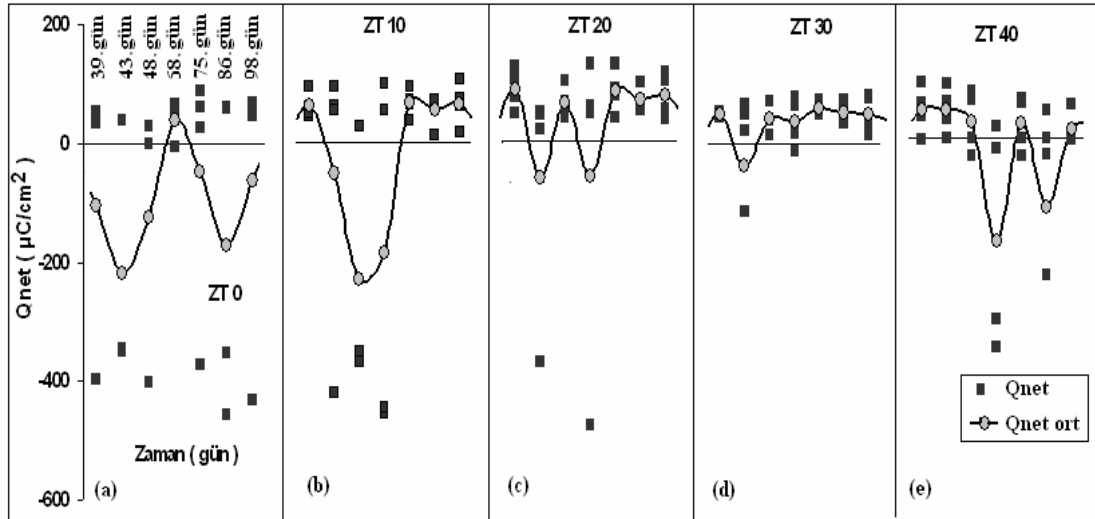


Şekil 4.21. Betonarme numunelerin 134 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A-B-C koşullarında) ölçülen (E_{ADP}) potansiyel ortalama değerlerinin zamana göre değişimi

Yarı hücre potansiyel yöntemi korozyon çalışmalarında önemlidir. Bununla birlikte özellikle kimyasal çevresi değişkenlik gösteren betonarme yapılarda, ara yüzeylerde (beton-çelik) film büyümesi zamanla lokal delinmelerin artması ile eş zamanlı olarak devam eden en tehlikeli ve sinsi korozyon türü olan lokalize korozyon ortaya çıkar. Çünkü korozyon akımında ve korozyon direncinde belirgin değişim görülmez. Bu nedenle bu tür malzemelerdeki korozyon zamana karşı ayrıntılı değerlendirilir. Lokalize korozyonun ilerleyen zamanlarda ara yüzeydeki değişiminin izlenmesi sırasında genel korozyon eşitliklerine göre yapılan ölçümler (tafel ekstrapolasyon yöntemi) daha önce de açıklandığı gibi sağlıklı sonuçlar vermez. Bu tür numunelerde ara yüzeydeki küçük zaman aralıklarında oluşan potansiyel ve akım titreşimlerinin yüzeydeki heterojenliğin ve lokalize eğilimin ölçüsü olduğu bildirilmiştir. Bu nedenle çalışmaların bir bölümü numunelerin lokalize karakterini ortaya koyan elektrokimyasal gürültü tekniklerinden (elektrochemical noise technique) oluşmaktadır.

Açık devre yüklerinin (Q_{ADP}) elde edilmesi (Kronoamperometrik ölçüm yöntemi)

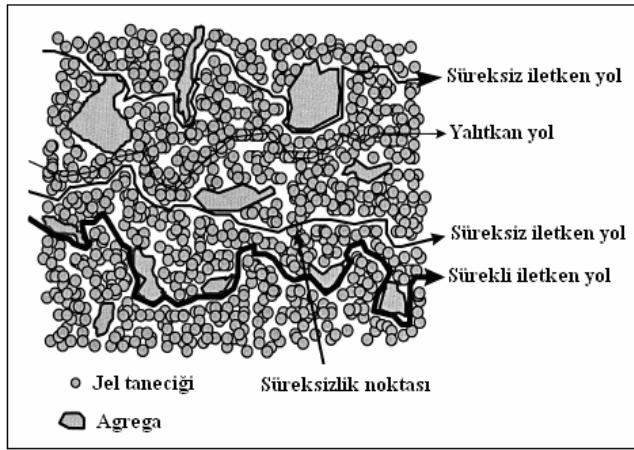
Şekil 4.20’de korozyon ortamındaki numunelerin 39-98. günlerine ait A2 koşulunda verilen açık devre potansiyellerindeki yüzey korozyon yükleri, Şekil 4.22’de toplu olarak verilmiştir. Şekil 4.22 incelendiğinde, bütün numunelerde değişik zamanlarda (sıfır yükün altında) kaydedilen çeşitli büyüklüklerde katodik korozyon aktiviteleri olduğu, bu aktivitelerin genel olarak ZT oranının artması ile azaldığı ve katodik aktivitenin ZT30 numunesinde (Q_{net}) az olup en küçük değerler aldığı açıkça görülebilir.



Şekil 4.22. Betonarme numunelerin suda 98 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A2 koşulu) açık devre koşullarındaki korozyon yüklerinin (Q_{net}) günlere göre değişimleri (a) ZT 0 (b) ZT 10. (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40

Şekil 4.22’deki katodik yük değerleri, beton/çelik ara yüzeyinde oksijen indirgenmesini hızlandıran betondaki iletken yolların yani boşluk oranının artmasının bir göstergesidir. Ara yüzeydeki oksijen indirgenmesi betonun boşluklu heterojen yapısına bağlıdır ve donatı yüzeyindeki oksit oluşumunun da kesikli-heterojen yapılanmasını sağlar. Bu durum lokalize korozyonu başlatan ve hızlandıran en önemli etkidir.

Şekil 4.22’de kontrol numunelerine ait katodik yüklerin zaman içinde en yoğun ve büyük değerler göstermesi, kontrol numunesinin diğer numuneler arasında beton boşluk oranının da en yüksek oranda olduğuna işaret eder. Bu sonuç donatı yüzeyinde lokalize korozyon gelişimine en uygun numunenin ZT katkısı içermeyen kontrol numunesi olduğu anlamına da gelir. Su işleme derinliği, hızlı klor iyonu geçirimsizlik testi ve beton boşluk oranı sonuçlarının değerlendirilmesi ile de görülür ki donatı çeliğine ulaşan iletken yollar yani boşluk oranı kontrol numunesinde en yoğunudur. ZT katkısı ise bu iletken yolları kapamış ve korozyonu yavaşlatmıştır.



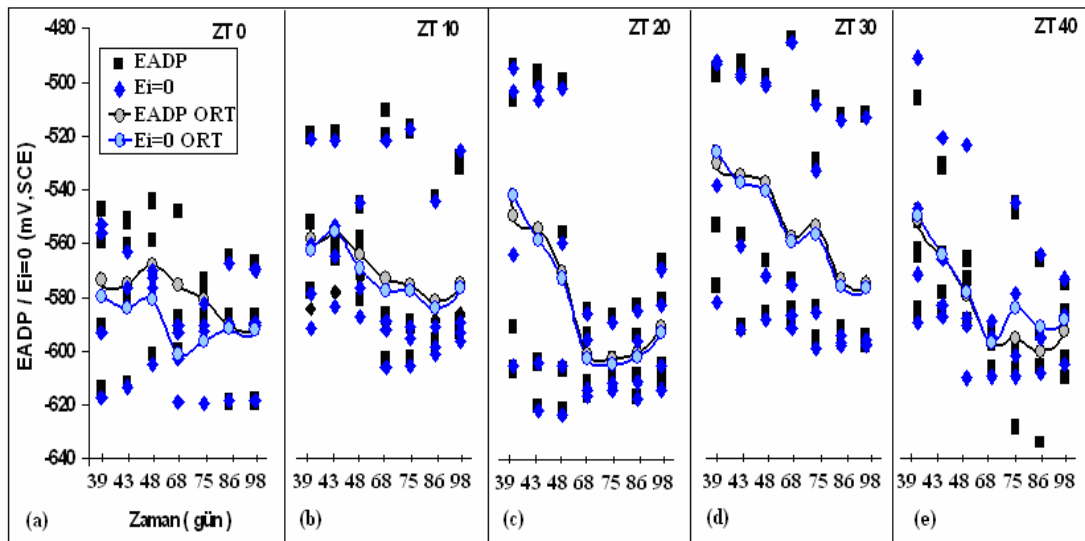
Şekil 4.23. Betonun mikro yapısının şematik gösterimi

Ayrıca 90.günden sonra ZT katkılı beton numunelerin basınç dayanımlarının kontrol numunesine göre artması, jelleşme sırasında oluşan tane sınırlarının meydana getirdiği heterojen ve boşluklu beton oluşumu yerine, ZT’nin puzolanik etkisi ile jelleşme reaksiyonunun sürekli olarak devam etmesi ve betonun mikro homojenlik kazanarak boşluklarının azalması ile açıklanabilir. ZT’ün puzolanik reaksiyonu SiO_2 bileşeni ile çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kirecin Ca(OH)_2 ve suyun arasında gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar sonucunda ortaya C-S-H benzeri ürünler çıkar ve sürekli iletken yollar kapanır (Şekil 4.23). Bu boşluksuz yapılanma donatı korozyonunu yavaşlatıcı etki ile ortaya çıkar ve elde edilen elektrokimyasal deney sonuçları da bunu göstermektedir.

Polarizasyon direnci yöntemi

Farklı oranlarda ZT içeren betonarme numunelerin Şekil 4.20’de A2 koşulunda ölçülen ADP değerlerinden faydalanılarak uygulanan Stern-Geary yöntemine göre elde edilen korozyon potansiyelleri ($E_{i=0}$), korozyon dirençleri (R_p) ve korozyon akımları (i_{cor}) değerlerine ait grafikler oluşturuldu (Şekil 4.24, Şekil 4.25, Şekil 4.26).

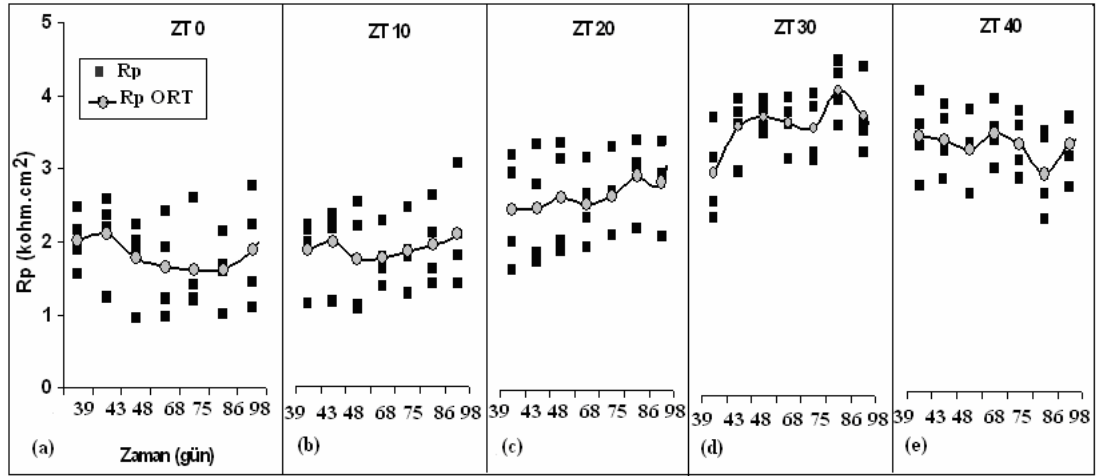
Açık devre potansiyellerinin (E_{ADP}), polarizasyon direnci yöntemine göre belirlenen korozyon potansiyellerine ($E_{i=0}$) yakın değer almaya başlaması sistemin dengede olduğunu ve kıyaslanabilir sağlıklı ölçümlere ulaşıldığını gösterir. Bu çalışmanın 39. gününden sonra elde edilen ölçümlerinde açık devre potansiyellerinin (E_{ADP}) korozyon potansiyellerine ($E_{i=0}$) yakın değer almaya başladığı görüldü. Reaksiyon süresinin denge koşullarının sağlanması için yeterli olmasına rağmen korozyonun dengeye gelmemesi (E_{ADP} ile E_{cor} değerinin çakışmaması durumu) ölçüm yapıldığı sırada lokal aktifleşmenin artmasından kaynaklanır. Yani ADP (yarım hücre potansiyeli) ile korozyon potansiyellerinin ($E_{i=0}$) çakışmaması hali (kontrol numunesinde olduğu gibi) tersinmez lokalize korozyon reaksiyonlarının aktifleşmesi ihtimalini artırmaktadır (Şekil 4.24.a).



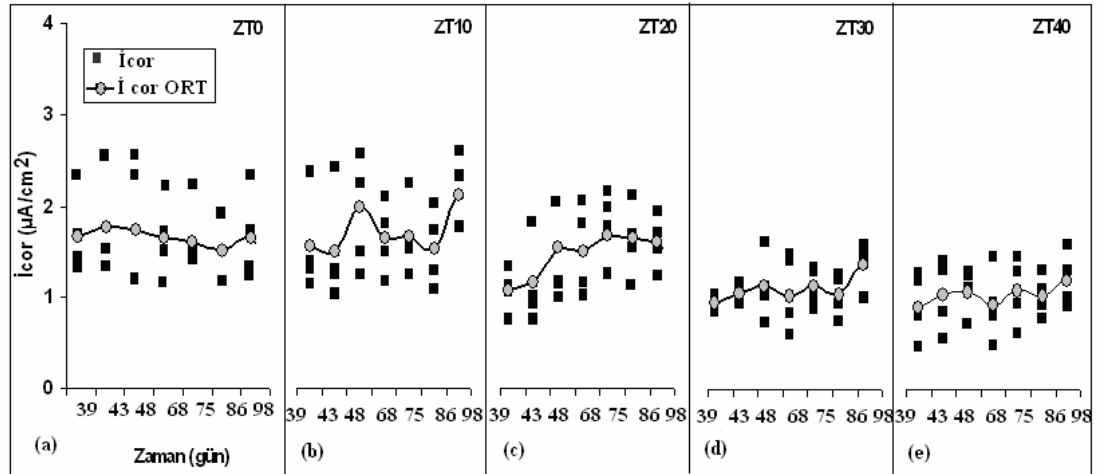
Şekil 4.24. Betonarme numunelerin suda 98 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen(A2 koşulunda) açık devre potansiyelleri (E_{ADP}) ve korozyon potansiyelleri ($E_{i=0}$) (a) ZT 0 (b) ZT 10 (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40

A2 koşullarında elde edilen toplu polarizasyon dirençleri ve korozyon akımları birlikte değerlendirildiğinde (Şekil 4.25 ve Şekil 4.26), ZT katkısının artışına bağlı olarak donatı korozyon direncinin genellikle artıp korozyon akımlarının azaldığı yani korozyonun yavaşladığı görüldü. Hatta %20 ve %30 ZT katkılı numunelerde korozyon ortamında bekleme süresinin uzaması ile korozyonun yavaşladığı, numune dirençlerinin zamanla sürekli artışı ve akımlarının ise sürekli azalışından anlaşılabılır. Bu sonuçlara göre de ZT30 numunesinin korozyona en dirençli koşulları sağladığı görülmektedir.

Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 ile birlikte değerlendirildiğinde korozyon direnci yüksek numunelerde potansiyel değerlerinin azalma eğilimi olduğu görüldü. Halbuki oksit filminin kesikli yapılanmadığı metallerde potansiyelin yükselmesi direnç artışı ile beraber olur. Korozyona dirençli betonarme yapılarda potansiyelin azalması, boşluklu yapıya bağlı lokal oksit filmi oluşumunun azalması ile beraber gerçekleştiği bu sonuçlardan anlaşılabılır. Çünkü kesikli oksit oluşumu kontrol numunesinde(ZT0) olduğu gibi korozyon akımını büyütüp polarizasyon direncini azaltmaktadır.



Şekil 4.25. Betonarme numunelerin suda 98 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A2 koşulunda) korozyon dirençleri (R_p) (a) ZT 0 (b) ZT 10 (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40

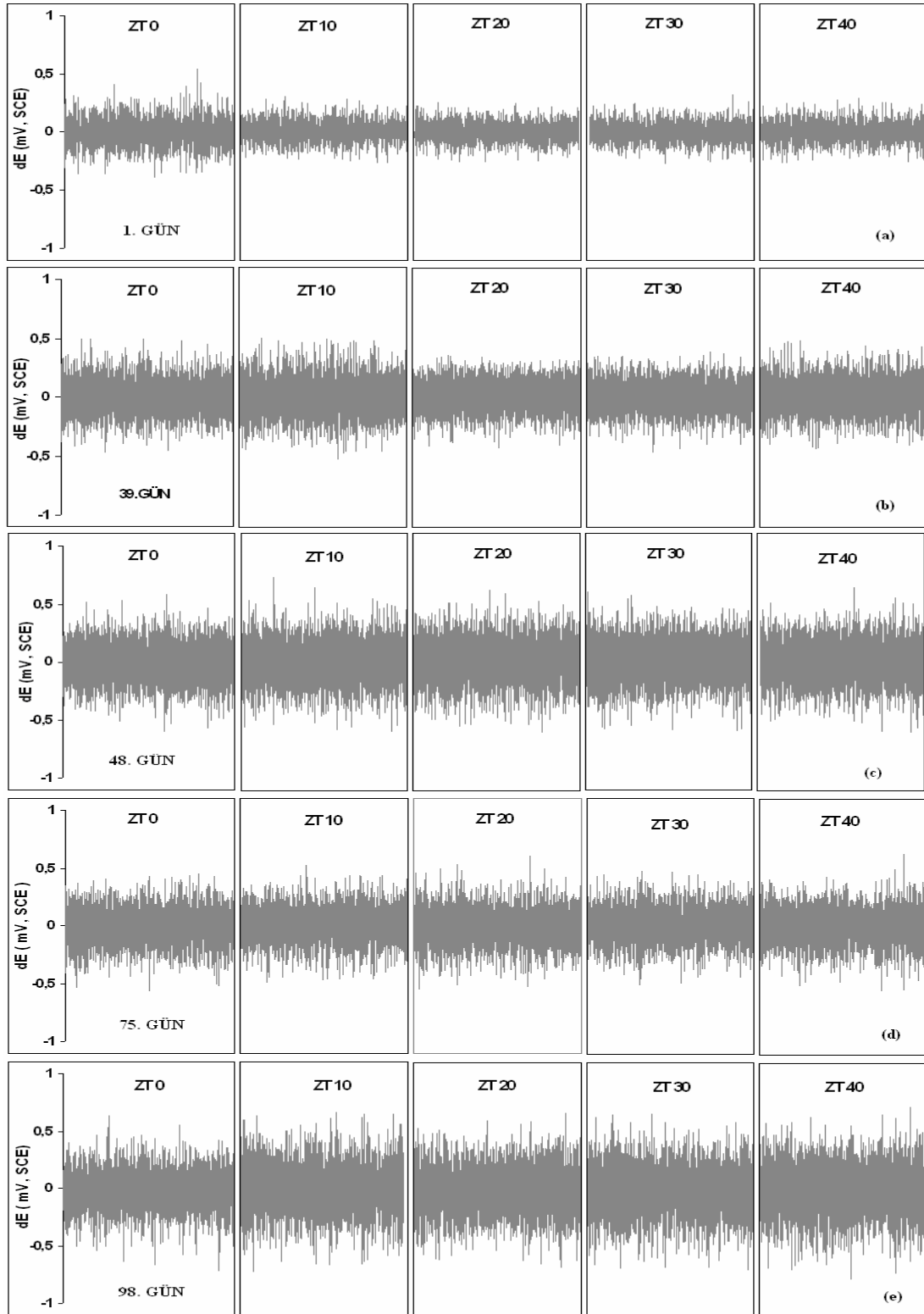


Şekil 4.26. Betonarme numunelerin suda 98 gün süre ile belli aralıklarda ölçülen (A2 koşulunda) korozyon akımları (i_{cor}) (a) ZT 0 (b) ZT 10 (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40

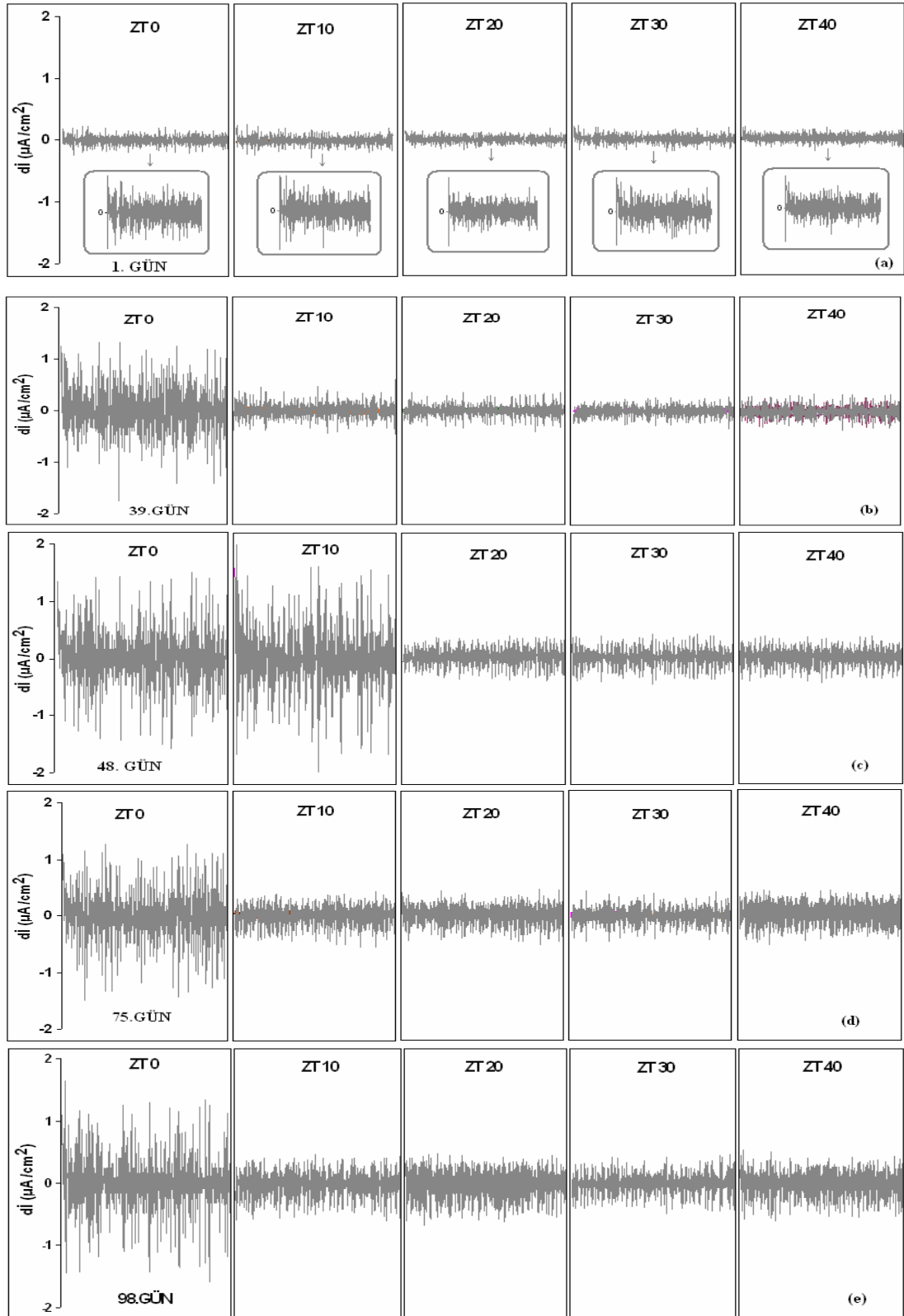
Açık devre potansiyelleri ve açık devre potansiyelinde yüzeyden geçen akım verilerinin elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre değerlendirilmesi

Bu bölümde farklı oranlarda ZT içeren betonarme numunelerin A2 koşulunda ölçülen açık devre potansiyelleri ve bu potansiyellerdeki akımlarının gürültü ölçüm tekniğine göre literatürden farklı bir şekilde değerlendirilmesi yapıldı. Belirli günlerde 0,2 saniye aralıklarla bilgisayar kontrollü olarak elde edilen toplam 200.000 potansiyel verisinin ve 27.000 akım verisinin ardışık olarak farklarının alınması ile potansiyel ve akım titreşim genliklerinin gürültü ölçüm tekniğine göre düzenlenmiş hali Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de; potansiyel ve akım titreşim genliklerinin ortalamasına göre düzenlenen elektrokimyasal gürültü grafikleri ise Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da görülmektedir. Elde edilen potansiyel ve akım titreşimlerinin genlikleri yüzey potansiyellerinin korozyon sırasındaki lokal değişim kapasitesini ve buna bağlı lokal korozyon eğilimini karşılaştırma imkanı sağladı.

Başlangıçta tüm numunelerin akım ve potansiyel gürültü ölçümleri birbirine yakın değerler göstermesine rağmen zaman ilerledikçe gürültü farkları daha belirgin hale geldi. 39. günden sonra tüm numuneler için potansiyel gürültü değerleri benzer özellik göstermesine rağmen elektrokimyasal akım gürültü değerleri ZT katkılı numunelerde azaldı. Bunun anlamı lokal akım boşalımının yani lokalize korozyon hızının ZT katkılı numunelerde kontrol numunesine göre daha az olmasıdır. Lokalize korozyonda sulu ortamda bekleme süresi içinde en belirgin azalma yine ZT30 numunesinde görüldü (Şekil 4.27, Şekil 4.28). Akım titreşim genliklerinin büyümesi anot-katot reaksiyonlarının yüzeyin farklı yerlerinde farklı hızlarda cereyan ettiğini gösterir. Akım titreşimlerine ait genliklerin azalması yüzeydeki korozyon olaylarının daha homojen ve düzenli olduğunu, lokalize korozyonun engellediğini göstermektedir. Bunun anlamı betonarme numunedeki boşluk oranının azalmasıdır.

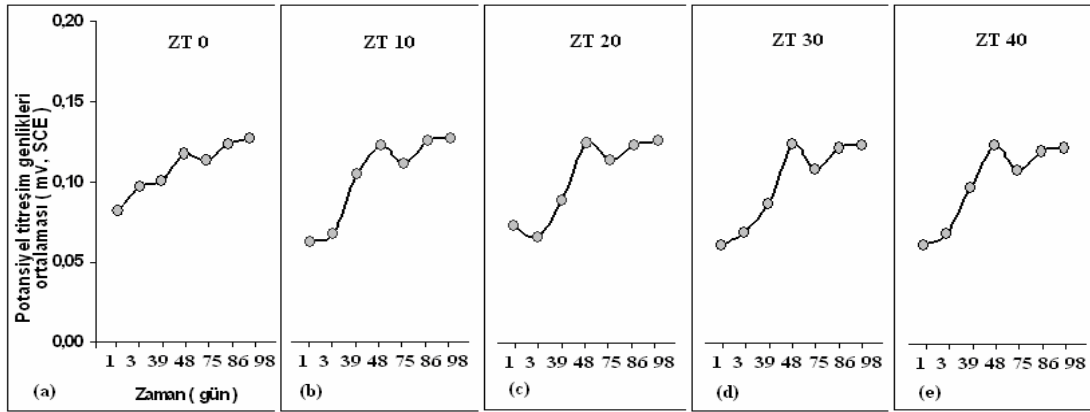


Şekil 4.27. Açık devre potansiyel verilerinin elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre düzenlenmiş hali (a) 1.gün (b) 39.gün (c) 48.gün (d)75.gün (e) 98.gün

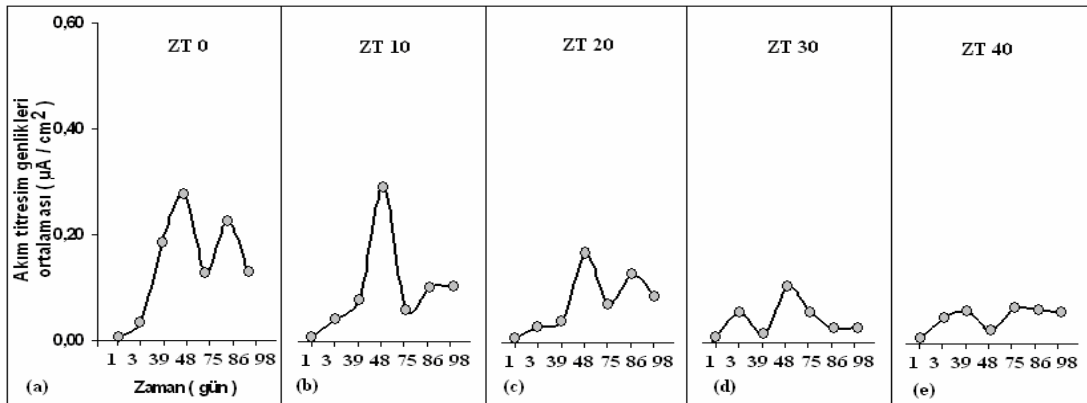


Şekil 4.28. Açık devre potansiyelinde yüzeyden geçen akımların elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre düzenlenmiş halı (a) 1.gün (b) 39.gün (c) 48.gün (d) 75.gün (e) 98.gün

Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da verilen tüm numunelerin potansiyel ve akım titreşim genlikleri ortalamaları birlikte değerlendirildiğinde, potansiyel ve akım gürültü sonuçlarını (Şekil 4.27, Şekil 4.28) daha açık bir şekilde ortaya çıkarmaktadır. ZT katkılı numunelerin potansiyel titreşim genlikleri ortalamaları başlangıçta ZT0 numunelerden daha küçüktür ve karakteristik bir eğriye sahiptir. ZT0 numunelerin akım titreşim genlikleri ortalamaları (ZT10 numuneler dışında) tüm ZT katkılı numunelerden büyüktür. ZT30 numunelerin akım titreşim genlikleri ortalamaları en küçüktür.



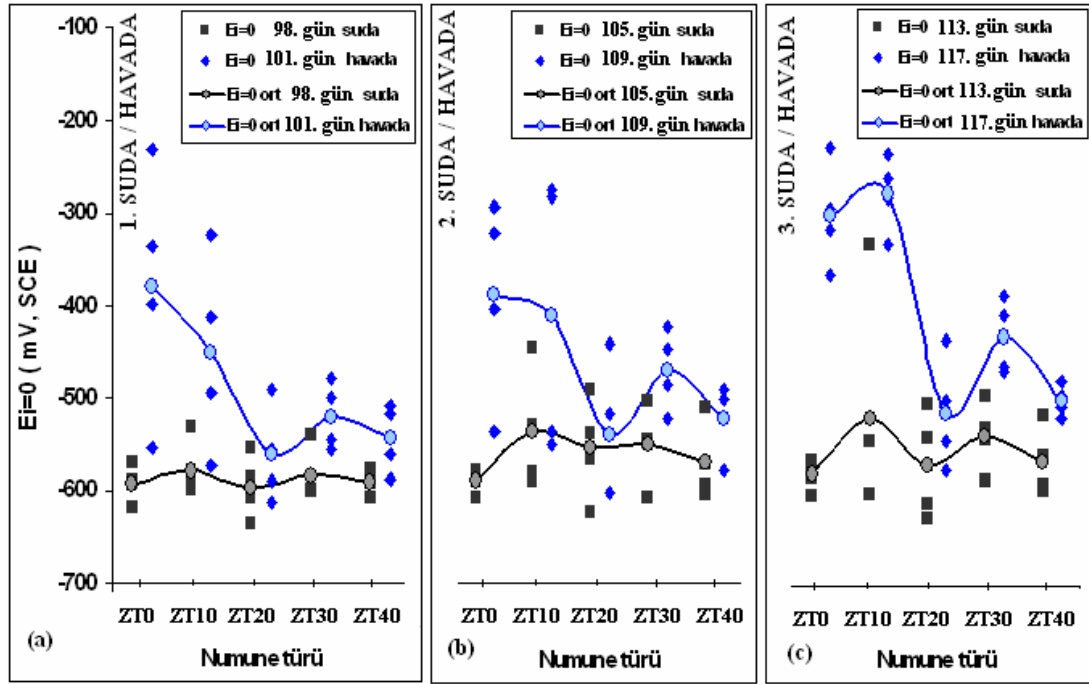
Şekil 4.29. Açık devre potansiyel verilerinin elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre düzenlendikten sonra potansiyel titreşim genliklerinin ortalamaları (a) ZT 0 (b) ZT 10 (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40



Şekil 4.30. Açık devre potansiyellerinde yüzeyden geçen akımların elektrokimyasal gürültü ölçüm yöntemine göre düzenlendikten sonra akım titreşim genliklerinin ortalamaları (a) ZT 0 (b) ZT 10 (c) ZT 20 (d) ZT 30 (e) ZT 40

4.6.2. Betonarme numunelerin kimyasal çevre değişimine karşı gösterdiği direncin tahribatsız elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi

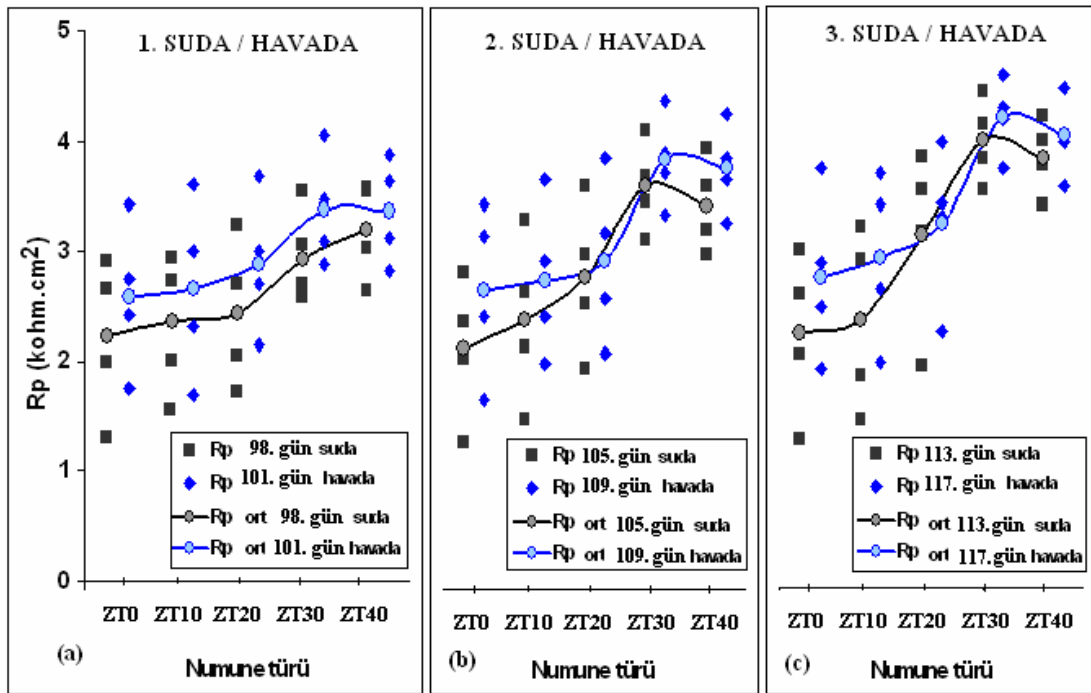
Farklı oranlarda ZT içeren betonarme numunelerin 98-117. günlerde B koşulunda (Şekil 4.20) belirli zamanlarda suyun gel-git etkisi ile karşılaşması durumunda korozyon davranışlarını araştırmak için ölçülen ADP değerlerinden faydalanılarak uygulanan kronoamperometrik yöntemle elde edilen yüzey yükleri (Q_{net}) ve Stern-Geary yöntemine göre elde edilen korozyon potansiyelleri ile korozyon dirençlerine ($E_{i=0}$ ve R_p) ait grafikler oluşturuldu (Şekil 4.31- Şekil 4.32- Şekil 4.33).



Şekil 4.31. 98 gün %3,5 NaCl ortamında bekletilip daha sonra havaya çıkarılan betonarme numunelere ait suda/havada korozyon potansiyelleri ($E_{i=0}$) dağılımları (a) 1.suda/havada (b) 2.suda/havada (c) 3.suda/havada

Şekil 4.31’de görüldüğü gibi ZT0 ve ZT10 numuneleri sudan havaya çıkarıldıklarında potansiyel değerleri sudakinden daha geniş aralıkta bir saçılma göstermiş ve daha pozitif değerlere kaymıştır. Potansiyel saçılma aralıklarının genişlemesi yüzeyde lokalize korozyona izin veren bir film büyümesine işaret eder. ZT20, ZT30 ve ZT40 numunelerinde ise potansiyeldeki bu saçılmaların azalarak

çevre değişiminden etkilenmediği; özellikle ZT30 ve ZT40 numunelerine ait suda/havada potansiyel saçılmalarının en az olduğu görüldü. Metal yüzeyindeki korozyon özelliklerinin metalin farklı bölgelerinde daha az değişkenlik göstermesi, korozyonun çevresel değişimlere ve oksijen konsantrasyon piline karşı dirençli olduğunu göstermektedir.

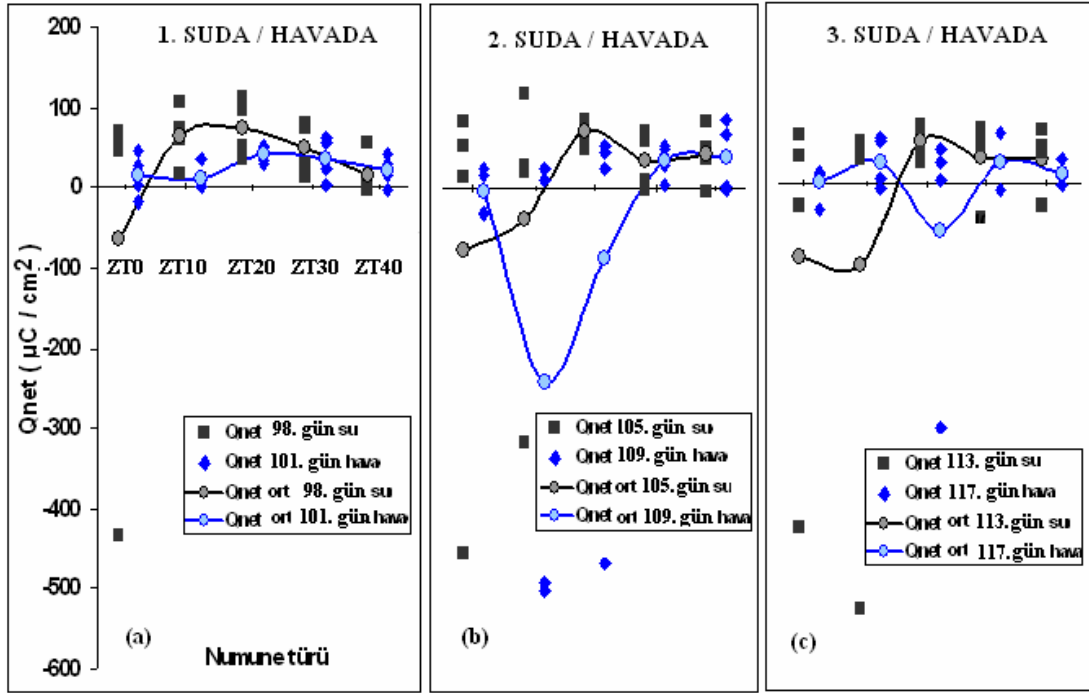


Şekil 4.32. 98 gün %3,5 NaCl ortamında bekletilip daha sonra havaya çıkarılan betonarme numunelere ait suda/havada polarizasyon direnci (R_p) dağılımları (a) 1.suda/havada (b) 2.suda/havada (c) 3.suda/havada

Şekil 4.32 incelendiğinde sudan havaya çıkarılan tüm numunelerin korozyon dirençlerinin arttığı görüldü. Korozyon dirençlerine ait veri saçılmaları ZT0, ZT10 ve ZT20 numunelerde fazla olduğu halde, ZT30 ve ZT40 numunelerde ise veri saçılma aralıkları daralmıştır. ZT30 ve ZT40 numunelerin suda/havada korozyon dirençlerinin büyük olduğu görülmektedir.

ZT miktarındaki artış Şekil 4.32’de görüldüğü gibi suda bekleme süresinde R_p değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Çeliğe temas eden betonun her yerinde ZT miktarı homojen dağılmayacağına göre paslanma da yüzeyin her yerinde aynı oranda

olmayacaktır. Böylece paslanmanın artıp-azaldığı bölgeler oluşur. Üstelik korozyon sırasında bu bölgeler sürekli olarak değişim gösterir. Buna bağlı olarak pas oluşumu farklı yerlerde farklı hızlarda seyredir. Bütün bu dinamik değişimler elektrokimyasal verilerdeki değişim hızının büyümesi ve veri saçılmaları ile kendini göstermektedir.



Şekil 4.33. 98 gün %3,5 NaCl ortamında bekletilip daha sonra havaya çıkarılan betonarme numunelere ait suda/havada yüzey yükleri (Q_{net}) dağılımları (a) 1.suda/havada (b) 2.suda/havada (c) 3.suda/havada

Şekil 4.33’de net yükleri (Q_{net}) verilen numuneler anodik-katodik yüzey yükleri bakımından incelendiğinde ZT0, ZT10 ve ZT20 numunelerde katodik yüklerin ZT30 ve ZT40’a göre büyük olduğu görülmektedir.

ZT katkısının suda ve havada katodik-anodik reaksiyonu yavaşlatmasının sebepleri şu şekilde açıklanabilir:

- Numune suda iken ZT yapısına suyu bağlayıp ve sudaki oksijenin çözünürlüğünü azaltarak korozyon ortam aktifliğini düşürür. Bu durum özellikle oksijen indirgenmesini kısıtlayarak korozyonu yavaşlatır.

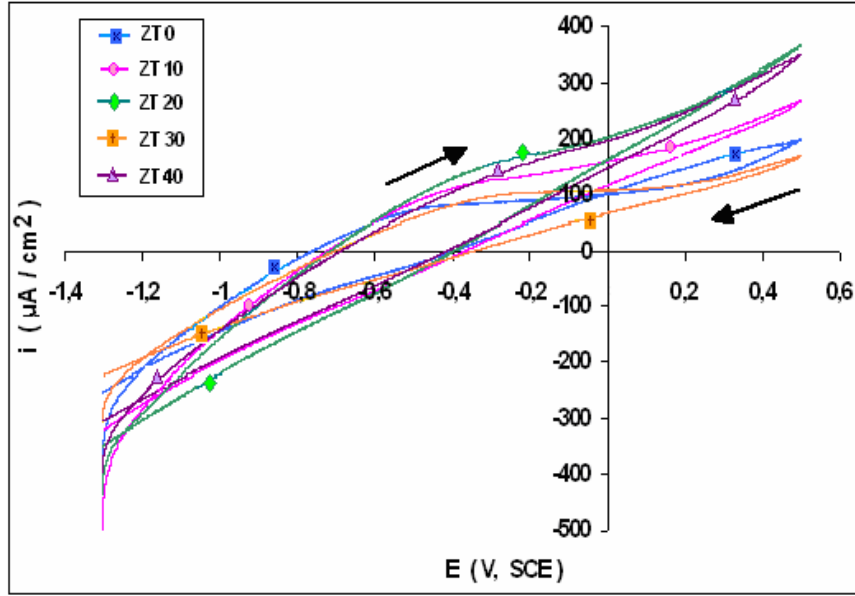
- Numuneler sudan çıkarılıp havada kurumaya bırakıldığında ise (rutubet etkisi) ZT boşlukların ve çeliğin yüzeyine sıvanır. Böylece çelik yüzeyinde dirençli bir tabaka oluşturarak oksijen girişini ve anodik-katodik korozyon reaksiyonlarını engeller. ZT30 ve ZT40 numunelerde özellikle katodik yüklerdeki aşırı azalmalar buna bağlıdır.
- ZT miktarındaki artışla anodik yüzey yüklerinin de azalması yine çelik yüzeyinde iyon geçişini engelleyen ZT tabakasından kaynaklanır. Zaten katodik yüklerin büyük olması betonda yaygın bir oksit filmine ve lokalize korozyona işaret eder. Şekil 4.33'de bu bulguyu desteklemektedir. ZT katkısı ile anodik-katodik yüklerin ve bunlar arasındaki farkların azalması betonarme çeliğinde lokalize korozyon riskinin de azalması anlamına gelmektedir. Buna göre ZT30 ve ZT40 numunelerin yüzey yükleri değerlendirmelerine göre de daha iyi olduğu görülmektedir.

Yukarıda açıklanan tüm özellikler birlikte incelendiğinde ZT30 ve ZT40 numunelerde suda ve havada elde edilen bütün korozyon parametrelerindeki ($E_{i=0}$, R_p ve Q_{net}) farkların en küçük değerlere ulaştığı görüldü. Bunun anlamı suyun gel-git etkisi ile oluşan oksijen konsantrasyon farkının numunenin korozyon özelliklerini etkilememesi yani tehlikeli lokalize korozyona ilave bir ivme katmamasıdır (Şekil 4.31, Şekil 4.32, Şekil 4.33). %30 ve %40 ZT katkılı numunelerde suyun her gel-git etkisinden sonra donatı çeliği korozyon potansiyelinin yükseldiği, korozyon direncinin bir öncekine göre arttığı ve ADP'deki korozyon yükünün azaldığı belirlendi. Bu koruyucu etki en belirgin olarak ZT30 numunelerde görülmektedir.

4.6.3. Betonarme numunelerin korozyonunun tahribatlı elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi (Aşırı polarizasyon etkisi)

% 3,5 NaCl içeren ortamda A ve B koşullarında serbest korozyona uğratan betonarme numuneler, -1,3V ile +0,5V potansiyelleri arasında 0,5mV/s tarama hızında önce anodik sonra katodik yönde Şekil 4.34'de görüldüğü gibi polarize edilmiştir. Bu şekilde numuneler aşırı korozyona zorlanmıştır. Bu şekilde 117 gün boyunca serbest korozyona uğrayan numuneleri aşırı korozyon ile yaşlandırarak

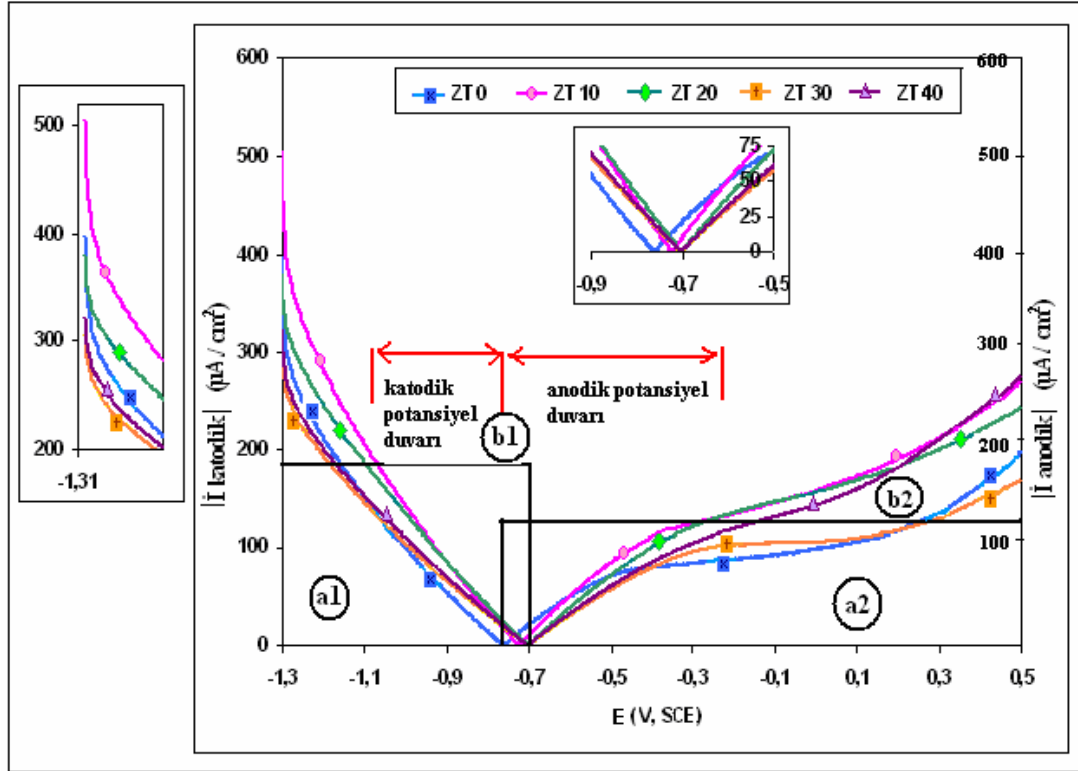
numune cinsine göre korozyondaki farklılaşmaları daha belirgin bir şekilde ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 4.34. Betonarme numunelerinin -1,3 V ile 0,5 V aralığında 0,5 mV/sn tarama hızında elde edilen katodik-anodik polarizasyon eğrileri

Şekil 4.35’de polarizasyon eğrilerinde anodik ve katodik akımların mutlak değerlerinin aynı skalada gösterilmesi her numune için potansiyel duvarı ve aşırı polarizasyon akımlarının bulunmasına olanak sağlamıştır. Bu düzenleme sonucunda elde edilen, numunelerin korozyon özelliklerinin doğrudan karşılaştırılabileceği parametreler Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Şekil 4.35’de (a) bölgesi korozyon reaksiyonunun çok yavaş yürüdüğü küçük polarizasyon (az yaşlandırma); (b) bölgesi de anodik ve katodik akım geçişinin arttığı aşırı polarizasyon (daha ileri derecede yaşlandırma) koşullarını göstermektedir. Potansiyel duvarı genişlikleri anodik ve katodik bölgedeki akımlarda aşırı artışın başladığı potansiyel değerlerine göre belirlenmiştir.



Şekil 4.35 Betonarme numunelerinin -1,3 V ile 0,5 V aralığında 0.5 mV/sn tarama hızında elde edilen katodik-anodik polarizasyon eğrilerinin oluşturduğu potansiyel duvarı grafiği (a1) Katodik düşük polarizasyon bölgesi (b1) Katodik aşırı polarizasyon bölgesi (a2) Anodik düşük polarizasyon bölgesi (b2) Anodik aşırı polarizasyon bölgesi

Çizelge 4.11. Betonarme numunelerin tahribatlı deneyler sonucunda elektrokimyasal parametrelerin değişimleri

Numune türü	Son oksitlenme pot. geçen (anodik) akımlar ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Son indirgenme pot. geçen (katodik) akımlar ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Anodik Pot. duvarı genişliği (V)	Katodik pot. duvarı genişliği (V)	Pot. duvarı (V)	Rp (kohm.cm ²)
ZT 0	220	398	0,28	0,34	0,62	2,15
ZT 10	271	505	0,31	0,36	0,67	2,30
ZT 20	243	380	0,39	0,40	0,79	3,01
ZT 30	168	304	0,43	0,52	0,95	3,64
ZT 40	265	321	0,40	0,48	0,88	3,51

ZT0 numunelerin potansiyel duvarı genişliği ZT katkılı numunelerden küçüktür (Çizelge 4.11). ZT30 numunelerin potansiyel duvarı genişliğinin en büyük, son indirgenme ve yükseltgenme akımlarının da küçük olduğu görüldü. ZT30 numunelerin potansiyel duvarı genişliğinin ve polarizasyon dirençlerinin en büyük, basınç dayanımlarının yüksek ve boşluk miktarının düşük olduğu dikkat çekmektedir.

Potansiyel duvarı genişliği (ΔE_{PD}), aşırı korozyon koşulları altında yüzeyde oluşan koruyucu film tarafından akım geçişinin engellendiği potansiyel aralığıdır. Yüzeyde oluşan filmin koruyuculuğu arttıkça potansiyel duvarının genişlemesi beklenmektedir.

Son indirgenme potansiyelindeki akım miktarı (I_{KS}), metal yüzeyi ile korozif çevre arasında elektron akış hızının yani filmin elektriksel geçirgenliğinin (indirgenme eğiliminin) bir ölçüsüdür. Bu akımın büyük olması filmin çok çözündüğünü ve poröz olduğunu göstermektedir.

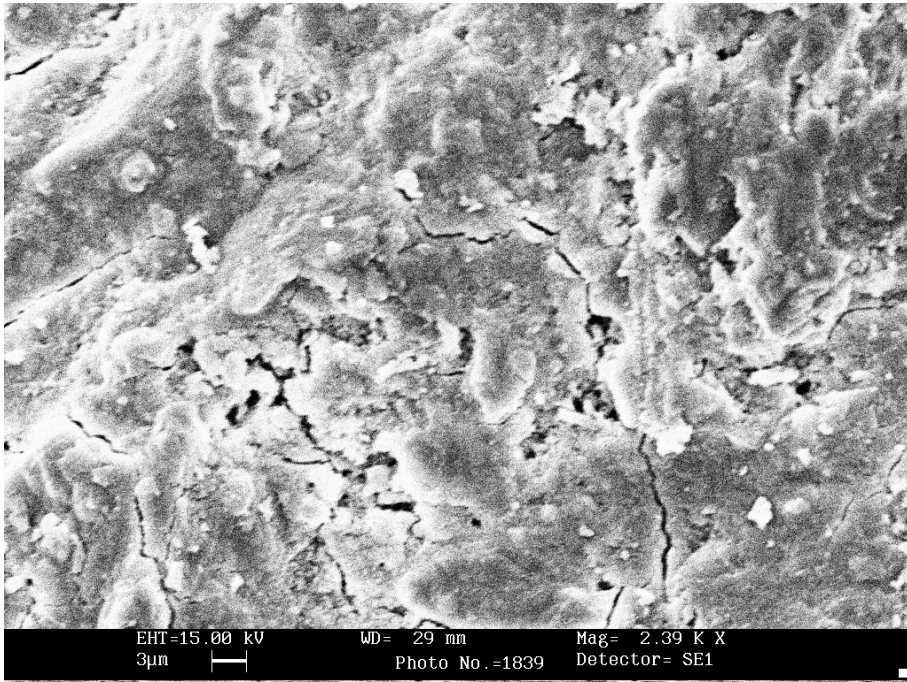
Son yükseltgenme potansiyelindeki akım miktarı (I_{AS}), yüzey filmindeki ve buna bağlı olarak metaldeki anodik çözünmenin ölçüsüdür.

ZT 30 numunesinde olduğu gibi ΔE_{PD} değerinin artıp, I_{KS} ve I_{AS} akımlarının azalması, yüzey filmi direncinin yüksek ve korozyon eğiliminin daha az olmasına işaret etmektedir.

Aşırı polarizasyon koşullarındaki son oksitlenme ve son indirgenme potansiyellerindeki akımları, R_p değerleri ve potansiyel duvar genişlikleri açısından incelendiğinde tahribatsız yöntemlerle elde edilen bulguları destekleyen sonuçlara ulaşılmıştır.

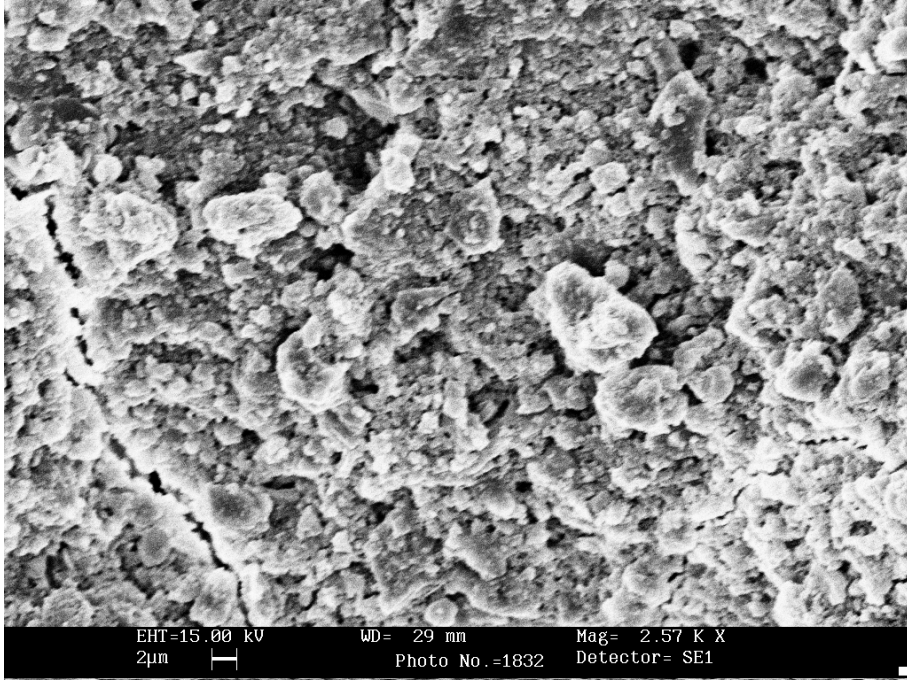
4.7. Elektrokimyasal Ölçümler Sonucunda Betonarme Numunelerin Mikro Yapısının İncelenmesi

Beton mekanik özelliklerinin dışında çelik-beton ara yüzey kalitesi bozukluğu donatı korozyonuna neden olmaktadır. Çelik-beton ara yüzey yapısını taramalı elektron mikroskopunda (SEM) inceleyebilmek için çeşitli elektrokimyasal yöntemlerle korozyon mekanizması belirlenen 50×50mm betonarme numunelerden yaklaşık 1×1 cm düzgün yüzeyli küp numuneler (çelik-beton ara yüzeyinden) kesilmiştir. ZT katkılı ve katkısız 360 günlük betonlara ait mikro yapısal özellikler x250 büyütmede alınan SEM fotoğrafları aşağıda verilmiştir (Resim 4.2-Resim 4.6).

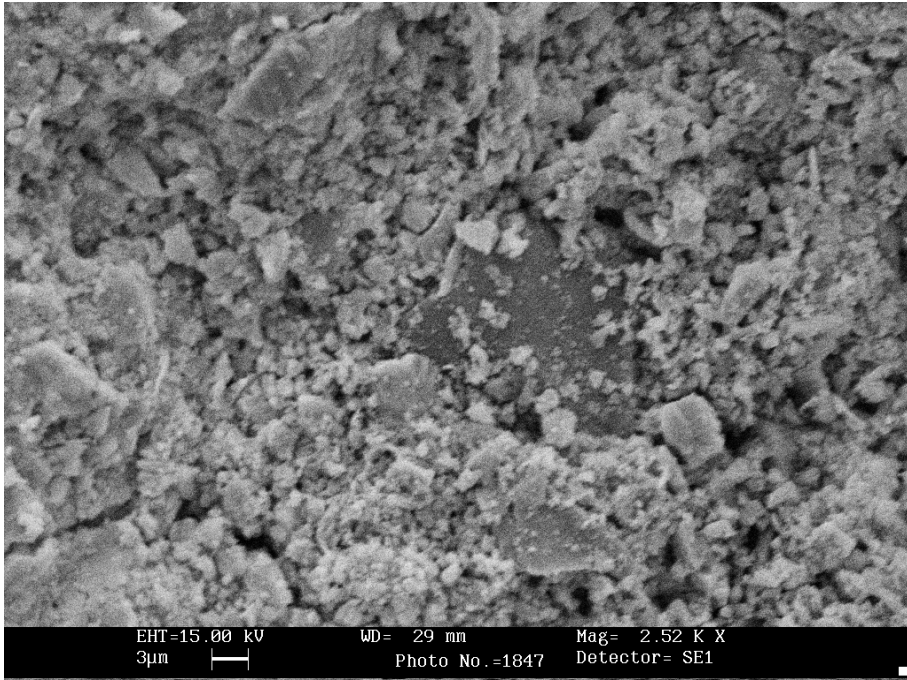


Resim 4.2. PÇ 42.5 (ZT0) betonun SEM görüntüsü

Resim 4.2’de ZT0 kontrol numunesinin mikro yapısı incelendiğinde çimento hamuru içerisinde çatlaklar görülmektedir.

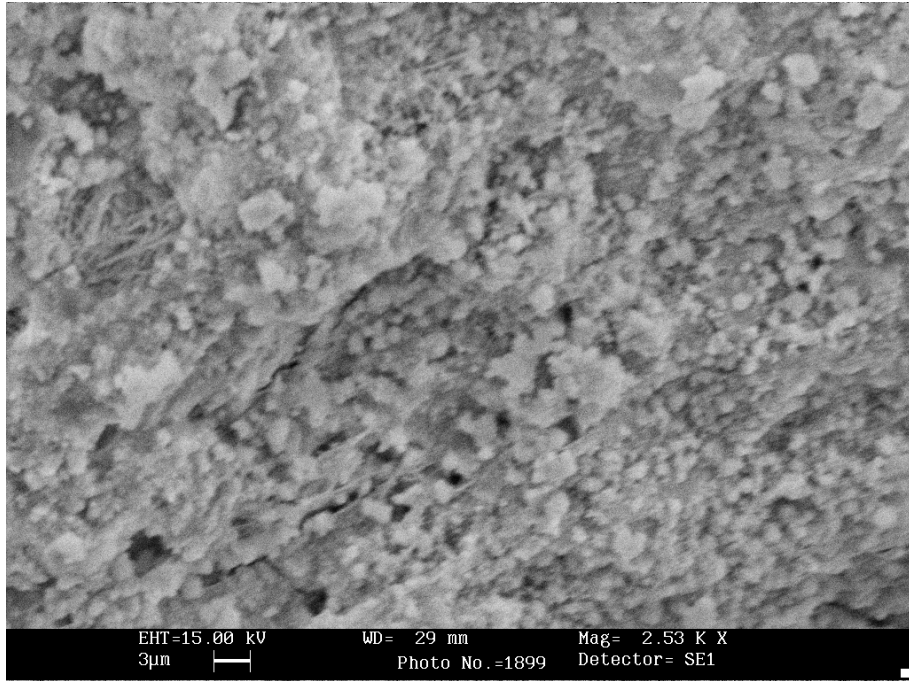


Resim 4.3. ZT10 betonun SEM görüntüsü

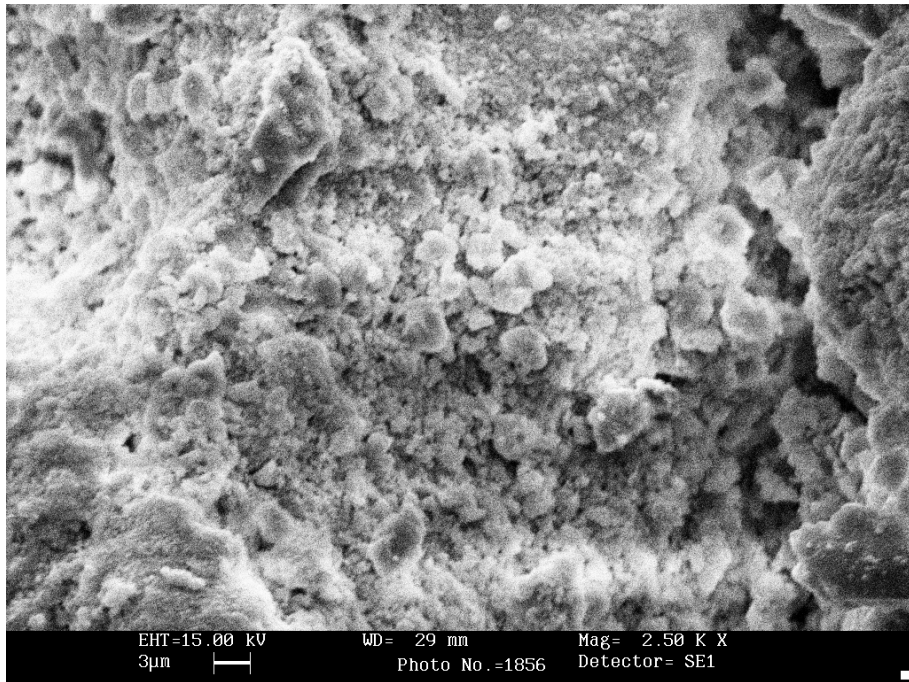


Resim 4.4. ZT20 betonun SEM görüntüsü

Resim 4.3 ve Resim 4.4 incelendiğinde ZT10 çimento hamurunun, ZT20 hamuruna benzer yoğunlukta olduğu görülmektedir



Resim 4.5. ZT30 betonun SEM görüntüsü



Resim 4.6. ZT40 betonun SEM görüntüsü

Resim.4.5 ve Resim 4.6 incelendiğinde ZT30 ve ZT40 hamurunun mikro yapısının boşluksuz ve yoğun olduğu görülmektedir. ZT katkılı çimento hidratasyonu sonucu oluşan jel partikülleri sürekli ve süreksiz boşlukları engellemektedir. Çimento içerine ikame edilen ZT oranı arttıkça mikro partiküllerin içerisinde jelleşmenin tamamlanma süresi kısalmaktadır.

SEM ile yapılan mikro yapı incelemeleri, sonuç olarak ZT katkılı çimento hamurlarının ZT katkısız çimento hamuruna göre daha yoğun olduğunu, özellikle ZT30 çimento hamurunun, puzolanik reaksiyon sonucunda oluşan ekstra bağlayıcı jeller sonucunda daha yoğun bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- ZT numunesinin kimyasal analiz sonuçlarına göre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içeriğinin % 77,08 olduğu ve X- ışını kırınımı (XRD) analizi sonucuna göre başlıca zeolit (klinoptilolit) ve kuvars minerallerinden oluştuğu belirlenmiştir.
- ZT numunesinin puzolanik aktivite deneyi sonuçlarına göre harç numunesinin eğilme ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla 2,1 ve 8,5 MPa'a ulaştığı, yüksek yüzey alanına sahip olduğu ($6333 \text{ cm}^2/\text{g}$) görülmektedir.
- ZT ikame oranı arttıkça, çimento hamurlarının su ihtiyacı artmaktadır ve çimento hamurlarının (İİ - İD grup) priz başlangıcı ve priz sonu süreleri kısalmaktadır. İD grup numunelerde, deniz suyundaki yüksek iyonik aktivitenin priz reaksiyonunu hızlandığı, priz başlangıç ve sona erme sürelerini bir miktar kısalttığı görülmektedir.
- ZT katkısı İİ ve İD grup harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları üzerinde benzer bir etki göstermiştir. 90. günde %10, %20 ve %30 ZT ikameli harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları kontrol numunelerine göre yüksek çıkmıştır. İD grup harç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımlarının 90. günde, ilk günlerdeki (7 ve 28.günler) bulguların tersine daha düşük olduğu görüldü. Deniz suyunda bekleme süresi arttığında deniz suyunun zararlı etkileri ortaya çıkmaktadır.
- Taze beton deney sonuçlarına göre ZT içeren katkılı beton karışımların normal kıvam suyu ihtiyaçları ZT ikame miktarı ile doğrusal olarak arttığından, sabit s/ç oranına sahip beton karışımlarının çökme değerleri azalmaktadır. ZT katkı miktarı arttıkça beton karışımlardaki hava miktarı ve birim hacim ağırlık değerleri de azalmaktadır.
- İİ ve İD grup ZT10 beton numunelerin, 7 ve 28.günlerde basınç dayanımlarının kontrol numunelerine (ZT0) yakın değerlerde olduğu, 90.gün ve üzeri

yaşlarda tüm ZT katkılı numunelerin kontrol numunelerinden daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bu durumda %40 daha az portland çimentosu kullanılarak (228kg/m^3) 360. günde 63,4 MPa basınç dayanımı gösteren bir beton karışımı elde edilmiştir.

- ZT ikame oranı arttıkça, beton numunelerin klor iyonu geçirimsizliklerinin ve su işleme derinliklerinin kontrol numunelerine göre azaldığı görülmüştür. Zeolitin normal çimentoya göre özgül yüzeyinin büyük olması moleküler elek özelliğini artırarak suyun ve çeşitli iyonların beton içindeki mobilitesini ve aktifliğini azaltan bir etki oluşturur. Deneysel çalışmada bu durum kendisini ıslanmanın ve geçirimsizliğin azalması şeklinde göstermektedir.
- ZT ikame oranı arttıkça, beton numunelerde ultrasonik ses hızlarının kontrol numunelerine göre arttığı görülmüştür. ZT betonda tercih edilen boşluk oranını, su işleme derinliğini ve klorür iyonu difüzyon hızını azaltmış; basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızını da arttırmıştır.
- Donatı çeliği korozyonunun başlangıcında (1-3. günler) tüm numuneler için geniş bir aralığa yayılan potansiyel değişimleri dengeye gelmeden önceki reaksiyon kinetiği ile ilgilidir. Yarı hücre potansiyel yöntemine göre açık devre potansiyellerinin ilk günlerdeki ölçümleri bu değişken karakteri nedeni ile betonarme korozyon özellikleri hakkında geçerli bilgi vermeyecektir.
- Tüm numunelerin 39.günden itibaren açık devre potansiyellerinin -273 mV/SCE'den daha negatif olması yarı hücre potansiyel yöntemine göre (ASTM C 876) donatının korozyona uğrama olasılığını artırmaktadır. Yarı hücre potansiyel yöntemi korozyon çalışmalarında önemlidir. Bununla birlikte özellikle kimyasal çevresi değişkenlik gösteren betonarme yapılarda, ara yüzeylerde (beton-çelik) film büyümesi zamanla lokal delinmelerin artması ile eş zamanlı olarak ortaya çıkan lokalize korozyon açısından özellikle değerlendirilmelidir. Bu nedenle çalışmaların bir bölümünde numunelerin lokalize karakterini ortaya koyan elektrokimyasal

gürültü teknikleri (elektrochemical noise technique) literatürden farklı bir uygulama ile kullanılmıştır.

- Betonarme numunelerin 39-98. günlerde açık devre yüklerinin (Q_{ADP}) elde edilmesi sonucunda; katodik korozyon aktivitelerinin genel olarak ZT oranının artması ile azaldığı ve ZT30 numunesinde (Q_{net}) az olup en küçük değerler aldığı olduğu görülmüştür. Kontrol numunesinde (ZT0) donatı yüzeyinde lokalize korozyon gelişimi en fazladır. ZT katkısı iletken yolları kapamış ve korozyonu yavaşlatmıştır.
- Bu çalışmanın 39. gününden sonra açık devre potansiyellerinin (E_{ADP}), korozyon potansiyellerine ($E_{i=0}$) yakın değer almaya başlaması sistemin dengeye geldiğini ve kıyaslanabilir sağlıklı ölçümlere ulaşıldığını göstermektedir. Kontrol numunesinde (ZT0) E_{ADP} ile $E_{i=0}$ değerlerinin çakışmaması hali tersinmez lokalize korozyon reaksiyonlarının aktifleşmesi ihtimalini artırmaktadır.
- 39-98.günlere ait polarizasyon dirençleri ve korozyon akımları birlikte değerlendirildiğinde, ZT katkısının artışına bağlı olarak donatı korozyon direncinin genellikle artıp korozyon akımlarının azaldığı yani korozyonun yavaşladığı görüldü. ZT30 numunesi korozyona en dirençli koşulları sağlamaktadır.
- 39. günden sonra tüm numuneler için potansiyel gürültü değerleri benzer özellik göstermesine rağmen elektrokimyasal akım gürültü değerleri ZT katkılı numunelerde azalmıştır. Akım titreşim genliklerinin ZT30 numunelerde belirgin bir şekilde azalması yüzeydeki korozyon olaylarının daha homojen ve düzenli olduğunu, lokalize korozyonun engellediğini göstermektedir.
- Betonarme numunelerin kimyasal çevre değişimine karşı gösterdiği direncin tahribatsız elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi sonucunda; ZT30 ve ZT40 numunelerde suda ve havada elde edilen bütün korozyon parametrelerindeki ($E_{i=0}$, R_p ve Q_{net}) farkların en küçük değerlere ulaştığı görülmüştür. Bunun anlamı suyun gel-git etkisi ile oluşan oksijen konsantrasyon farkının numunenin korozyon

özelliklerini etkilememesi yani tehlikeli lokalize korozyona ilave bir ivme katmamasıdır.

- Betonarme numunelerin korozyonunun tahribatlı elektrokimyasal yöntemler ile incelenmesi sonucunda; ZT0 numunelerin potansiyel duvarı genişliğinin ZT katkılı numunelerden küçük olduğu görülmüştür. ZT 30 numunesinde potansiyel duvarı genişliğinin en büyük olması yüzey film direncinin yüksek ve korozyon eğiliminin daha az olmasına işaret etmektedir. Bu sonuçlara göre tahribatlı ve tahribatsız elektrokimyasal deney bulguları örtüşmektedir.
- Tüm beton ve betonarme numunelere ait deneysel bulgular topluca değerlendirildiğinde; ZT30 betonun özellikle deniz suyunun gel-git etkisi (ıslanma-kuruma) durumunda betonarme çeliğine lokalize korozyona karşı en iyi koruma sağladığı görülmektedir.
- Çelik-beton ara yüzey yapısının taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmesi sonucunda; ZT0 çimento hamurunun içerisinde çatlaklar olduğu, ZT30 hamurunun mikro yapısının tamamen boşluksuz ve yoğun olduğu görülmektedir. ZT katkılı çimento hidratasyonu sonucu oluşan CSH jelleri başlangıçtaki duruma göre daha büyük hacme sahiptir. Çimento jel partiküllerinin genişmesi sonucunda (porozitenin azalması) sürekli ve süreksiz boşluklar engellenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Şimşek, O., “Beton ve Beton Teknolojisi”, *Seçkin Yayınevi*, Ankara, 1-50 (2007).
2. Nowak, A.S. and Collins, K., “Reliability of Structures”, *McGraw-Hill*, Boston, 3-
3. Basheer, P.A.M., Chidiac, S.E and Long. A.E., “Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures”, *Construction and Building Materials*, 10:27-37 (1996).
4. Neville. A.M., “Properties of Concrete”, *Third Edition Longman Scientific and Technical*, New York, 433-529 (1992).
5. Massazza, F., “Pozzolanas and Durability of Concrete”, 1st Int.Sym. Mineral Admixtures in Cement, *Turkish Cement Manufacturers Association*, 1-22 (1997)
6. Camacho, R.E.R., Afif. R.U., “Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability”, *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 32:1851-1858, (2002).
7. Erdoğan, T. E., “Beton”, ODTÜ *Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını*, Ankara, 52-58 (2003).
8. H. Yalçın, T. Koç, “Mühendisler İçin Korozyon”, TMMOB, *Kimya Mühendisleri Odası*, Ankara, 7-10 (1998).
9. Hausman, D.A., “Electrochemical Behavior of Steel in Concrete”, *Journal Ame. Concrete Inst.*, 61:171-174 (1964).
10. Hewlett, P.C., “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, *John Wiley and Sons Inc* , Fourth Edition, New York, 1-19 (1998).
11. Costa. U., Massazza. F., “Factors Affecting the Reaction with Lime of Italian Pozzolanas”, *II Cemento*, Italy, 131-139 (1981).
12. TS 25, “Tras”, *TSE*, Ankara, 2-10 (1975).
13. Terzibaşoğlu, N., “Andezitin Traslı Çimento Üretiminde Kullanımı”, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası*, Ankara, 1-6 (1995).
14. Breck. D.W., “Zeolite Molecular Sieve Structure Chemistry and Use”, *John Wiley and Sons*, New York, 771 (1974).

15. Erdem, E., Donat R., Çetisli, H., “Hydration and Mechanical Properties of Cement Containing Zeolite”, ***1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement***, 6-9 November , Istanbul-Turkey, 216-220 (1997).
16. Bektas, F., Uzal, B., Turanlı, L., “Öğütülmüş Doğal Zeolitin Doğal Alkali-Silika Reaksiyonu ve Sülfat Etkisi ile Genleşmesinin İncelenmesi”, ***5. Ulusal Beton Kongresi***, İMO İstanbul Şubesi, İstanbul, 403-409 (2003).
17. Sersale, R., Frigione, G., “Natural Zeolites As Constituents Of Blended Cements”, ***La Chimica E L'Industria***, 67:177-180 (1985).
18. Naiqian, F., Hongwei, J., Enyi, C., “Study on the Suppression Effect of Natural Zeolite on Expansion of Concrete Due to Alkali-Aggregate Reaction”, ***Mag. of Conc. Res.***, 50(1):17 (1998).
19. Taban, S., Şimşek, O., “Zeolitik Tüf Katkı Oranı ve Deniz Suyunun Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, ***Gazi Üni. Müh. Mim. Fak. Dergisi***, 24(1):145-153 (2009).
20. Canpolat, F., Yılmaz, K., Sümer, M., Uysal, M., “Zeolit Katkılı Çimentoların Özelliklerinin İncelenmesi”, ***6. Ulusal Beton Kongresi***, İMO İstanbul Şubesi, İstanbul, 63-71 (2005).
21. Erdem, E., Donat, R., Çetisli, H., “Hydration and Mechanical Properties of Cement Containing Zeolite”, ***1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement***, İstanbul, 216-220 (1997).
22. Cilason, N. ve Aksoy, N., “Beton Yapı Hasarları Onarım ve Korunması”. ***Yalkın Yayınevi***, 91 (2000).
23. Akman, M.S. ve Özyurt, N., “Beton Kıyı Yapılarında Denizın Geçirimsizlik Üzerine Etkisi”, ***Kıyı Mühendisliği Bildiri Notları***, İMO Ankara, 3-18 (2002).
24. Baradan, B. ve Yazıcı, H., “Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler”, ***Türkiye Mühendislik Haberleri***, 426(4):62-69 (2003).
25. Yüzer, N. ve Aköz, F., “Betonarme Deniz Yapılarında Klorür Difüzyonunun Donatı Korozyonuna Etkilerinin Araştırılması”, ***Kıyı Mühendisliği Bildiri Notları***, İMO Ankara, 277-290 (2002).
26. Ünal, Ç. “Lastik Agregalı Harçlarda Deniz Suyu Etkisi”, , Osmangazi Üniversitesi, Müh Mim. Fak., ***İnş. Müh. Böl. Bitirme Ödevi***, Eskişehir, 36 (2003)
27. Neville, A.M., “Properties of Concrete”, ***Longman Scientific & Technical***, 77-80 (1995).

28. Yalçın, H., Gürü, M., “Çimento ve Beton”, **Palme Yayıncılık**, Ankara, 126-214 (2006).
29. Andrade, C. ve Alonso, C., “Progress on Design and Residual Life Calculation With Regard To Rebar Corrosion of Reinforced Concrete”, ASTM STP 1276. N.S. Berke. E. Escalante. C.K. Nmai and D. Whitting Eds., **American Society for Testing and Materials**, 23-40 (1996).
30. ACI Report, “ Mechanism of Corrosion of Steel in Concrete”, Report ACI Commite 222 Title No: 82-1, **ACI Journal**, 82:1-35 (1985).
31. Akman, M.S., “Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi”, **İ.T.Ü. Matbaası**, İstanbul, 110-120 (1992).
32. Mehta, P.K., “Concrete Structure Properties and Materials”, **Prentice- Hall. Inc.**, New Jersey, 336 (1986).
33. Boyd, W.K., Tripler, A.B., “Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete”. **Material Protection**, 7(10): 40-47 (1968).
34. Page, C.L., Treadaway, K.W.J.,” Aspects of the Electrochemistry of Steel in Concrete”, **Nature**, 109-117 (1982).
35. Paurbaix, M., “Atlas of Electrochemical Eguilibrium in Agucous Salutions”, **Pergamon Pres Ltd.**, London, 314 (1976).
36. Dönmez, B., Çiçek, T., Palabıyık. S., “Betonarme Yapılardaki Korozyonun Doğal Organik Maddelerle Engellenmesi”, Araştırma Projesi Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fak. Kimya Böl.**, Ankara, 8-11 (2004).
37. Page, C.L., “Corrosion and Protection of Reinforcing Steel in Concrete”, Durability of Concrete and Cement Composites, **Woodhead Publishing**, Cambridge, 136-186 (2007).
38. Tokyay, M., “Agresif Ortamlarda Çimentolu Sistemler”, **Çimento ve Beton Dünyası**, 8:13-15 (1997).
39. Nordström, E., “Steel Fibre Corrosion in Cracks Durability of Sprayed Concrete. Licantiate Thesis”, **Lulea University of Technology. Department of Civil and Mining Engineering**, Sweden, 23-28 (2000).
40. Akman, M.S., “Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri”, Türkiye İnsaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi, **İMO İzmir Şubesi**, 26, (1997).
41. Yazıcı, H., “Accelerated Carbonation Test of Concrete”, Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 121 (1997).

42. Stratfull, R.F., "How Chloride Affect Concrete Used with Reinforced Steel", **Material Protection**, 7(3):29-34, (1968).
43. Erbil, M., "Korozyonun Önlenmesi", Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, **V. Korozyon Sempozyumu**, Adana, 224-237 (1996).
44. Postacıoğlu, B., "Beton (Bağlayıcı maddeler, agregalar, beton)", **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 175 (1986).
45. Griffin, D.F., "Test on Reinforced Concrete Salt Gain Accelerates Corrosion of Steel", **Materials Protection**, 6-39 (1967).
46. Yalçın, H. ve Koç. T., "Katodik Koruma", **Palme Yayıncılık**, Ankara, 269-295 (1999).
47. Jamil, H. E., Montemor, M. F., Boulif, R., Shri, A. and Ferreira, M. G. S., "Erratum to an Electrochemical and Analytical Approach to the Inhibition Mechanism of an Amino-Alcohol-Based Corrosion Inhibitor for Reinforced Concrete", **Electrochim. Acta**, 48 :3509-3518 (2003).
48. Gjorv, O.E., Vennesland, O., El Busaidy, A.H.S., "Diffusion of Dissolved Oxygen Through Concrete", **Materials Protection**, 25-39 (1986).
49. Uhlig, H.H., "Corrosion and Corrosion Control", **John Wiley and Sons**, New York, 23 (1971).
50. Yalçın, H., Gürü, M., "Elektrokimya ve Uygulamaları", Ankara, 139-150 (2009).
51. Atkins, Peter, W., "Physical Chemistry", **W.H. Freeman Co**, New York, 5-12 (1986).
52. Kıncay, O., "Kapalı Devre Mekanik Tesisatlarda Korozyon", **Yıldız Teknik Üniversitesi Ders Notları**, İstanbul, 21-25 (2007).
53. Yüksek, E., "Çelik Malzemelerin Aşınma ve Korozyon Davranışını Arttırmak İçin Çeşitli Kimyasal Kaplamaların İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **YTÜ**, 15-27 (2005).
54. Uysal, M., "CrN. TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin Korozyon Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi**, 35-40 (2006).
55. Üneri, S., "Korozyon ve Önlenmesi", Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Fizikokimya Anabilim Dalı, **Korozyon Derneği**, Ankara. 136-284 (1998).
56. Powers, T.C., "The Physical Structure of Cement and Concrete, Cement and Lime Manufacture", 29(2):13-24 (1956).

57. Auskern, A., Horn, W., “Caoillary Porosity in Hardened Cement Paste”, *Journal of Testing and Evaluation*, 1:74-79 (1973).
58. Lea, F.M., “The Chemistry of Cement and Concrete”, 3rd ed., London, 442 (1970).
59. Basheer, P.A.M., Chidiac, S.E. and Long, A.E., “Predictive Models for Deterioration of Concrete Structures”, *Construction and Building Materials*, 10(1):27-37 (1996).
60. Coşkun, N. ve Esin. T., “Betonarme Prefabrike Yapım Yöntemlerinin Çevresel Açından Analizi”, *12. Beton Prefabrikasyon Sempozyumu Prefabrikasyonda Yenilikler ve Eğitim*, İstanbul, 7-8 (2007).
61. Arslan, M., “Beton”, *Atlas Yayınevi*, Ankara, 156, (2001).
62. Çil, İ., “Betonarme Donatısında Elektriksel Yöntemlerle Korozyon Ölçümü”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1):59-63, (2006).
63. Güneyisi, E., Özturan., T. ve Gesoğlu, M., “Farklı Çimento Tipi Kullanımını Betonun Durabilite Özellikleri Üzerine Etkileri”, *Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi*, TMMOB İMO., İstanbul, 170 (2004).
64. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., “Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, İzmir, 298-282 (2002).
65. Brown, R.P, Tinnea, J.S., “Cathodic Protection Design Problems for Reinforced Concrete”, *Materials Performance*, 30:28-31 (1991).
66. Kahyaoğlu, H., Yazıcı, B., Erbil, M., “Beton ve Betonarme Çeliğinin Korozyonu”, Adana, 11:13-16 (1986).
67. Haliloğlu, N., “Korozyonun Nedenleri ve Önlenmesi”, Ankara, 70:101-111 (1986).
68. Wranglen, G., “An Introduction to Corrosion and Protection of Metals”, *Butler and Tunner Ltd. Frome and London*, 7-20 (1972).
69. Erbil, M., “Korozyon İnhibitörleri ve Etkinliklerinin Saptanması”, *Çukurova Üniversitesi Matbaası*, Adana, 148 (1980).
70. Kaesche, H., “Metallic Corrosion”, *National Association of Corrosion Engineers*, Houston, 16 (1986).
71. Yalçın, H., Gürü, M., “Metallerin Korozyonu”, *Palme Yayıncılık*, Ankara. 173-228 (2002).

72. Berke, N.S., Shen, D.F., Sundberg, K.M., "Comparison of the Polarization Resistance Technique to the Macrocell Corrosion Technique", *ASTM STP*, 1065:38-51 (1990).
73. M. Stern, A.L., Geary, J., "Electrochemistry", *Electrochem. Soc.*, 104 :56–62 (1975).
74. Searson, P.C., Dawson, J.L., "Analysis of Electrochemical Noise Generated By Corroding Electrodes Under Open-Circuit Conditions", *J. Electrochem. Soc.*, 135(8):1908-1915 (1988).
75. Hladky, K., Dawson, J.L., "The measurement Of Localised Corrosion Using Electrochemical Noise", *Corrosion Science*, 21(4):317-322 (1981).
76. Helvacı, C., Alaca, O., "Bigadiç Borat Yatakları ve Çevresinin Jeolojisi ve Mineralojisi", *MTA Dergisi*, 113:61- 92 (1991).
77. Baysal, O., Gündoğdu, A., Temel, Ö.F., "Bigadiç Zeolit Oluşumlarının Ekonomik Jeolojik İncelenmesi Projesi", *H.Ü. Yuvam*, 85-2 (1988).
78. Göktekin, A., "Bigadiç Tülü Ovası Zeolitlerinin Teknolojik Özelliklerinin Araştırılması", *İ.T.Ü. Yer Bilimleri ve Yeraltı Kaynakları*, 38-42 (1989).
79. TS EN 197-1, "Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim. Özellikler ve Uygunluk Kriterleri", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 5-20 (2002).
80. TS EN 196-1, "Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2-10 (2002).
81. TS 3530 EN 933-1, "Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 4-9 (1999).
82. TS 3529, "Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-5 (1980).
83. TS EN 1097-6, "Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1-13 (2002).
84. TS EN 1097-2, "Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 7-10 (2000).
85. TS EN 196-3, "Çimento Deney Metotları-Bölüm 13: Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi Tayini", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2-8 (2002).

86. TS EN 206-1, “ Beton- Bölüm 1: Özellik. Performans. İmalat ve Uygunluk”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 10-15 (2002).
87. TS 802, “Beton Karışım Hesap Esasları”, ***Türk Standartları Enstitüsü*** , Ankara, 2-6 (1985).
88. TS EN 12350-2, “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 1-3 (2002).
89. TS EN 12350-7, “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini - Basınç Metotları”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 4-9 (2002).
90. TS EN 12350-6, “Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 5: Yoğunluk”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 1-5 (2002).
91. TS EN 12390-2, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2: Dayanın Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Yapımı ve Küre Tabi Tutulması”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 3-6 (2002).
92. TS EN 12390-3, “Serleşmiş Beton Deneyleri Bölüm: 3 Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 5-9 (2003).
93. ASTM C1202-09, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, ***American Society for Testing and Materials***, 5-16 (2009).
94. TS EN 12390-8, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 8:Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 7-8 (2002).
95. ASTM C 597, “Standart Test Method for Pulse Velocity Through Concrete”. ***American Society for Testing and Materials***, 1-3 (1998).
96. TS 3624, “Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık.Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu”, ***Türk Standartları Enstitüsü***, Ankara, 6-8 (1981).
97. Kıyak, T., “Betonarme Yapılara Doğal Katkı Maddeleri ile Çözüm Önerileri”, Proje çalışması, 15-23 (2003).
98. Kadiroğlu, İ., “Deniz Suyunun Beton Karma Suyu Olarak Kullanılabilirliği”, ***Hazır Beton Dergisi***, 48-51 (2000).
99. Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., Uyan, M., “Meslek Liseleri İçin Her Yönü ile Beton”, ***Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını***, İstanbul, 75 (2004).
100. Turanlı, L., Yücel, H., v.d., “Doğal Zeolitlerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı”, ***Proje No: 104M393***, Ankara, 5-43 (2007)

101. Chang, Z.T., Cherry, B., Marosszeky, M, “Polarisation Behaviour of Steel Bar Samples in Concrete in Seawater Part 1: Experimental Measurement of Polarisation Curves of Steel in Concrete”, *Corrosion Science*, 50:357-364 (2008).
102. Vedalakshmi, R., Manoharan, SP., Ha-Won Song , Palaniswamy, N., “Application of Harmonic Analysis in Measuring The Corrosion Rate of Rebar in Concrete”, *Corrosion Science*, 51:2777-2789 (2009).
103. ASTM C-876, “Standard Test Method for Half- Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”, *American Society for Testing and Materials*, 2-9 (2001).
104. Yoon-Seok Choi, Jung-Gu Kim, Kwang-Myong Lee, “Corrosion Behavior of Steel Bar Embedded in Fly Ash Concrete”, *Corrosion Science*, 48:1733-1745 (2006).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TABAN, Saniye
Doğum tarihi ve yeri : 13.02.1974 Ankara
e-mail : saniyetaban@mynet.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi, FBE, Yapı Eğitimi	2010
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi, FBE, Yapı Eğitimi	2005
Lisans	Hacettepe Üniversitesi, Hidrojeoloji Müh.	1997
Lise	Çankaya Lisesi	1992

Yabancı Dil İngilizce-Fransızca