

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TUĞLA TOZU KATKILI HARÇLARDA DONATI
KOROZYONUNUN ARAŞTIRILMASI**

Süleyman DALKILIÇ

**Danışman
Doç. Dr. Emre SANCAK**

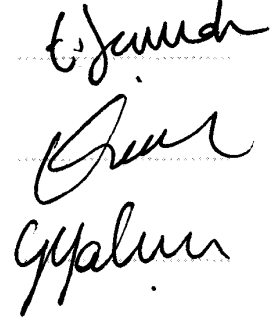
**YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2014**

©2014 [Süleyman DALKILIÇ]

TEZ ONAYI

Süleyman DALKILIÇ tarafından hazırlanan "**Tuğla Tozu Katkılı Harçlarda Donatı Korozyonunun Araştırılması**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yapı Eğitimi Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman	Doç. Dr. Emre SANCAK Süleyman Demirel Üniversitesi
Jüri Üyesi	Doç.Dr. Osman ÜNAL Afyon Kocatepe Üniversitesi
Jüri Üyesi	Yrd.Doç. Dr. S.Gamze ERZENGIN Süleyman Demirel Üniversitesi



Enstitü Müdürü **Prof. Dr. Ahmet ŞAHİNER**

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Süleyman DALKILIÇ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	5
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Portland Çimentosu (PÇ)	6
2.2. Mineralojik İkame ve Katkılar	7
2.2.1. Çok ince öğütülmüş mineral katkıları	8
2.2.2. Puzolanik malzemeler	9
2.2.3. Çimentoda puzolanik özellik gösteren mineralojik katkıların etkileri	13
2.3. Tuğla ve Mineralojik Olarak Tuğla Tozları	15
2.3.1. Tuğla	15
2.3.2. Tuğlanın endüstri atığı olarak yeri	15
2.3.3. Mineralojik olarak tuğla tozlarının incelenmesi	18
2.4. Donatılardaki Korozyon.....	20
2.4.1. Korozyon.....	20
2.4.2. Betondaki klor iyonlarının korozyona etkisi.....	27
2.5. Donatılardaki Korozyon Riskinin Belirlenmesi.....	30
2.5.1. Ohm kanunu ve korozyon hızı	32
2.5.2. Korozyon ölçüm yöntemleri	34
2.6. Kaynak Taraması	50
3. MATERYAL VE METOT	62
3.1. Deney Programı	62
3.2. Kullanılan Malzemeler.....	62
3.2.1. Tuğla tozu.....	62
3.2.2. Çimento	64
3.2.3. Standart CEN kumu	65
3.2.4. Karışım suyu	66
3.2.5. Donatı çeliği (çalışma elektrodu).....	67
3.3. Metotlar	68
3.3.1. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneyi	70
3.3.2. Standart kıvam tayini deneyi.....	71
3.3.3. Priz başlama ve bitiş süresinin tayini deneyi	73
3.3.4. Hacim genleşmesinin tayini deneyi	74
3.3.5. Taze harç kıvamının tayini deneyi	75
3.3.6. Kullanılan çimento harçların dayanım tayini deneyleri	80
3.3.7. Su emme oranı, birim ağırlık, boşluk oranı ve yoğunlukların tayini deneyleri	85
3.3.8. Kılcal su emme (kapilarite) tayini deneyi	91
3.3.9. Korozyon tayini deneyleri.....	93
3.3.10. Karbonatlaşma tayini deneyi.....	104

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	105
4.1. Tuğla Tozu Miktarı Standart Kıvama Etkisi	105
4.2. Tuğla Tozu Miktarının Priz Sürelerine Etkisi	106
4.3. Tuğla Tozu Miktarının Hacim Genleşmesine Etkisi	107
4.4. Tuğla Tozu Miktarının Taze Harç Kıvamına Etkisi	108
4.5. Tuğla Tozu Miktarının Prizmatik Numuneler Üzerindeki Etkileri	109
4.5.1. Tuğla tozunun su emme, boşluk oranı ve birim hacim ağırlıklarına etkisi	109
4.5.2. Tuğla tozu miktarının eğilme ve basınç dayanımlarına etkisi	112
4.5.3. Tuğla Tozunun Kapiler Su Emmeye Etkisi	115
4.6. Tuğla Tozunun Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkileri	117
4.7. Karbonatlaşma Derinliğine Tuğla Tozu Atığı Kullanımının Etkisi	125
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR	132
EKLER	143
EK A. Çizelgeler	144
ÖZGEÇMİŞ	145

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TUĞLA TOZU KATKILI HARÇLARDA DONATI KOROZYONUNUN ARAŞTIRILMASI

Süleyman DALKILIÇ

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Emre SANCAK

Bu tez çalışmasında, tuğla atıklarının toz halinde, çimento harcı içerisine, çeşitli miktarlarda ilave edilmeleri sonucu, harç özelliklerine olan etkileri ile donatı korozyonuna karşı koruma etkinliği; normal portland çimentosu ve üretilen çimentoların birbirleriyle mukayesesi yapılarak incelenmiştir.

Tuğla tozu çimento ağırlığının %0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 oranlarında doğrudan çimento harcına ikame olunmuştur. Hazırlanan çimentoların performansları, çimento hamuru ve harcı olmak üzere iki farklı durumları üzerinde incelemeler yapılmıştır. Hazırlanan prizmatik harç numunelerinin 7 ve 28 gün suda kürlenmeleri sağlanmıştır. Kür süreleri sonunda, standartlara uygun olacak şekilde, eğilme ve basınç dayanımlarına ve fiziksel özelliklerindeki performanslarına bakarak, tuğla tozunun çimento özelliklerine etkisi incelenmiştir. Mekanik özellikleri bakımından, yeterli oldukları belirlenenler ile en düşük ve en yüksek tuğla tozu ikameli numunelerinden; %5, 15, 30, 40 oranlarında, tuğla tozu içeren harçlarla donatılı örnekler üretilmiştir. Tuğla tozu ikameli harç numunelerin, donatı çeliğini korozyona karşı koruma etkinliğini belirlemek üzere, %5'lik NaCl çözeltisi içerisinde 267 gün bekletilmişlerdir. Numunelerin korozyon özellikleri, 267 gün boyunca belirli periyotlarda elektrokimyasal ölçümleri takip edilerek; polarizasyon direnci (R_p), açık devre potansiyeli (E_{adp}), korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}), korozyon hızı (mpy) değerleri elde edilmiştir. Korozyon deneylerinin bittiği gün olan 267. gün sonunda bu numunelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri de incelenmiştir.

Sonuç olarak, çimento yerine ağırlıkça tuğla tozu kullanım oranı artışına bağlı olarak numunelerin kıvam suyu miktarları, priz başlama ve bitiş süreleri artış eğilimi sergilemiştir. Prizmatik numuneler üzerinde yapılan araştırmalarda tuğla tozu ikamesinin su emme, porozite, kapiler su emme değerlerini arttırdığı; yoğunluk ve eğilme - basınç dayanımı değerlerini azaltma eğilimi olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte referans ve diğer tuğla tozu ikameli numuneler arasında en iyi sonucu %5 tuğla tozu ikameli karışım grubunun verdiği görülmüştür. Silindirik Ø5 x 10 cm boyutlarındaki korozyon numunelerinin, tuğla tozu artışına bağlı olarak, korozyona uğrama eğilimleri hakkında, TTİ5 numunesi referansla benzer eğilim göstermesi ve korozyon oluşumu bakımından düşükten yükseğe doğru TTİ15, TTİ30, TTİ40 şeklinde sıralandığı ve referansa göre de, daha dayanıklı oldukları söylenebilir.

Korozyon dayanımı bakımından en iyi davranışı %15 tuğla tozu atığı ikameli numunelerin sergilediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yapı malzemeleri, çimento, geri dönüşüm, tuğla tozu atığı, korozyon, elektrokimyasal korozyon ölçümü, puzolanik malzeme.

2014, 145 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

RESEARCH OF REINFORCEMENT CORROSION ON MORTARS OF BRICK POWDER ADDITION

Süleyman DALKILIÇ

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Construction Education**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Emre SANCAK

In this thesis study, as the result of adding brick waste as powder later in different quantities into cement mortar, the effects on mortar features and protection effectiveness against to equipment fittings corrosion was examined contrasting normal Portland cement and produced cement.

Brick powder, at rate % 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 of cement was replaced into the cement mortar. The performances of prepared cement were examined in two different situations as cement paste and cement mortar. Prepared prismatic mortar samples were cured in water during 7 and 28 days. At the end of curing duration, the effect of brick powder on cement features in accordance with standards was searched looking at performance in physical features, and bending and pressure strength. Samples reinforced with mortars including brick powder at rate % 5, 15, 30, 40 were produced from the samples replaced the highest and the lowest brick powder, and those determined as sufficient in respect to mechanical features. Mortar samples replaced brick powder were kept waiting in %5 NaCL solution for 267 days to determine protection effectiveness against corrosion of equipment fitting steel. Polarization resistance (R_p), open circuit potential (E_{adp}), corrosion current density (I_{corr}), corrosion speed (mpy) values and corrosion features of the samples of which electrochemical measurements in certain periods were followed during 267 days were obtained. At the end of the 267th day in which the corrosion experiments finished, some physical and mechanical features of those samples were examined.

As a result, consistence water quantities of samples and set start and finish duration showed upward movement, depending on usage rate of brick powder instead of cement. In the research done on prismatic samples, it was stated that brick powder increased water absorption, porozite and capillary water absorption values, and there is decreasing trend of density and trend - pressure strength values. However, it was seen that the best result was given by %5 mixture group replaced brick powder between referance and the other samples replaced brick powder. It can be said that about the tendency of subjecting to corrosion depending on the brick powder increase of corrosion samples at Ø5 x 10 cm dimensions and cylindirical, TTI5 sample shows similiar tendency, they are arranged as TTI15, TTI30, TTI40 from the lowest to the highest in respect to occuring corrosion anda re more durable according

to the reference. It was seen that samples replaced %15 brick powder waste showed the best behaviour in respect to strength.

Keywords: Construction materials, cement, recycling, brick powder, waste, corrosion, electrochemical corrosion measurement, pozzolanic materials.

2014, 145 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi, öneri ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışmanım Doç. Dr. Emre SANCAK'a teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım; Ömer ÇOBAN ve Halil KILAVUZ'a ve gerekli materyallerin temininde ve Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Laboratuvarlarından istifade etmemde her zaman destek olan sayın Prof. Dr. Mümin FİLİZ'e, Turgutlu Tuğla ve Kiremit Teknik Koordinatörü; Tamer ÇALIŞ'a teşekkür ederim.

3062-YL-12 No` lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tezimin oluşturulması için kullanılan hammadde temininde sağladıkları kolaylıklardan dolayı Yüksel Toprak Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Süleyman DALKILIÇ
ISPARTA, 2014

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Mineralojik ikame ve katkıların şematik olarak gruplandırılması.....	8
Şekil 2.2. Çimento ve mineral katkı kullanımı ve bileşenlerin durumu	14
Şekil 2.3. Çimento hamur yapıları	14
Şekil 2.4. Türkiye’ de 1999 – 2005 yılları arasında tuğla üretimi kapasite kullanımı.....	16
Şekil 2.5. Tuğla tozunun X-ışınları difraksiyonu.....	18
Şekil 2.6. Tuğla tozunun mikro yapısı	19
Şekil 2.7. Tuğla tozunun element sayıları	19
Şekil 2.8. Beton içine gömülü olan donatının korozyonu ve passivasyon tabakasının oluşumu	24
Şekil 2.9. Beton içine gömülü donatının korozyonunu grafik olarak gösterimi	26
Şekil 2.10. (a) Değişik korozyon ürünlerinin demire kıyasla hacim değişimleri, (b) korozyon sonucu betonarme elemanlarda görülen hasarlar.....	26
Şekil 2. 12. Demir üzerinde elektriksel dirence sebep olan filmlerin şematik olarak gösterimi	32
Şekil 2.13. Donatıda gerçekleşen lokal korozyon hasarı ve eşdeğer üniform malzeme kaybının şematik olarak gösterimi	33
Şekil 2.14. Beton içindeki çelik donatının yarı hücre yöntemiyle elektropotansiyel değerinin belirlenmesi	38
Şekil 2.15. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri.....	41
Şekil 2.16. Lineer polarizasyon eğrisi (η: Potansiyel fark, i: Uygulanan akım).....	43
Şekil 2.17. Lineer polarizasyon rezistans ölçümünde kullanılan üç elektrotlu deney düzeneği	44
Şekil 2.18. Potansiyostatik polarizasyon incelemelerinde kullanılan eski tip deney düzeneği	47
Şekil 2. 19. Potansiyostat cihazı yardımıyla potansiyostatik polarizasyon incelemelerinde kullanılan deney düzeneği	47
Şekil 2.20. Galvanostatik yöntemle polarizasyon ölçümleri (a) Üç elektrot yöntemi, (b) İki elektrot yöntemi.....	48
Şekil 3.1. Tuğla atıklarının kırıldığı ve öğütüldüğü cihazlar	64
Şekil 3.2. Öğütülen tuğla tozlarının alınışı ve eleme işlemi	64
Şekil 3.3. Kullanılan donatı çeliğinin boyutları	68
Şekil 3.4. (a) Numunelerin karıştırma cihazında su ile çimento hamuru haline getirilmesi (b) Ucuna sonda takılı vicat aletiyle kıvam tespitinin yapılışı	72
Şekil 3.5. (a) Ucuna iğne takılı vicat aletiyle priz başlangıcı tespitinin yapılışı (b) Ucuna iğne takılı vicat aletiyle priz sonu tespitinin yapılışı	74
Şekil 3.6. Üstüne ilave ağırlıkları konulmuş Le Chatelier kalıpları.....	75
Şekil 3.7. Yayılma tablasının şematik olarak gösterimi.....	76
Şekil 3.8. Rilem kumu katılarak oluşturulan taze harcın hazırlanması.....	77
Şekil 3.9. Taze harç kıvam deneylerinin yapıldığı yayılma tablası	77
Şekil 3.10. Yayılma tablasında kıvam tayini deneyinin yapılışı.....	78
Şekil 3.11. Taze harç düşürüldükten sonra yayılmanın ölçülme işlemi.....	79
Şekil 3.12. (a) Üzerine harç kalıpları konulmuş sarsma tablası, (b) Sarsma tablasında taze harcın sıkıştırılması.....	81
Şekil 3. 13. Kalıplardaki taze harçlar ve çıkarılan harç prizmalarının görünüşleri....	82
Şekil 3.14. Prizmatik numunelerin kür havuzunda bakımı	82

Şekil 3.15. Cihazın eğilme test aparatı bölümündeki numunenin şematik gösterimi	83
Şekil 3.16. Cihazın eğilme test aparatı bölümünde eğilme deneyi yapılmış numune	84
Şekil 3.17. Cihazın basınç test aparatı bölümünde basınç mukavemeti deneyi yapılırken.....	85
Şekil 3.18. Deneylerde kullanılan etüv ve etüvden çıkarılan numuneler.....	86
Şekil 3.19. Arşimed terazisinde ve normal terazide tartılan numunelerin görünümü.....	87
Şekil 3. 20. Kılcal su emme deney düzeneğinin şematik olarak görünümü	91
Şekil 3.21. Numuneler üzerinde kılcal su emme deneyi yapılırken.....	92
Şekil 3.22. VersaSTAT3 potansiyostat/galvanostat (elektrokimyasal) ölçüm cihazı	93
Şekil 3.23. Referans elektrot	94
Şekil 3.24. Karşı elektrot.....	95
Şekil 3.25. Korozyon hücresi ve elektrotları tutan aparat (stand).....	95
Şekil 3.26. Ø10x10 mm’lik alan hariç, geriye kalan kısmı antipas boya ile boyanan çelik çalışma elektrotları	96
Şekil 3.27. Hazırlanan numuneler %5’lik NaCl çözeltili kür ortamında bekletilmesi	97
Şekil 3.28. Oluşturulan silindirik korozyon numunelerinin şematik olarak gösterimi	98
Şekil 3. 29. Askı sistemine sabitlenmiş çalışma elektrotları ve plastik kalıplar	98
Şekil 3.30. Sarsma tablasında kalıplara harç dolduruluşu ve sıkıştırılması	99
Şekil 3. 31. Harçlara doldurulan kalıpların görünüşü	99
Şekil 3.32. Örneklerin nemi kaybetmelerini önlemek üzere plastik örtüye sarılmış halde bekletilmesi (24 saat)	100
Şekil 3.33. Silindirik kalıplarından çıkarılan numunelerin görünüşleri	100
Şekil 3.34. NaCl çözeltili kür havuzunun kapağı kapatılarak korozyon ortamında bekletilmesi	101
Şekil 3.35. Çözeltili ortamda bekletilen korozyon numunelerinin görünümü	101
Şekil 3.36. Referans numunesinin bilgisayar ölçümleriyle oluşturulan lineer polarizasyon grafiği ve diğer değerler	103
Şekil 3.37. Tuğla tozu ikameli numunelerden birine ait örnek bir lineer polarizasyon grafiği	103
Şekil 4. 1. Prizmatik numunelerin yoğunluk – tuğla tozu oranı ilişkisi	111
Şekil 4.2. Prizmatik numunelerin eğilmede çekme dayanımı – tuğla tozu oranı ilişkisi	112
Şekil 4. 3. Prizmatik numunelerin basınç dayanımı – tuğla tozu oranı ilişkisi.....	113
Şekil 4.4. Prizmatik numunelerin kapiler su emme katsayısı – tuğla tozu oranı ilişkisi	116
Şekil 4.5. Korozyon numunelerinde tuğla tozu atığı ikamesinin polarizasyon direncine etkisinin zamana bağlı olarak değişimi	118
Şekil 4.6. Korozyon numunelerine ait tuğla tozu atığı ikamesinin açık devre potansiyel değerlerine etkisinin zamana bağlı değişimi ve korozyon durumları	119
Şekil 4.7. Korozyon numunelerinde tuğla tozu ikamesinin korozyon akım yoğunluğuna etkisinin zamana bağlı değişimi	121
Şekil 4.8. Korozyon numunelerinde tuğla tozu atığı ikamesinin korozyon hızına etkisinin zamana bağlı değişimi	124

Şekil 4.9. Donatı çubukları çıkartılmış referans ve tuğla tozu ikameli numunelerin karbonatlaşma değerlendirmeleri	125
--	-----

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Tipik bir portland çimentosunun oksit analizi ve ana bileşen miktarları	6
Çizelge 2.2. Bazı doğal puzolanların kimyasal özellikleri.....	9
Çizelge 2.3. Bazı yapay puzolanların kimyasal özellikleri.....	10
Çizelge 2.4. Uygulamada kullanılan yöntemlerin özet gösterimi	35
Çizelge 2.5. Yarı hücre potansiyeli değerlerine göre korozyon olasılıkları.....	39
Çizelge 2.6. Betondaki çeliğin korozyon potansiyeli belirlenmesinde farklı referans elektrot değerleriyle korozyon riski arasındaki ilişki.....	39
Çizelge 2.7. LPR ölçümlerinin yorumlanmasına ait kriterleri	45
Çizelge 2.8. Korozyon hızına göre demirlerin korozyon dayanıklılığı.....	45
Çizelge 3.1. Tuğla tozlarının fiziksel özellikleri	63
Çizelge 3.2. Tuğla tozlarının, CEM I 42.5 R Portland çimentosunun, CEN standart kumunun kimyasal kompozisyonu	63
Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan CEM I 42.5 R Portland çimentosunun fiziksel özellikleri.....	65
Çizelge 3.4. CEN standart kumun gradasyonu (tane büyüklüğü dağılımı).....	66
Çizelge 3.5. Tuğla tozu ve CEN kumu (Rilem) kumu numunelerinin özgül ağırlık ve su emme değerleri	66
Çizelge 3.6. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi	67
Çizelge 3.7. Kullanılan çeliğinin kimyasal kompozisyonu.....	68
Çizelge 3.8. Deneylere göre numune üretim sayılarını gösteren araştırma planı	70
Çizelge 3.9. Çimento serilerinin yüzde ve ağırlık olarak açılımları	72
Çizelge 3.10. Referans ve ikame katkılı taze harçların, karışımına giren malzemeler	80
Çizelge 3.11. Fenolftaleinin asit-baz konsantrasyonuna göre renkdeğişimi çizelgesi.....	104
Çizelge 4.1. Çimento hamurlarının standart kıvam suyu ihtiyaçları	105
Çizelge 4.2. Çimentoların priz başlangıcı, sonu ve hacim genişmesi bulguları.....	106
Çizelge 4.3. Taze çimento harçlarının su ihtiyaçları.....	108
Çizelge 4.4. Prizmatik numunelerin fiziksel özellikleri.....	109
Çizelge A.1. Silindirik numunelerin elektrokimyasal ölçümlerine ait ortalama değerleri	144

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
AC	Alternatif akım
ACI	American Concrete Institute
ADP	Açık devre potansiyeli
ASTM	American Society for Testing Materials
BS	British standards
CSE	Bakır/bakır sülfat elektrot
DC	Doğru akım
dk	Dakika
DPT	Devlet planlama teşkilatı
$E_{\text{corr}} (E_{i=0})$	Korozyon potansiyeli
Eadp	Açık devre potansiyeli (measure open circuit)
EIS	Elektrokimyasal empedans spektroskopisi
I_{corr}	Korozyon akım yoğunluğu
kN	Kilonewton
LP	Lineer polarizasyon
LPR	Lineer polarizasyon rezistans
MPa	Megapaskal
mA	Miliamper
mm	milimetre
mV	Milivolt
N	Newton
PÇ	Portland çimentosu
PKÇ	Portland – kompoze çimentosu
ppm	Milyonda bir (mikro)
R_p	Polarizasyon direnci
SCE	Doygun kalomel elektrot
SD	Silis dumanı
sn	Saniye
t	Ton
TOC	Toplam organik karbon
TP	Tafel polarizasyon
TS	Türk standartları
TS EN	Türk standartları enstitüsü
TTİ	Tuğla tozu ikamesi
V	Volt
kΩ	Kiloohm
°C	Sıcaklık, santigrad derece
°A	Angstrom
μA	Mikroamper
μ(μm)	Mikro

1. GİRİŞ

Sürekli artan konut ihtiyacı beraberinde inşaat sektörünün hızla gelişmesine yol açmış ve dolayısıyla insanoğlunu; güvenli, ekonomik, rahat ve konfor yönlerinden ideal olarak nitelendirebileceğimiz konutlar inşa etmeye sevk etmiştir. Diğer bir deyişle; yapı hangi amaç için planlanmış ise, onun için kullanılabilmeli, kullanım sırasında aşırı derecede bozunmaya uğramadan, emniyetli bir şekilde ayakta durabilmeli ve aynı zamanda hem ekonomik hem de estetik yapılar oluşturma beklentisini doğurmuştur. Bu arayışa, yeryüzündeki doğal yapı malzemelerinin ve hammadde kaynaklarının azalması gün geçtikçe azlması nedeni ile, atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi konusu ortaya çıkmıştır.

Atıkların kullanılması ile çevre sorunları azalarak doğaya geri dönüşüm sağlanmakta, iş gücü ve enerji sağlanarak sağlanarak ekonomik yönden de kazanç elde edilmektedir. Atıkların değerlendirileceği alan, yapı veya diğer sektörler olabilir. Fakat bu sektör yapı alanı olunca, kullanılacak malzemenin; basınç dayanımları, su emme, donatı dayanıklılık, dış etkilere ve korozyon oluşumlarına dayanıklı, işlenebilirlik vb. özellikleri yani o malzemenin herhangi bir yük altında ve uygun olmayan koşullarda gösterdiği davranışlar dikkate alınır. Yapı malzemelerinin üretiminde kullanılan veya kullanılacak olan maddeler atık da olsa istenilen niteliklere sahip olması gerekmektedir. Bazı sanayi atıklarının kendilerine özgü niteliklerini dikkate alarak ve teknik yönden de iyileştirmelerle, daha kaliteli ürün elde etme çabaları her geçen gün artmaktadır.

Yapı malzemelerinin birçok çeşidi bulunmasına rağmen, inşaat sektöründe çok eski tarihlerden beri kullanılan pişmiş toprak malzemeler günümüzde de önemini kaybetmemiştir. Pişmiş toprak malzemeler özellikle tarımsal yapılarda gerek ucuz, gerekse teminlerinin ve yapılarda kullanımlarının kolaylığı sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler içerisinde ise en başta tuğla gelmekte ve diğer yapı elemanları arasında % 80'lere varan, büyük bir oranda kullanım alanı sağlanmaktadır. Tuğla, uygun toprağın, yani hammaddesi olan kum içeren killi toprağın bulunduğu her yerde kolaylıkla üretilmektedir. Üretim için gerekli olan hammaddenin de ülkemizde bol miktarda bulunması; hem temin kolaylığı sağlamış

hem de fiyatlarının düşük seviyelerde seyrettirerek, bu yapı malzemesini cazip hale getirmiştir (Akman, 1990; Kaynak, 1999; Çiftci, 2004; Karaman, 2006; Dengiz, 2009).

Endüstriyel olarak tuğla üretimin artmasıyla birlikte birçok problemleri beraberinde getirmiştir. Bunlardan en önemlisi üretim girdisinden geriye kalan atıklardır. Tuğla üretimi ve taşıma işlemleri sırasında kırılmalar olmakta ve bu kırık tuğla parçaları atık olarak ayrılmaktadır. Tuğla fabrika atıklarının fabrika dışına taşınması hem verimli tarım arazilerinin bozulmasına hem de tarıma dayalı ülke ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca bu tarım arazilerinin tekrar eski halini alabilmesi ve kendini yenileyebilmesi için binlerce seneye ihtiyaç vardır. Bu da, topraklardaki ekolojik dengenin bozunmasına neden olmaktadır. Yapılan inceleme ve araştırmalar atık miktarının toplam üretimin %10'u dolaylarında olduğunu göstermektedir (Kaynak, 1999; Müdüroğlu, 1999; Bayça, 2001; Çiftci, 2004; Aksin, 2007; Köseoğlu vd., 2008; Yıldız, 2008a).

Dünyada olduğu gibi ülkemizde de çimento, inşaat sektörünün en fazla kullandığı bağlayıcı maddelerindendir. Yapı sektörünün gelişmesiyle birlikte çimento tüketimi de artmaktadır. Çimento sanayinde tamamen yerli hammadde kullanılmasına rağmen yüksek enerji maliyetleri, üretimi olumsuz etkilemekte ve CO₂ üreten bir süreç olması nedeniyle de küresel ısınmada önemli bir payı bulunmaktadır. Bundan dolayı çimento endüstrisinin kullandığı, enerji ve çevresel etkileri hem bilimsel hem de dünya gündeminin sürekli tartışılan konularındandır. Bütün bunlara ek olarak çimentoları iyileştirme, daha kaliteli, verimli ve ekonomik hale getirecek hammadde arayışları devam etmektedir (Worell vd., 2000; Yıldırım, 2001; Yılmaz, 2006; Kırğız, 2007).

Katkılı çimentoların kullanımı, gerek sağladıkları ekonomik ve teknik avantajlar, gerekse klinker üretimini azaltarak CO₂ emisyonunu azaltmadaki dolaylı faydaları ile günümüzde tercih edilir duruma gelmiştir. Bu malzemelerin çoğunu puzolanik özelliğe sahip olan mineral katkı maddeleri oluşturur. Puzolanik malzemeler, doğal ve yapay olarak ikiye ayrıldığı gibi, kendi başlarına bağlayıcılık özelliğine sahip olmasalar da çok ince öğütüldüklerinde, normal sıcaklıklarda, sulu ortamlarda sönmüş kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanabilen, alüminli ve silisli yapıya

sahip malzemelerdir. Puzolanlar; diğer avantajları ile birlikte çimentoda ekonomiklik, geçirgenliğinin azaltılması, alkali agrega gelişiminin kontrolü, kimyasal direnç sağlaması, hafiflik, atıkların değerlendirilmesi, betonun kuruma büzülmesini azaltması ve mukavemetlerde artış sağlaması gibi avantajları nedeniyle, çimentoya doğrudan katkı olarak ya da çimentonun bir kısmına ikame etmek üzere betona katılmaktadır (Kılınçkale ve Uyan, 1996; Okucu, A., 1998; Çelik vd., 2004; Çiftci, 2004; Yetgin ve Çavdar, 2005; Yılmaz, 2006; Tosun vd., 2009; Yeğınobalı ve Ertün, 2009).

İnşaat sektörünün temel yapı malzemesi olan beton, 20.yy'dan sonra hızla gelişip artarak günümüze kadar gelmiştir. Beton, suyun ardından dünyada en çok tüketilen malzemedir. Bu derece yoğun tüketilen bir malzemenin de teknolojiye paralel gelişme göstermesi kaçınılmazdır. Betonun çekme ve eğilmeleri karşısında çatlayıp kırılmasını önleyebilmek için çekme gerilmelerinin olduğu bölgelere, çelik çubuklar yerleştirilmektedir. Bu şekilde çelik çubuklar ile betonun bir arada kullanılması sonucu betonarme yapılar oluşturulmuştur. Betonarme yapılarda kullanılan çelik ve beton, aralarında iyi bir aderans olduğu takdirde, bu iki malzeme tek bir malzeme gibi davranış göstermektedir. Yani çekme dayanımı yüksek olan çelik çubuklar, çekme dayanımı düşük olan betonu takviye etmektedir. Ancak donatı olarak adlandırılan betonarme demirleri (çelik çubuklar), bazı durumlarda basma kuvvetlerini karşılamada da kullanılırlar (Erdoğan, 2003; Mamaş, 2003; Boğa, 2005; Değirmenci, 2006; Ülger, 2006; Üncü, 2006; Demir, 2008).

Oluşturulan yapılarda yaygın olarak kullanılan ve çok önemli görevi olan çelik donatı, zamanla, “paslanma” da denilen “korozyon” olayı ile karşı karşıya kalabilmektedir. Beton dayanımını artırmak üzere kullanılan betonarme demirlerindeki korozyon sadece metalin değil beton yapının ömrü açısından da önem taşır. Korozyon, metallerin içinde bulundukları ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlara girerek metalik özelliklerini kaybetmeleri olayıdır. Bu şekilde metalik özelliklerini kaybeden malzemede pas ürünü oluşarak, bozulma olayı meydana gelir. Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp normal koşullar altında bile korozyona uğrayabilirler. Betonarme yapıların servis ömrünü belirleyen donatı paslanmasında betonun zararlı iyonlara (Cl^- , SO_4^{2-} , gibi) karşı geçirimsizliği önemli olmaktadır. Beton içine gömülmüş donatı çubuğunun

korozyon performansı pek çok değişkene bağlıdır. Bu değişkenler malzeme bileşenlerini, çimento türü, şebeke suyu, agrega bileşimi, mikroyapıyı, işleme yöntemini, beton karışım oranlarını, yapısal tasarımı, inşa yöntemini, yüklemeyi, betonda oluşabilecek çatlamları ve çevre koşullarındaki farklılıkları kapsamaktadır (Erdoğan, 2003; Güneyisi vd., 2003; Mamas 2003; Boğa, 2005; Elyiğit, 2011).

Betonarme yapılar yaygınlaştıkça, çok çeşitli ve farklı kullanım alanları doğurmuş bununla beraber, önceleri deniz yapılarında ve kimyasal madde üreten tesislerde görülen korozyon problemi, zamanla köprü kirişlerinde ve klorürlü ortamlarda bulunan diğer yapılarda yaygın olarak ortaya çıkmıştır. Gereken tamir ve bakım masraflarının büyük ekonomik kayıplara yol açmasından sonra, konunun önemi daha iyi anlaşılmış, betonarme donatısının korozyonu konusunda çok kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Betonda çelik donatı korozyonu uluslararası ilgi duyulan bir sorun olma özelliğini sürdürmektedir. Köprülerde, viyadüklerde, yollarda, park alanlarında ve deniz ortamındaki betonarme yapılarda sıkça karşılaştığımız donatı korozyonu sadece maddi değil, ortaya çıkan yapısal risk nedeniyle de aynı zamanda ciddi bir dayanıklılık sorunudur (Baradan vd., 2002; Erdoğan, 2003; Boğa, 2005).

Betonun en önemli özelliği, içinde gömülü olan donatı için koruyucu bir ortam oluşturmastır. Klorür ve/veya karbonatlaşma etkisi ile donatının korozyona uğraması sonucunda beton ve donatı arasında aderans kaybı ile birlikte donatıdaki hacim artışı nedeni ile pas payının çatlaması da söz konusudur. Açıkta bırakılan veya pas payı tabakasının dökülmesi ile tamamen açıkta kalan çelik donatıda atmosferik korozyon görülür. Beton içine gömülü çelik donatıda ise karbonatlaşma cephesinin veya klorür gibi zararlı maddelerin donatıya ulaşması halinde korozyon elektro-kimyasal reaksiyonla gerçekleşir. Beton içinde farklı metallerin donatı olarak kullanılması veya korozyondan korunmak amacıyla epoksi vb. maddelerle kaplanmış ve kaplanmamış çeliğin aynı anda kullanımı temas korozyonuna yol açabilir. Öngerilme çeliklerinin kanallarında, oksijenin az olduğu ortamda, hidrojen iyonlarının hidrojen gazına indirgenmesi nedeniyle de korozyon oluşabilir. Betonarme yapılar için donatının korozyonu en önemli bozulma ve hasar görme mekanizmalarından birisi olmaktadır. İnsanoğluna tehdit oluşturmaya yanında hem madde, hem de enerji kaybına neden olan korozyonu tümüyle engellemek

olanaksızdır, ancak yavaşlatılabilir (Baradan vd., 2002; Dönmez vd., 2004; Boğa, 2005; Üncü, 2006; Yamaç, 2010).

1.1. Amaç ve Kapsam

Yapılan kaynak taramaları sonunda, çalışmada kullanılan tuğla endüstrisi atıklarının gerekli işlemlerden geçirildikten sonra, çimento içerisinde, puzolanik bir katkı maddesi olarak, kullanılabileceğine ilişkin çalışmalara rastlanmıştır. Buradan hareketle, çimento içerisine ikame edilerek kullanılan tuğla tozlarının, betonarme yapılarda beton içerisinde bulunan çelik donatıların korozyonunu, yavaşlatıp yavaşlatmadığına dair kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu sayede, gelişmiş ülkelerde atıkların yeniden üretime kazandırılmasına ait çalışmalar önem kazandığı gibi, ülkemizde de bu tür çalışmalarla, atıkların değerlendirilmesi konusuna gereken önem verilmiş olunacaktır.

Bu amaçla planlanan deneysel çalışmada, Manisa ilinde yaygın olarak yeralan ve faaliyet gösteren Tuğla ve Toprak Sanayi fabrikası atıkları temin edilerek istenilen incelikte toz haline gelinceye kadar değirmenlerde öğütülmüştür. Tuğla tozlarının %0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 oranlarında Portland çimentosuna ikame edilmesi ile harçlar üretilmiştir. Başlangıçta bu harçlar, prizmatik numuneler üzerinde, fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından, hem birbirleri ile hem de tuğla tozu içermeyen referans numunesi ile karşılaştırılarak, performanslarına bakılmıştır. Devamında, benzer sonuç veren ikame oranlarından ara değerler çıkarılarak %0, 5, 15, 30 ve 40 oranlarında tuğla tozu atığı ikame edilen harçlarla oluşturulan donatılı silindirik numunelerin 14 gün suda kür edilmesinden sonra klorür etkisinde korozyonu incelenmiştir. Silindirik korozyon numunelerinin % 5'lik NaCl çözeltisi içerisinde, üst kısmından 1 cm su üzerinde kalacak şekilde batırılmış, doğal yöntemlerle hızlandırılan klorür iyonları nedeniyle, çelik donatılar üzerindeki korozyon oluşumu ölçülmüştür. Bu ölçümlerde, klorür etkisinde korozyon oluşumlarının araştırılmasında, potansiyostat cihazından yararlanılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Portland Çimentosu (PÇ)

Çimentolar, agregaları (kum, çakıl, kırma taş) bir arada tutmak için kullanılan, esas itibariyle silisli ve kalkerli bağlayıcılardır. PÇ, çimentolar içinde en yaygın olarak bilinen çimento türüdür. Günümüzde üretimi çok az veya özel istek üzerine yapılmaktadır. Bunun nedeni, diğer çimentolara göre pahalı olmasıdır. Beton yapımında kullanılan çimentolar ise, su içinde priz alma ve sertleşme özellikleri nedeniyle hidrolik çimentolar olarak adlandırılır. PÇ, hidrolik çimentolar gurubunun en önemli üyesidir. Diğer çimento türlerinin birçoğunun bileşimlerinde yer almaktadır. Tipik bir PÇ'nin kimyasal analizi ve Bogue denklemleri ile hesaplanan ana bileşen miktarları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Çimentoda, reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamaları, en az kütlece % 50 olmalıdır (Mindess ve Young, 1981; Neville, 1981).

Çizelge 2.1. Tipik bir portland çimentosunun oksit analizi ve ana bileşen miktarları (Neville, 1981; Dayı, 2006)

Oksitler	Çimento kimyasına göre sembolü	Miktarı (%)	Ana bileşen miktarı
CaO	C	63	
SiO ₂	S	20	C ₃ S= 54.1
Al ₂ O ₃	A	6	C ₂ S= 16.6
Fe ₂ O ₃	F	3	C ₃ A= 10.8
MgO	M	1.5	C ₄ AF= 9.1
SO ₃	Ŝ	2	
Na ₂ O+K ₂ O	N+K	1	
Kızdırma kaybı	K.K.	2	
Çözünmeyen kalıntı	Ç.K.	0.5	
Diğer	-	1	

Puzolanlar, genellikle tek başlarına kullanılmazlar ancak bir bağlayıcı ile birlikte kullanıldığında 90 gün sonra bağlayıcının gerçek dayanımından daha yüksek dayanım gösterirler. Puzolan, çimento klinkerine oranla daha ucuz olduğundan çimento klinkerinin bir kısmı yerine bu katkı maddesinin kullanılması maliyeti düşürür (Şimşek, 2012).

2.1.1. Pozolanlı Çimentoların PÇ'den üstünlükleri:

- Kirecin, asitli ve CO₂'li suların etkisiyle erimesini önler ve kimyasal mukavemeti arttırır. Su içinde yapılan yapılarda kullanılır,
- Hidratasyon ısısı ve bu ısının çıkış hızı düşüktür. Kütle beton üretimi ve sıcak havada beton dökümü için uygundur,
- Geçirimsizliği az ve don dayanımı daha fazladır (Şimşek, 2012).

2.1.2. Pozolanlı Çimentoların PÇ'den sakıncaları:

- Mukavemeti yavaş kazandırır,
- Hidratasyon ısılarının düşük olmasından dolayı soğuk iklimler için uygun değildir (Şimşek, 2012).

2.2. Mineralojik İkame ve Katkılar

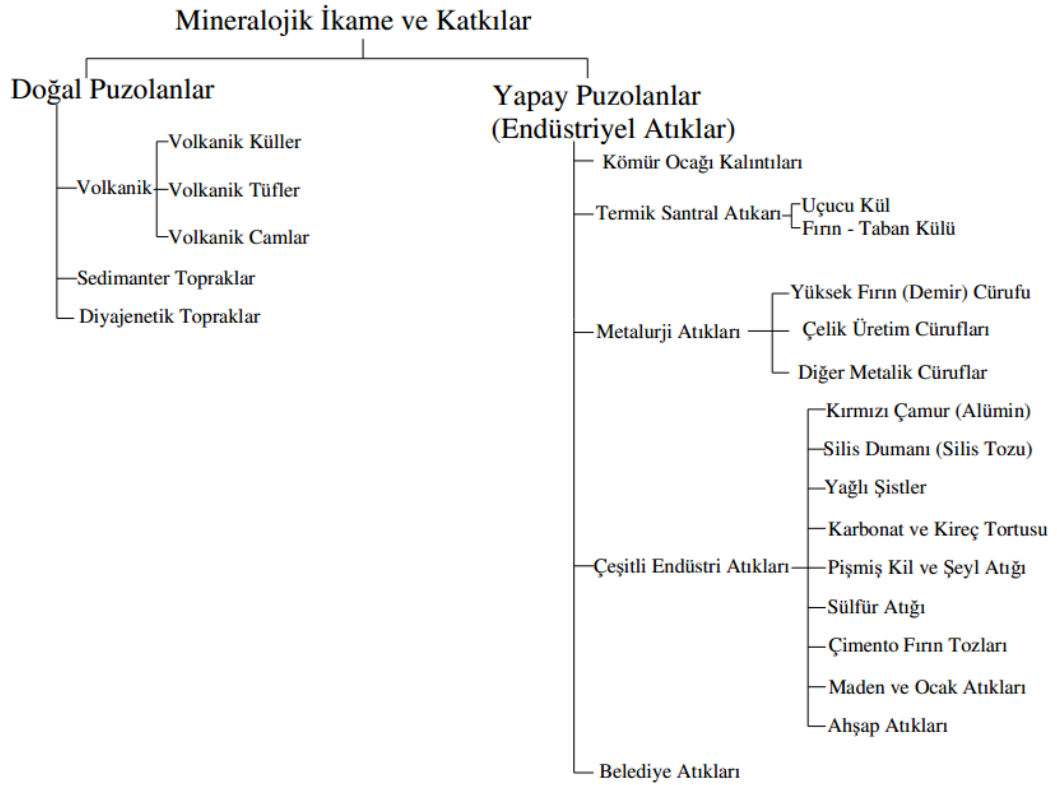
Çimento gibi öğütülmüş toz halde silolarda depolanan cüruf, pişirilmiş kil, şeyl, çeşitli kaya tozları, taşunu, endüstriyel yan ürünler... vb. çeşitli maddelere 'Mineral Katkı'adı verilir. Mineral katkıları tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar. Ancak çimento ile birlikte kullanıldıklarında çimentoyla benzer görev yaparlar ve dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkılardan yüksek dayanımlı beton üretiminde de yararlanılır (Hamalı, 2007).

Mineralojik katkı malzemeleri, betonun işlenebilirliğini, mukavemetini, durabilitesini ve ekonomisini iyileştirmek ya da hidratasyon derecesini ve ısını kontrol etmek amacıyla, beton karışımına katılan katı ve ince bir şekilde öğütülmüş maddelerdir. Diğer bir deyişle; harç ve betonun karıştırılması sırasında, harç ve betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini düzeltmek amacıyla eklenen, karışım malzemelerinin kabul ettiği malzemelerdir. Bu maddeler, doğal pozolanlar, yapay pozolanlar, uçucu kül, silis dumanı ya da yüksek fırın cürufu gibi malzemelerdir (Akçaözoğlu, 2007; Kırgız, 2007).

2.2.1. Çok ince öğütülmüş mineral katkıları

Mineral katkıları çok ince öğütülmüş olup, karışımdan önce ya da karışım esnasında beton veya harç karışımına ilave edilen ayrı bir bileşendir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda bazı katkıların reaktif olmadıkları halde çimento hidratasyonu'nu olumlu yönde etkiledikleri anlaşılmıştır. Çok fazla sayıda malzeme mineral katkı olarak kullanılmaktadır. Örneğin, mermer tozu taneleri hidratasyon ürünleri içinde çekirdek oluşturarak su ile reaksiyonu hızlandırır (Yeğinobalı, 2001; Akçaözoğlu, 2007; Kırgız, 2007).

Mineralojik ikame ve katkıların kökenlerine göre sınıflandırılması Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Mineralojik ikame ve katkıların şematik olarak gruplandırılması (Kırgız, 2007).

Mineral katkıların kalsiyum hidroksit ile reaksiyon kabiliyeti, bu katkıların kompozisyonu, yapısı ve reaksiyon şartlarına bağlıdır (Hamalı, 2007).

2.2.2. Puzolanik malzemeler

Puzolanlar, “kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemeler” olarak tanımlanmaktadır. Puzolanların yapısında, büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir (ASTM, 1994; Dayı, 2006).

Puzolanlar genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Birinci gruptaki puzolanlar doğal olarak ortaya çıkan malzemeler olup elde edilişleri genellikle kırma, öğütme ve eleme ile sınırlıdır. Bir diğer grup puzolan da yapay puzolanlar olup, bunlar bazı endüstri kollarında yan ürün olarak ortaya çıkan malzemelerdir (Bilim, 2006).

2.2.2.1. Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar, doğada volkanik kütlelerin bulunduğu yerlerde görülür. Her puzolanın kimyasal yapısı, aktivitesi, bulunduğu bölgeye göre değişir. Yoğunlukları genelde 2000 ile 2200 kg/m³ arasında değişir. Doğal puzolanlara örnek olarak volkanik camlar, volkanik tüfler, volkanik küller, traslar, diatomik topraklar, pomza taşı verilebilir. Doğal puzolanlar çoğunlukla genç volkanizma ürünüdür (Erdoğan, 2003; Çiftci, 2004; Dayı, 2006; Atakay, 2006; Şimşek, 2009). Aşağıdaki Çizelge 2.2’te bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin % miktarları verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bazı doğal puzolanların kimyasal özellikleri (Erdoğan, 2003; Atakay, 2006; Kırgız, 2007; Yıldırım, 2007)

Doğal Puzolanlar	Kimyasal Özellikleri (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Alkali
Volkanik cam	65.1	14.5	5.5	3.0	1.1	6.5
Volkanik tüf	52.1	18.3	5.8	4.9	1.2	6.6
Diatomlu toprak	86.0	2.3	1.8	-	0.6	0.4

2.2.2.2. Yapay (suni) puzolanlar (endüstriyel atıklar)

Yapay puzolanlar, sanayi üretim atığıdır. Yapılarında doğal puzolanlardaki gibi oksit bileşenler (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO) içermelerinden dolayı puzolan ve üretimdeki reaksiyonlar sonunda oluştukları için de yapay sıfatı verilerek yapay puzolan denilmiştir. Yapay puzolanlar endüstriyel işlemler sonucunda yan ürün olarak çıkmaktadır. Kömür ocağı kalıntıları, termik santral atıkları, metalurji atıkları, çeşitli endüstri atıkları ve belediye atıkları bu gruptaki yapay puzolanlardır. Atıktaki silisin aktifliği, puzolanın aktifliğini belirler. Yapay puzolanlara örnek olarak; yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü verilebilir (Okucu, 1998; Dayı, 2006; Kırgız, 2007). Aşağıdaki Çizelge 2.3’de bazı yapay puzolanlardaki oksitlerin % miktarları verilmiştir.

Çizelge 2.3. Bazı yapay puzolanların kimyasal özellikleri (Atakay, 2006)

Yapay Puzolanlar	Kimyasal Özellikleri (%)					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Alkali
Uçucu kül	51.5	23.9	6.1	10.5	2.4	3.1
Yüksek fırın cürufu	40.2	11.0	0.8	34.5	9.4	3.6
Silis dumanı	93.7	0.3	0.6	0.3	0.3	0.6

2.2.2.3. Puzolanik reaksiyon

İnce daneli durumdaki puzolanlar, söndürülmüş kireç ve suyla birleştirildiğinde, bu malzemeler arasında birtakım kimyasal reaksiyonlar yer almaktadır. Kalsiyum hidroksit, silis ve su arasındaki reaksiyonlar, aynen portland çimentosunun hidratasyonunda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açmaktadır. Nemli ortamda, ince öğütülmüş puzolanın silikası ile kalsiyum hidroksit arasında oluşan kimyasal reaksiyon basitçe aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Bu reaksiyon çok yavaş bir reaksiyondur. Burada, $\text{C} = \text{CaO}$, $\text{H} = \text{H}_2\text{O}$, $\text{S} = \text{SiO}_2$ ’tir (Erdoğan, 2003; Akçaözoğlu, 2007).

2.2.2.4. Puzolanik aktiflik ve aktifliğin ölçüm yöntemleri

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde reaksiyona girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, “puzolanik aktivite” olarak tanımlanabilmektedir. Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis+alümin+demir oksit” içermesi gerekmektedir (Erdoğan, 2003; Şen, 2005; Erdoğan, 2006).

Herhangi bir puzolanın yetkinliğinin değerlendirilmesi için puzolanın Ca(OH)_2 bağlayabilmesi ve reaksiyon hızı ile tanımlanan aktivitesinin belirlenmesi gerekir. Fakat her çeşit puzolana uygulanabilecek hız ve hassasiyet açısından kabul edilebilir bir test yöntemi henüz yoktur. Ayrıca farklı deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirlerini doğrular şekilde çıkmayabilir. Puzolanların aktivitesinin belirlenebilmesi için önerilen yöntemler kimyasal, fiziksel ve mekanik olarak üç ana grupta toplanmaktadır (Şen, 2005).

Mekanik yöntemlerden olmak üzere geliştirilmiş test yöntemlerinde puzolan, kireç ya da portland çimentosu ile belirli miktarlarda karıştırılır. Elde edilen bağlayıcı ile 4x4x16 cm’lik harç numuneleri hazırlanır ve bu numunelerin belirli sürelerdeki basınç dayanımı tespit edilir. Fakat bu türden mekanik test yöntemleri, kireç puzolan ya da portland çimentosu-puzolan karışımlarında dayanım kazanımının zamanla çok yavaş olmasından dolayı, bazı olumsuzluklar içermektedirler (Erdoğan vd., 2003; Şen, 2005).

Puzolanik aktivite, puzolanik malzemeyle yapılan deneyler sonucunda tayin edilmelidir. ASTM standardına göre önce “500 gr portland çimentosu + 1375 gr kum + 242 ml su” kullanarak kontrol harcı hazırlanmaktadır. Daha sonra da, “400 gr portland çimentosu + 100 gr puzolan + 1375 gr kum + kontrol karışımının gösterdiği akmaı sağlayabilecek kadar su” kullanılarak puzolanlı harç elde edilmektedir. Bu iki harçtan 5 cm’lik küp numuneler hazırlanarak 7 ve 28 gün sonunda basınç deneyine tabi tutulmaktadır (ASTM, 1994; Şen, 2005; Erdoğan, 2006).

TS EN 450 nolu standarda göre, birisi “kütlece %75 referans çimento + %25 puzolan” ile hazırlanmış standart harç numunesi ve diğeri ise sadece referans çimentodan hazırlanmış standart harç numunesi üzerinde basınç dayanımı deneyleri yapılmaktadır (TS EN 450, 1998; Erdoğan, 2006).

Bir puzolanın reaksiyon sonunda tespit ettiği kireç miktarı ne kadar fazla ise reaktivitesi o kadar büyüktür veya puzolanik özelliği o kadar yüksektir. Costo ve Massazza’nın araştırmalarına göre bu özellik en fazla puzolanın özgül alanına bağlıdır. Şu halde bir maddenin puzolanik özelliğini artırmak için onu çok ince bir şekilde öğütmek gerekir. Puzolanik özelliği etkileyen bir diğer faktörde puzolanın içerdiği reaktif maddeler amorf veya camsı ve zeolitik fazda bulunan Al_2O_3 ve SiO_2 ’dir. Diğer taraftan puzolanik özellik Al_2O_3 ile SiO_2 ’nin kireçle yaptığı reaksiyon sonunda meydana geldiğinden bir puzolanla (CaO) nun az miktarda bulunması gerekir. Bu açıklamalara göre puzolan denilen maddelerde $SiO_2Al_2O_3$ fazla miktarda bulunmalı CaO az miktarda yer almalıdır. ASTM C 618’e göre bir puzolanla; $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > 0.70$ koşulu gerçekleşmelidir. Diğer taraftan CaO miktarı % 4’ü geçmemelidir (Postacıoğlu, 1986; Erdoğan, 2006).

2.2.2.5. Puzolanların kullanım yöntemleri

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanım yöntemleri puzolanın türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkıli portland çimentosu (CEM II/P, CEM II/Q, CEM II/M, CEM IV, CEM V) üretiminde kullanılmaktadır. Bu tür çimentoların kullanılmasıyla betonda önceden belirlenmiş oranlarda puzolan kullanılmış olmaktadır. Yapay puzolanlardan yüksek fırın cürufu ve uçucu küller beton üretiminde iki yoldan kullanılmaktadırlar. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül veya cüruf içeren, katkıli portland çimentosu kullanımıyla betona katılmış olur ve bu yöntem “birlikte öğütme tekniği” adıyla ifade edilmektedir. İkinci yöntemde ise uçucu kül veya ince öğütülmüş cüruf, betona karıştırma sırasında, çimentoya ilave ya da ikame olarak katılmasıdır ve “ayrı öğütme tekniği” olarak isimlendirilmektedir (Çelik, 2005; Çavuş, 2008).

2.2.3. Çimentoda pozolanik özellik gösteren mineralojik katkıların etkileri

TS EN 197-1’de değişik mineral katkıları ve bunların çeşitli kombinasyonlarını içeren çok sayıda çimento türüne yer verilmiştir. Gerçekten uygun özelliklerdeki mineral katkıların çimento üretiminde kullanımı önemli ekonomik, çevresel ve teknik avantajlar sağlamaktadır. Pozolanlar, çimento harcı ve beton içinde çimento ağırlığının değişik oranlarında kullanılırlar. Bu oran farklı araştırmalar tarafından %15’den %40’a kadar önerilmektedir (Okucu, 1998; Çiftci, 2004; Şen, 2005; Dayı, 2006; Şimşek, 2009).

Kaliteli pozolanlar, optimum ölçüde kullanıldıklarında çimento ve betonda;

- İşlenebilirliği iyileştirirler
- Sülfat etkisine karşı direnci arttırlar (1 kg CaO, 1.07 kg SiO₂ bağlar (CaSiO₂))
- Hidratasyon ısını düşürürler.
- Alkali-agrega reaksiyonunun zararlı etkisini azaltırlar.
- Isıl büzülme azaltırlar
- Maliyeti düşürürler.

Pozolanlar fazla kullanıldıkları zaman zararlı da olabilirler;

- Su ihtiyacını arttırlar.
- Donma ve çözölmeye karşı direnci düşürürler.
- Sertleşme ve dayanım kazanma hızını azaltırlar.
- Kuruma büzölmesini arttırlar (Çiftci, 2004; Dayı, 2006; Şimşek, 2009).

Şekil 2.2-a.’da katkısız bir portland çimentosu bileşimi görölmektedir. Hatırlanacak olursa, bileşimin %90 kadarı dört karma oksitten oluşur. Bunlar C₃S ve C₂S olarak belirtilen kalsiyum silikatlar ile C₃A ve C₄AF olarak belirtilen kalsiyum alüminatlardır. Şekil 2.2-b. ve -c.’de çimento belirli bir miktarda katkı ile oluşturulmuştur. Pozolanların bileşimindeki amorf silis, kireç ile birleşerek kristal hale geçer ve pozolanların kimyasal özellikleri ile aynı olan diğer maddelerden ayırır (Şen, 2005).

C_3S	C_3S	KATKI
C_2S	C_2S	
C_3A	C_3A	
C_4AF	C_4AF	
C, M, S, N, K,...	C, M, S, N, K,...	
a) Çimento	b) Katkılı Çimento	
C_3S	C_3S	KATKI
C_2S	C_2S	
C_3A	C_3A	
C_4AF	C_4AF	
C, M, S, N, K,...	C, M, S, N, K,...	
c) Çimento+Katkı		

Şekil 2.2. Çimento ve mineral katkı kullanımı ve bileşenlerin durumu (Çelik, 2005; Şen, 2005; Yeğinoğlu ve Ertün, 2009)

Massazza'ya göre, puzolan ve kireç arasındaki reaksiyonda hidrate kalsiyum silikat ve alüminatlar teşekkül eder. Bu teoriye göre mukavemetin artışı, dayanıklı olmayan kalsiyum bileşikleri yerine teşekkül eden inert jellerin teşekkülündendir. Şekil 2.3-a.'da katkısız çimento hamurunun bileşimi gösterilmiştir. Bağlayıcı özellikteki kalsiyum silikat hidrat (CSH) jelleri ile kalsiyum alüminat ($3CaO \cdot Al_2O_3$, C_3A ve $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, C_4AF) jelleri hamurun yarısından fazlasını oluşturmakta, kalsiyum hidroksit (CH) açığa çıkmakta ve gözenekler oluşmaktadır. Katkılı çimentonun hidratasyonu ve özellikleri ise farklıdır. Özet olarak Şekil 2.3-b.'de gösterildiği gibi katkılı çimento hamurunda bağlayıcı jeller artmakta, CH ve gözenekler azalmaktadır (Okucu, 1998; Erdoğan, 2003; Çiftçi, 2004; Çelik, 2005; Yeğinoğlu ve Ertün, 2009).

Jeller	Jeller
C-S-H	C-S-H
CH	Puzolanik C-S-H
Gözenekler	CH
Hidrate olmamış taneler	Gözenekler
a) Katkısız	b) Puzolan Katkılı

Şekil 2.3. Çimento hamur yapıları (Çelik, 2005; Şen, 2005; Yeğinoğlu ve Ertün, 2009)

Yavaş ve devamlı bir şekilde oluşan birleşme ile puzolanlı çimentolar portland çimentosuna göre, ne şekilde etki oluşturdıklarına dair açıklamalar aşağıda verilmektedir (Okucu, 1998; Erdoğan, 2003; Çiftci, 2004).

2.3. Tuğla ve Minerolojik Olarak Tuğla Tozları

2.3.1. Tuğla

Tuğla dünya tarihinde üretimi yapılan ilk yapım malzemesidir. Tuğla, tarih boyunca önemli yapılarda yerini almıştır. Pişmiş tuğlanın endüstriyel anlamda ilk üretimi MÖ. 4000 yılında Babil Kulesinin yapımına denk gelmektedir. Kilden üretilen tuğla, dayanıklılık ve mukavemetlilikleri, düşük ses ve ısı geçirgenlikleri ve yanmaya karşı dirençleri ile günümüzde de en çok kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Böylece tuğla üretimi endüstriyel boyut kazanmıştır (Görçiz, 2000; DPT, 2001; Aksin, 2007; Bıyık, 2007; Şahin, 2008).

Tuğla uygun toprakların bol olması, bu malzemenin ucuz ve kolay üretilmesine olanak vermesi nedeniyle kentlerde olduğu gibi kırsal alanlarda tarımsal yapılarda yaygın olarak kullanılmakta ve üretimi yapılmaktadır. Ülkemizde hayvan barınakları, tarımsal ürün depoları gibi yapılar genellikle tek katlı ve prefabrik yapı malzemeleri ile yapılmaktadır. Bunlar içerisinde önemli yeri bulunan tuğlalar, yaygın olarak kullanılan yapı malzemeleridir (Akman, 1990; Yüksel ve Şişman, 2003; Karaman, 2006; Ulusoy, 2008).

2.3.2. Tuğlanın endüstri atığı olarak yeri

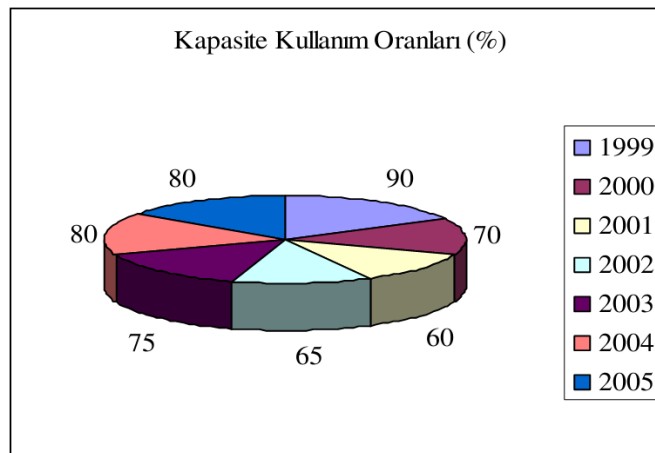
Günümüzde dünya genelinde çeşitli endüstriyel işlemler sonucu atık malzemeler ortaya çıkmaktadır. Atık malzemelerin miktarında olan artmalar sonucunda birçok ülkede bu atıkların nasıl kullanılabileceği üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Atık malzemelerini, ana malzemelerin miktarında azaltma yapılarak ana malzemelerin yerine kullanımıyla çevreye verilen zarar en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Böylece doğal kaynaklar daha iyi kullanılmış olacak ve atık malzemelerin kullanımıyla çevre kirliliği azalacaktır (Çakar, 2009).

İnşaat sektörünün hızla gelişmesi, bu sektörün önemli girdilerinden olan tuğla talebini artırmakla birlikte hammadde ihtiyacını doğurmaktadır. Tuğla fabrika atıklarının fabrika dışına taşınması hem çevre hem de ekonomik anlamda düşündürücüdür. Yapılan inceleme ve araştırmalar atık miktarının toplam üretimin (hava şartları ve malzemeye bağlı) %10'u dolaylarında olduğunu göstermektedir (Yıldız, 2008a).

Ülkemizde özellikle Turgutlu, Afyon, Çorum v.b.gibi bölgelerde faaliyet gösteren çok sayıda tuğla fabrikası bulunmaktadır. Tuğla fabrikalarının üretimi sırasında ortaya çıkan pişmemiş haldeki hatalı ürünler üretim hattına geri gönderilirken pişme sonucu çıkan kırık tuğlalar fabrika yanlarında stoklanmaktadır. Artan tuğla fabrikası atıklarının stoklanması sorun olmakta ayrıca bu atıklar çevre kirliliği açısından da büyük önem taşımaktadır (Emrullahoğlu vd., 2004).

Tuğla atığı: Tuğla bünyesinde bulunan renk bozukluğu, çatlak ve boyut bozukluğu olan tuğlalara denir. Şartnamelere ve standartlara göre tuğla partilerinin bu kusurlu tuğlalardan ayıklanması gerekir. Genellikle tuğlalar fırından çıkartılıp soğutulduktan sonra imalat hatası olanlardan ve kırıklardan ayıklanırlar (Çiftci, 2004).

Türkiye'nin yıllık tuğla üretim kapasitesi 6 milyar adettir. Ağırlık olarak kapasite 19.000.000 (ton)'dur. Türkiye'de 1999 – 2005 yılları arasında tuğla üretiminde kapasite kullanımı Şekil 2.4'te görülmektedir (Özdamar ve Yavuz, 2005; Kırgız, 2007).



Şekil 2.4. Türkiye'de 1999 – 2005 yılları arasında tuğla üretimi kapasite kullanımı (Özdamar ve Yavuz, 2005; Kırgız, 2007)

Ocaktan pismiş tuğlaya kadar olan süreçte tuğla tozu olarak ortaya çıkan kaybın %20–25 olduğu tahmin edilmektedir. Günümüzde tuğla üretimi sırasında ortaya çıkan %20–25 oranındaki kayıp tuğla üretim maliyetlerinde artışa neden olmaktadır. 2005 yılı Türkiye tuğla üretim kapasitesi %80 olduğundan yaklaşık 15.200.000 (t) üretim yapılmıştır (Şekil 2.8) (DPT, 1993; Kırgız, 2007).

Tuğla üretiminde toplam atık miktarı %20-25 arasında olduğundan; Türkiye genelindeki yaklaşık tuğla atık miktarı, $15.200.000 \text{ (t/yıl)} \times 0,25 = 3.800.000 \text{ (t/yıl)}$ 'dır (DPT, 1993; Kırgız, 2007).

Tuğla ve mermer atıklarına ilişkin yukarıda yapılan hesaplama sonucu Türkiye’de yıllık 3.800.000 (ton) tuğla ve 2.592.000 (ton) mermer atığı bulunduğu tahmin edilmektedir (DPT, 1993; Kırgız, 2007).

İnşaat endüstrisinin alt sektörlerindeki üretim sırasında ortaya çıkan toz haldeki bu atık maddeler ekonomik olarak sektörleri olumsuz etkilediği gibi, tarım topraklarını da bozmaktadır. Endüstriyel katı atıkların bir kısmı evsel katı atıklardan farklılık göstermektedir. Katı atık arıtma sistemleri de, tuğla ve mermer üretiminde oluşan toz haldeki atıklar üzerinde etkili olmadığından tarım toprağını verimsiz hale getirmektedir (DPT, 1993; Kırgız, 2007).

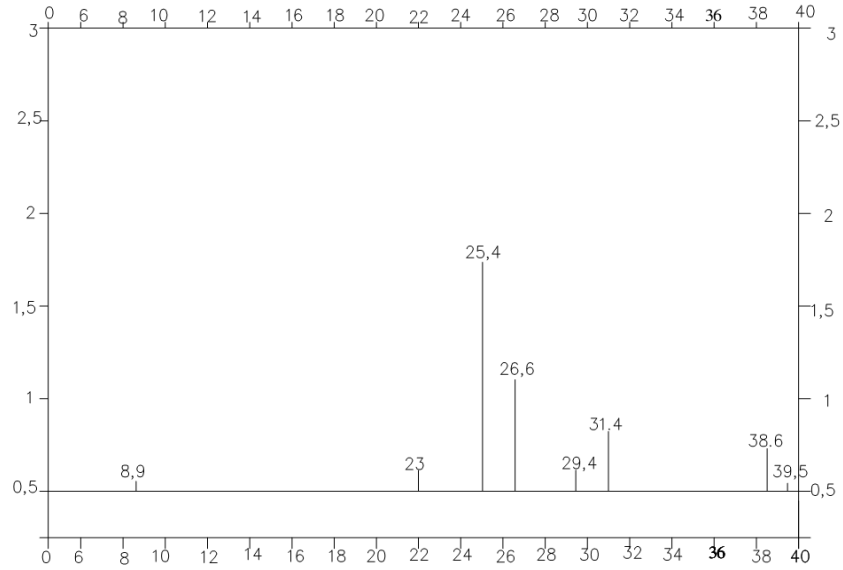
Bu atıkların ucuz hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesi hem yukarıda açıklanan sorunların giderilmesi ve hem de ekonomiye kazandırılması açısından önemlidir.

Atık yığını yok edilemediği takdirde çevreye zararlı hale gelmektedir. Gelişmiş ülkelerde, atıkların yeniden üretime kazandırılması çalışmaları önem kazanmıştır.

Tuğla ve kiremit atıklarının bir kısmı toz haline getirilip spor alanlarında veya başka amaçlarla kullanılmaktadır. Yapılan bir çalışmada belirtildiğine göre 1995’deki 7 milyar tuğla ve kiremitten, çeşitli nedenlerle %7 oranında atık madde çıktığı tahmin edilmektedir. Bu büyüklükteki malzemenin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Bu maddelerin sıva olarak ya da çağdaş usullerle kerpiç yapılarak değerlendirilebilir (Baradan, 1996).

2.3.3. Minerolojik olarak tuğla tozlarının incelenmesi

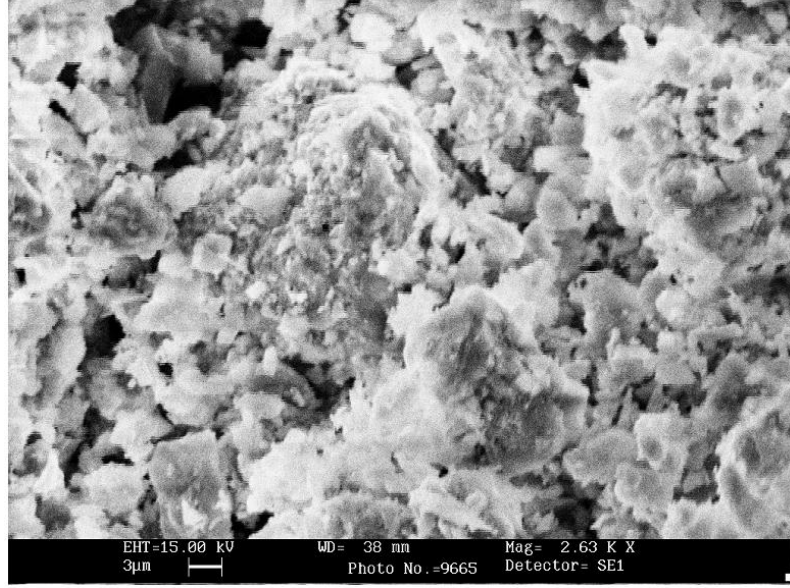
Tuğlanın, 750 °C’de pişirilerek üretimi sırasında açığa çıkan ve özellikleri TS EN 197 – 1 standardında belirtilen esaslara uygun tuğla tozunun X-ışınları difraksiyonu Şekil 2.5’te görülmektedir (TS EN, 2005; Kırgız, 2007).



Şekil 2.5. Tuğla tozunun X-ışınları difraksiyonu (Arslan ve Kırgız, 2004; Kırgız, 2007)

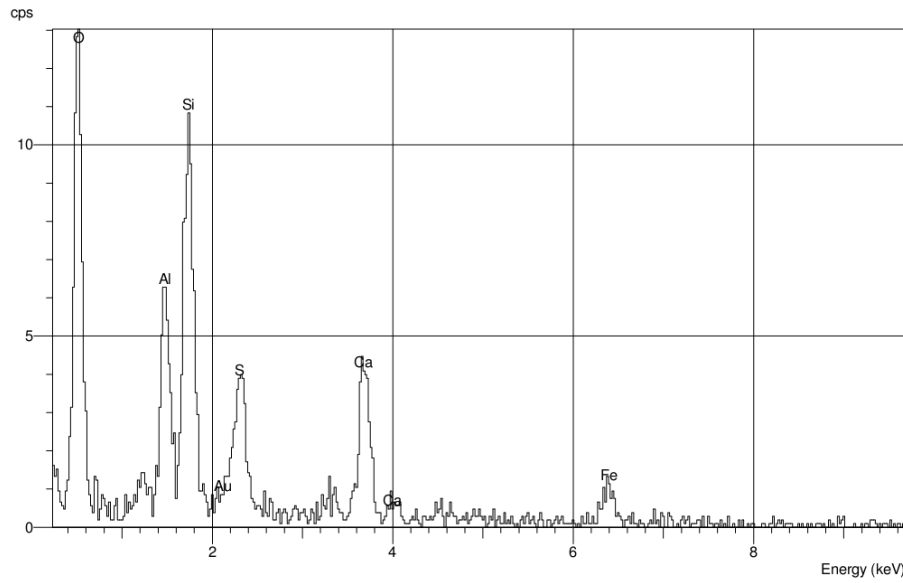
Tuğla tozu üzerinde yapılan X-ışınları difraksiyonuna göre, mineral yapısı, alüminyum oksit (Al_2O_3), magnezyum silikat (Mg_2SiO_4), magnezyum orto silikat ($2[\text{Mg}_{0,96}\text{Fe}_{0,04}]\text{O}.\text{SiO}_2$), Silis oksit (SiO_2) ve magnezyum orto silikat (Mg_2SiC_4)’dan oluştuğu görülmüştür (Şekil 2.5) (Arslan ve Kırgız, 2004; Kırgız, 2007).

Tuğla tozunun mikro yapı (SEM) görüntüsü Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6. Tuğla tozunun mikro yapısı (Arslan ve Kırğız, 2004; Kırğız, 2007)

Tuğla tozunun enerji dağılım sisteminde incelenen element sayıları grafiği Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Tuğla tozunun element sayıları (Arslan ve Kırğız, 2004; Kırğız, 2007)

2.4. Donatılardaki Korozyon

2.4.1. Korozyon

Genel olarak malzemelerin, özel olarak metallerin ve alaşımlarının çevrenin etkileriyle kimyasal ve elektrokimyasal değişme ya da fiziksel çözünme sonucu aşınmalarına korozyon denir. Latince’de kemirmek anlamına gelen “con rodere” sözcüğünden türetilmiş olan korozyon, metallerde su ve oksijenin bulunduğu ortamda görülen kimyasal bir değişim sürecidir. Altın dışındaki tüm metaller, en düşük enerji düzeyi olan oksit haline dönmeye eğilimlidirler ve yapay olarak üretilen metal malzemeler uygun ortamı bulduklarında asıllarına dönmeye çalışırlar (Baradan vd., 2002; Üneri, 2002; Haberal, 2010).

Korozyon bir yüzey olayıdır, yani yüzeyden başlayarak malzemenin içine doğru ilerler. Metallerin sulu ortamdaki korozyonu elektro-kimyasal bir süreçtir ve birbirinden ayrı ancak aynı zamanda oluşan oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarından oluşur (Akman, 1992; Çakır, 1996; Haberal, 2010).

Anot reaksiyonu da denen oksidasyon, sulu ortamdaki metalin elektron kaybederek katyona dönüşmesidir (2.2) elektron kaybeden metal elemana anot denir. Anot reaksiyonunda oluşan metal iyonu, bulunduğu sulu ortam içinde çözülür, dağılır veya çökelen bir korozyon ürünü meydana getirir, böylece anot olan metalde malzeme kaybolur. Korozyonun sürekliliği için katot ve anodun elektriksel akım geçişini sağlayan bir iletkenle bağlanması ve anotla açığa çıkan elektronların katoda iletilmesi gerekir. Elektrik akımının katot içindeki yönü, katotdan anoda doğrudur; yani elektronların akış yönünün tersidir. Korozyon hızı olarak tanımlanan anodun çözünüm hızı, hücreden geçen akım ile doğru orantılıdır (Doruk, 1996; Haberal, 2010).



Redüksiyon yani katot reaksiyonu ise oksidasyonda açığa çıkan elektronların sarf edilerek birikmesini önleyen bir reaksiyondur. Katot reaksiyonları arasında en yaygın olanı, hidrojen gazının açığa çıkması (2.3) ve oksijen gazının redüklenmesidir (2.4).

Katodik olayın oluşabilmesi için elektron yüklenebilen iyon veya moleküllere gerek vardır (Doruk, 1996; Yüzer, 1998; Değirmenci, 2006; Haberal, 2010).



Kısaca; elektro-kimyasal korozyonun sürekliliği için anot reaksiyonunun mutlak surette katot reaksiyonu ile tamamlanması gerekir. Korozyonun sürekliliği için bir diğer koşul ise katot ve anodun elektriksel akım geçişini sağlayan bir iletkenle bağlı olmaları ve anotta açığa çıkan elektronların katoda iletilmesidir (Yüzer, 1998; Değirmenci, 2006).

Korozyona neden olan çevre etkileri atmosfer etkisi, suyun etkisi, toprağın etkisi ve bu ortamlarda bulunan değişik agresif iyonların etkileri olarak sınıflandırılabilir. (Ülger, 2006; Menekşe, 2008).

Betonun yüksek alkali özeliği ve atmosferden beton içerisine oksijen difüzyon hızının da oldukça düşük olması nedeniyle, normal koşullar altında betonarme demirlerinin korozyona uğramadığı kabul edilir. Betonun içerisindeki alkali ortam, betonarme demirlerinin üzerinde bir oksit tabakası oluşup, anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına neden olur. Bu olaya alkali pasivasyon adı verilir. Bu durum sonucunda, normal koşullar altında, normal bir betonda oksit filmi bozulmadan korozyon uzun süre önlenmiş olur (Hoşhan 1994; Yüzer, 1998; Haberal, 2010).

Betonarme yapılarda beton içine gömülü olan çelik, doğru tasarlanmış, geçirimsiz, kaliteli beton tarafından fiziksel ve kimyasal olarak korunur. Fiziksel koruma zararlı maddelerin donatıya ulaşmasının engellenmesi, kimyasal koruma ise yüksek pH'lı bir ortam oluşturulması ile gerçekleşir (Baradan, vd., 2002). Uygun kür koşullarının sağlanması, donatının iyi yerleştirilmiş olması, uygun su-çimento oranının seçilmesi, uygun agrega kullanılması vb. koşullar sağlanarak elde edilir. Olumsuz koşullar oluşmadığı sürece beton dayanımını artırmak üzere kullanılan betonarme demirinin korozyonu çok düşük düzeydedir (Haberal, 2010).

Betonarme elemanlar, gözenekli yapıları ve çatlak oluşumuna olanak vermeleri sebebiyle bünyelerinde su bulundururlar. Bu durum uygun bir elektrolitik ortamın oluşmasına sebep olmaktadır. Elektrik iletkenliği sağlayan betonarme çeliğinin kendisidir. Böyle bir ortamda betonarme çeliğindeki demir elektron vererek ayrılır. Böylece korozyon başlamış olur. Demirin elektron verdiği bölge anottur (Cilason vd., 1998; Üncü, 2006).

Demirden kopan elektronların gideceği yer katottur. Katot oksijen ve su bakımından zengin bölgedir. Çelik donatı yüzeyinde korozyonun başlaması için buraya su ve korozif element, oksijenin erişmesi gerekmektedir. Klorür iyonları pasif metal yüzeyine erişmişlerse, çelik donatı yüzeyindeki pasif tabaka hasar görür ve altında açığa çıkan metal, betonun geçirimsizliğine bağlı olarak yüzeye erişen su ve oksijenin etkisi ile hızla korozyona uğrar. Oksijen ve su buraya pas payına kadar ulaşan çatlaklar ve izole olmayan yani birbirlerine kılcal olarak bağlı olan boşluklar sayesinde dışarıdan gelir. Betonun içindeki su da oksijen içermekle beraber olayın ilerlemesi bakımından yetersizdir. Bu yüzden dışarıdan bir etki gerekir. Kalitesiz bir betonda bu gibi çatlaklar ve boşluklar fazla olacağı için anot ve katot birbirlerine çok yakın olabilir. Kaliteli betonda ise boşluk ve çatlak daha az olacaktır. Kaliteli betonda anot ve katot yakın olabileceği gibi birbirlerinden uzakta da olabilir. Bu korozyonun biraz daha yavaş ilerlemesine sebep olur (Çakır, 1996; Cilason vd., 1998; Üncü, 2006; Haberal, 2010).

Betonarmedeki çelik çubuğun korozyonu için başka bir iletkeni gerek yoktur; aynı çelik çubuk üzerinde elektrokimyasal tam hücre kendiliğinden oluşur. Nem, elektrolitik ortamı, çeliğin kendisi de elektronları ileten elektronik iletkeni oluşturur. Bunlardan oksijeni az olan bölgeler hasar gören anot, çok olan bölgeler ise korunan katottur. Oksijen paradoksuna göre, paslanma, oksijenin oranla az bulunduğu bölgelerde daha belirgindir (Akman, 1992; Haberal, 2010).

Elektro-kimyasal bir süreç olan beton içindeki çeliğin korozyonunda, dış elektriksel kaynak olmaksızın iki yarı hücre reaksiyonu oluşur. Bunlardan biri, pH değerlerine bağlı olarak meydana gelen (2.5)-(2.8) bağıntılarında görüldüğü gibi demirin oksidasyonu sonucu ferro iyonları oluşturan yani elektron üretme kapasitesi olan **anodik reaksiyon**, diğeri de hidroksil iyonu (OH^-) meydana getirerek oksijeni

azaltan, elektronları tüketen (2.9) **katodik reaksiyondur**. Oksijenin betona giriş hızı betonun suya doygunluk derecesinden etkilenir; ıslanma-kuruma etkisindeki elemanlarda korozyon çok daha hızlı gelişirken, tamamen suya doygun elemanlarda ihmal edilebilir seviyesindedir. Oksijen, katodik reaksiyonda harcadığı için su içinde çözünmüş olmalıdır. Dolayısı ile oksijenin suda çözünürlüğünü etkileyen tüm faktörler reaksiyonun hızını da etkilerler. Bu iki reaksiyon, birbirinden uzak bölgelerde oluşuyorsa makro-hücre, yakın bölgelerde hatta aynı bölgede oluşuyorsa mikro-hücre olarak adlandırılır. Anotta oluşan Fe^{2+} iyonları katoda taşınmaz ancak katotdan gelen OH^- iyonları ile birleşerek anot çevresinde iki değerlikli $Fe(OH)_2$ 'ye dönüşür. Kararsız ve çözünen bir hidroksit olan $Fe(OH)_2$, daha sonra anot çevresindeki oksijen ve su ile kararlı bir hidroksit olan $Fe(OH)_3$ 'e dönüşerek anot çevresine veya sıvı tabanına çöker. $Fe(OH)_3$, Fe_2O_3 demir oksidinin hidroksitidir ve büyük hacim genleşmesi ile meydana gelen sarı renkli boşluklu bir cisimdir (Akman, 1992; Baradan, vd., 2002; Üneri, 2002; Haberal, 2010).

Böylece demir, hidroksit olarak demir hidroksite dönüşürken bir hacim artışı olur. Ortamda demir hidroksit kolayca su alarak yine hacimce genişleyebilir. Bu reaksiyonlar sonucunda ilk demir hacminin 6-7 misli bir hacim artışı olabilir. Betonarme çeliğini koruyan pas payı tabakası bu sebepten dolayı çatlayarak kopma ve parçalanmalara neden olabilir (Cilason vd., 1998; Üncü, 2006).

Anodik reaksiyon;

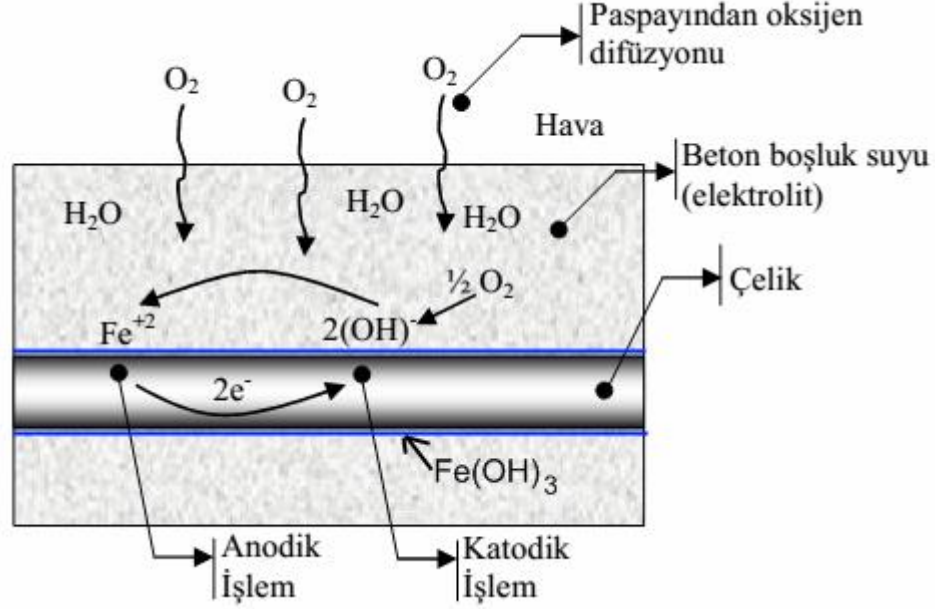


Katodik reaksiyon;



(Haberal, 2010).

Katotta açığa çıkan hidroksil, anotta açığa çıkan demir iyonları ile birleşerek (2.10) reaksiyonu ile gösterilen ferrohidroksite, sonra daha kararlı haldeki ferrihidroksite (2.11)'a dönüşür (Yüzer, 1998; Değirmenci, 2006).



Şekil 2.8. Beton içine gömülü olan donatının korozyonu ve passivasyon tabakasının oluşumu (Boğa, 2005)

Pasivasyonu sağlayan ve donatıyı kaplayan pas tabakası da Şekil 2.8’de görüldüğü gibi $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ’tür. Anot ve katotun farklı konumlarına bağlı olarak beton içindeki donatının korozyonu mikro-hücre ve makro-hücre gibi iki farklı formda meydana gelmektedir. Mikro-hücre korozyonunda, anot ve katot reaksiyonları birbirine çok yakın bölgelerde olduğundan donatı yüzeyinde üniform demir çözülmesi oluşmaktadır. Üniform korozyon genellikle betonun karbonatlaşması ve donatıda yüksek klorür konsantrasyonunda oluşur. Makro-hücre potansiyelinde ise, donatının korozyona uğramış bölgesi (anot) ile korozyon oluşmayan pasif yüzey (katot) bölgesi arasında belirgin uzaklık vardır ve klorür etkisi altında oyuklanma türü korozyonda oluşur. Paspayı, kalınlığının yetersiz olması veya dökülmesi ile tamamen açıkta kalan çelik donatıda atmosferik korozyon görülür (Akman, 1992; Baradan, vd., 2002; Erdoğan, vd., 2004; Haberal, 2010).

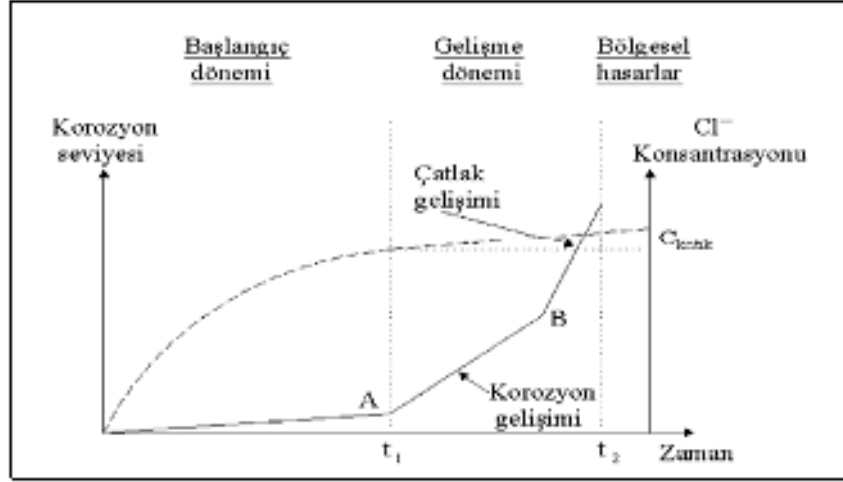
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ’nin betonda karbonatlaşması veya ortamda belirli sınırı aşmış serbest Cl^- ’nin varlığı donatı korozyonuna yol açacaktır. Örneğin, geçirimli betonda atmosferdeki CO_2 gazı, hidrate çimento bileşenleri ile özellikle de beton içindeki

kireçle reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturur, betonun pH değerini indirger. Karbonatlaşma bölgesinin donatıya ulaşması ile donatı çevresindeki alkali ortam yok olur ve kimyasal koruma sona erer (Akman, 1992; Yüzer, 1998; Değirmenci, 2006; Haberal, 2010).

Betonarme çeliği içinde bulunduğu pH değeri yüksek ortamda ($pH > 12$) üzeri bir oksit tabakası ile kaplıdır. Bu sayede anot ve katot oluşumunu engeller. Ortamın pH değeri 8-9-10 gibi değerlere düşünce beton içine girebilen zararlı maddeler çeliğin oksit tabakasını zedeler. Bazı kaynaklarda, pH değerinin 9.5'un altına inmesiyle pasif tabakanın kararlılığının kaybolduğu, bazılarında ise 11.5 değerinin altına düşmesi durumunda korozyon görülme olasılığından söz edilmektedir. Bu nedenle kireci tespit eden ve pH'ı düşüren puzolanik maddeler, atmosfer koşulları etkisinde betonarme betonlarında donatı korozyonuna olumsuz etki eder. Kimyasal korumanın yok olmasının bir diğer nedeni de klorür iyonlarının donatıya ulaşmasıdır (Akman, 1992; Üncü, 2006; Haberal, 2010). Bu iyonlar beton içine şu şekilde nüfuz edebilir;

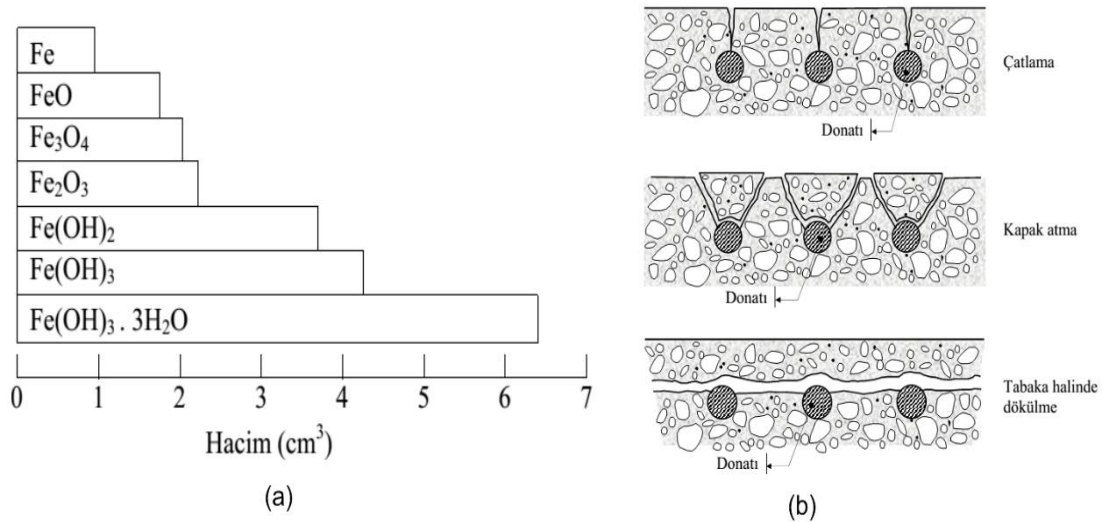
- Karışım suyu başta olmak üzere agrega, katkı ve çimentodan taze betona çok yüksek oranda klor girmesine neden olur. Taze betonda bulunan yüksek klor iyonları çimento hamuruna bağlansalar bile, karbonatlaşma sonucu açığa çıkabilirler.
- Donatının korunmasız muhafaza edilmesi ve bu yüzden demirlerin rüzgar ile sürüklenen klor iyonu içeren tuzlar ile kaplanabilmeleridir.
- Deniz suyu veya klor iyonu içeren suların kürde kullanılmasıdır.
- Düşük pas payı, yüksek su/çimento oranı gibi özelliklere sahip kalitesiz betonların dökülmesi, bunun sonucunda tuzlu yeraltı suları ve havadaki klor iyonlarının betona difüze olabilmesidir. Ayrıca deniz yapılarında, denizden gelen klor iyonları da ayrı bir tehlike oluşturmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2002; Üncü, 2006).

Donatı korozyonu açısından betonarme yapının servis ömrü Şekil 2.9'da görüldüğü üzere başlangıç dönemi (t_1) ve gelişme dönemi (t_2) olmak üzere iki ana dönemde ele alınabilir (Haberal, 2010).



Şekil 2.9. Beton içine gömülü donatının korozyonunu grafik olarak gösterimi (Haberal, 2010)

Başlangıç dönemi (t_1), boşluklu malzemeye klorür penetrasyonuna ve klorür iyonlarının donatı etrafında birikimine karşılık gelir ve bu süreç, örtü betonunun geçirimliliğine, sürekliliğine ve kalınlığına bağlı olarak korozyonu başlatmak için gerekli klorür konsantrasyonundan etkilenmektedir. Gelişme dönemi (t_2) ise, betonarme çelik yüzeyine ulaşan klorür iyonlarının çeliğin yüzeyini depassivasyona uğratmasına bağlı olarak korozyonun gelişimini ve yapıda bölgesel hasarlar oluşmasına karşılık gelmektedir. Donatının korozyona uğraması sonucu Şekil 2.10'da görüldüğü üzere, betonarme betonun çatlaması, kapak atması ve örtü betonunun tabaka halinde ayrışması kaçınılmaz olmaktadır (Haberal, 2010).



Şekil 2.10. (a) Değişik korozyon ürünlerinin demire kıyasla hacim değişimleri, (b) korozyon sonucu betonarme elemanlarda görülen hasarlar (Yiğiter, 2008; Haberal, 2010)

Betonarme veya öngerilmeli beton yapılarda oluşan donatı korozyonu yapının stabilitesi açısından çok önemli sonuçlar doğurur. Çelik donatı korozyon sonucu kesit ve süneklik kaybına uğrar. Oluşan reaksiyon ürünleri nedeniyle betonda oluşan hacim artışı önceleri örtü betonunun çatlamasına, ilerleyen aşamalarda ise tamamen dökülmesine neden olur. Sonuç olarak betonarmede donatının korozyonunu beton özellikleri belirleyecektir (Yüzer, 1998; Baradan, vd., 2002; Yüzer ve Aköz, 2003; Değirmenci, 2006; Haberal, 2010).

2.4.2. Betondaki klor iyonlarının korozyona etkisi

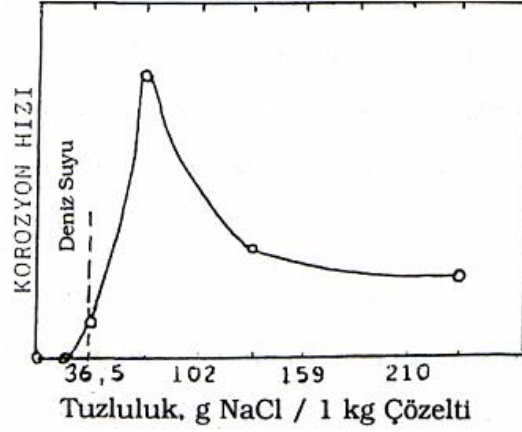
Yeryüzü ve yeraltıları klorür tuzları yönünden çok zayıf iken deniz suyunda tuz miktarı daha fazladır. Beton yapıya klorürler değişik yollardan geçebilir. Bunlar (Kahyaoğlu, 1998; Üncü, 2006);

- CaCl_2 gibi priz-hızlandırıcı katkılardan,
- Beton yapımında kullanılan deniz kumundan veya tuzlu ortamdan elde edilmiş olan agregalardan,
- Kışın betonun üzerindeki buzlanmanın çözülmesi için kullanılan sodyum klorür veya kalsiyum klorür gibi tuzlardan,
- Deniz suyundan,
- Denize yakın bölgelerdeki sisten (Erbil, 1996; Üncü, 2006).

Karma suyunda toplam Cl^- iyonları 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 eder (Postacıoğlu, 1986; Üncü, 2006).

Çözelti içinde tuz konsantrasyonu arttıkça, korozyon hızı artar. Bu artış NaCl konsantrasyonu 75 gr NaCl/kg çözelti değerinde maksimuma ulaşır. Bundan sonra tuz konsantrasyonu arttığı halde korozyon hızının azaldığı görülür (Şekil 2.11).

Bunun nedeni tuz konsantrasyonunun fazla olması durumunda oksijen çözünürlüğünün azalmasıdır, çözelti içinde yeteri miktarda oksijenin bulunmaması korozyon hızını düşürür. Ancak beton içinde tuz konsantrasyonu arttıkça korozyon hızı artar (Üncü, 2006).



Şekil 2.12. NaCl'nin korozyon hızı üzerindeki etkisi (Üncü, 2006)

Klor iyonları, betonarme demirlerinin üzerindeki pasif oksit filminin kırılmasına ve korozyonun daha kısa sürede başlamasına neden olmaktadır (Dönmez vd., 2004; Üncü, 2006).



2.4.3. Mineral katkı kullanımının donatı korozyona etkisi

Taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde sağladığı faydalar sebebi ile mineral katkıları, beton üretiminin vazgeçilmez bileşenlerinden olmuştur. Taşunu gibi inert mineral katkıları betonda boşluk miktarını azaltması, doğal ve yapay puzolanik mineral katkıları (volkanik malzemeler, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) ise ilave bağlayıcılık özellikleri ile avantaj sağlarlar (Yiğiter, 2008).

Betonda kullanılan mineral katkıları, betonun donatıya karşı fiziksel ve kimyasal koruma özelliklerini etkileyerek korozyon davranışını değiştirirler. Mineral katkıların donatı çeliklerinin korozyonu üzerinde birbirine zıt iki etkisi bulunmaktadır.

Bunlardan ilki fiziksel koruma üzerinde etkilidir. İkincil bağlayıcı madde olarak kullanılan mineral katkıları, çimentonun hidratasyon ürünlerinden olan sönmüş kireç ile puzolanik reaksiyon yaparak yeni kalsiyum-silikat-hidrat yapı meydana getirirler. Böylelikle zayıf bir bileşen olan kireç kimyasal olarak bağlanarak suda çözünmesi engellenir. Uygun dozajda kullanılan puzolanik malzemeler ile daha yoğun ve geçirimsiz bir içyapı elde edilir. Geçirimsizliğin azalması ile fiziksel koruma sağlayan bariyer etkisi daha yüksek mertebede bir koruma sağlar (Yiğiter, 2008).

Diğer yandan, puzolanik reaksiyonlar ile bağlanan kireç, betonun boşluk suyundaki alkaliniteyi azaltır, pH seviyesi düşer. Kimyasal koruma yüksek pH ile sağlandığından mineral katkıların kullanımı ile kimyasal koruma seviyesi azalmış olur (Yiğiter, 2008).

Aynı anda gelişen bu iki etkiden hangisi daha baskın çıkar ise, sonuç o yönde ilerleyecektir. Fiziksel koruma daha çok artarsa donatı daha iyi korunacak, kimyasal koruma azalırsa da donatının korozyon riski artacaktır (Yiğiter, 2008).

Beton bünyesine nüfuz eden klor iyonları, mineral katkı tanelerinin yüzeyinde adsorblanır ve alüminli bileşenler ile reaksiyon yaparak kloro alüminatlar şeklinde tutulur. Benzer reaksiyon, çimentonun C_3A bileşeni ile klor iyonları arasında da gerçekleştiği ve ürünün Fridel tuzu olduğu belirtilmişti. Mineral katkıların klor iyonları ile yaptığı reaksiyon da benzer bir ürün oluşturarak klor iyonlarının zararlı etkisinin azaltılmasını sağlar. Fakat katkılı betonların kür koşullarına ve çevresel etkilere karşı, normal portland çimentosu ile üretilen betonlara göre çok daha hassas olduklarına dikkat çekilmektedir (Yiğiter, 2008; Haberal, 2010).

Choi vd., (2006), düşük kalsiyumlu uçucu kül içeren betonlara gömülü çelik çubukların korozyon davranışını %3.5 NaCl içeren agresif ortamda açık devre potansiyeli, polarizasyon direnci ölçümleri, elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve hızlı klor geçirimsizliği ölçümleri ile araştırmışlardır. Uçucu kül içeren betonlardaki donatıların açık devre potansiyellerindeki değişimin daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Düşük korozyon hızı, pitlerin sayısının ve boyutunun az olması ile iyi uyumludur. Su/bağlayıcı oranı azaldıkça korozyon direnci artmıştır. Dahası,

uçucu kül kullanımının klorid iyonlarının permeabilitesinin azalması sebebiyle betondaki çeliğin korozyon direncine yararlı etkileri olmaktadır (Yiğiter, 2008).

Bazı durumlarda ise mineral katkı kullanımının korozyon direncini azalttığı, korozyon gelişimini hızlandırdığı tespit edilmiştir. Montemar vd., (2002), uçucu kül ilavesinin aynı anda karbondioksit ve kloride maruz kalan betonarmede gerçekleşen korozyon prosesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bağlayıcı madde olarak %15 ve %30 uçucu kül içeren harçlara gömülü çelik donatıların korozyon prosesinin incelenmesinde, açık devre potansiyelleri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) kullanılmıştır. Hızlandırılmış karbonatlaşma ve klorid kirliliği koşulları altında, betona %30 uçucu kül ilavesi uçucu kül içermeyen numunelerle karşılaştırıldığında, korozyon hızını bir merteye daha arttırmıştır. Doğal karbonatlaşma koşulları altında uçucu kül ilavesi ile harçtaki klorid içeriği azalmakta, hızlandırılmış karbonatlaşma durumunda artmaktadır. Bu zıt eğilimi, etki sırasında karbonatlaşma, puzolanik reaksiyonlar ve klorid difüzyonu arasındaki yarış ile açıklamışlardır (Yiğiter, 2008).

Puzolan etki gösteren mineral katkı kullanımıyla, donatının, klorüre bağlı korozyonun azaltılmasında, betonda; mineral katkı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanının önemli bir rol oynadığı ve bu mineral katkıların daha ince ve süreksiz boşluk yapısı oluşturdukları ifade edilmektedir. Hızlandırılmış klorür geçirimliliği deney sonuçlarına göre; kür ve çevre koşullarından bağımsız olarak normal Portland çimentosu ile üretilen betonların yüzey tabakası ve iç kısımları, erken yaşlarda mineral katkı içeren betonlara kıyasla daha geçirimli, geç yaşlarda ise daha geçirimsizdir; normal Portland çimentosu ile üretilen betonların geçirimliliğinin su-çimento oranının artması ile arttığı, başlangıç kür süresinin uzaması ile azaldığı ifade edilmektedir (Haberal, 2010).

2.5. Donatılardaki Korozyon Riskinin Belirlenmesi

Metalik malzemeler üzerinde oluşan korozyon, farklı teknikler ve değişik ölçüm yöntemleri ile değerlendirilebilen malzeme kaybını ifade etmektedir. Bir malzemeyi korozyon konusunda değerlendirmenin en basit yolu korozyondan önce ve sonra göz

ile inceleme yapmaktır. İnceleme sonucu olarak, paslanmış yüzey alanı, korozyon sebebiyle oluşan çukurcuk (pit) sayıları ve korozyon ile kaybedilmiş kesit alanı miktarı hesap edilebilir (Yiğiter, 2008).

Her durumda yapılması mümkün olmayan, çoğu zaman yapı güvenliğini tehlikeye sokan ve değerlendirme için fazla zaman gerektiren bir yöntem de malzemenin korozyona maruz kaldıktan sonra ağırlık kaybının ölçülmesidir. Kütle kaybının belirlenmesi, metalik korozyon çalışmaları için basit bir yöntem olmakla beraber bu yöntem gerçeğe en yakın sonuçları veren referans bir yöntemdir (Yiğiter, 2008).

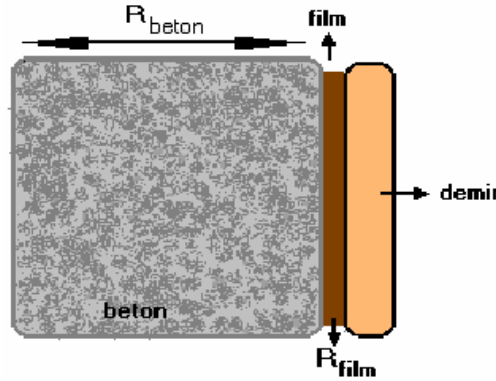
Ancak, görsel inceleme ve kütle kaybı yöntemleri çoğu zaman sınırlı uygulama alanına sahiptir. Hasar oluşmuş bir betonarme elemanda, korozyon düzeyinin tahribatsız olarak tespiti oldukça yüksek bir önem taşımaktadır. Donatı korozyonunun hasarsız bir şekilde tespiti için oldukça geniş uygulanan yöntemler elektro-kimyasal tekniklerdir. 1949'da Pourbaix, Ca(OH)_2 'ye doymuş bir çözeltiye batırılmış çubuklara polarizasyon eğrilerini uygulamış ve donatıların korozyon davranışını ortaya koymaya çalışmıştır. Daha sonra 1959'da Kaesche ve Baümel benzer bir çalışmayı harç örneklerinde yapmışlardır. Polarizasyon direnci gibi daha ileri düzeyde elektrokimyasal tekniklerin uygulanması 1970'lerin başlarında gerçekleşmiştir. Elektrokimyasal impedans veya elektrokimyasal gürültü 1980'lere kadar kullanılmıştır. Bu aşamalardan sonra gerçek yapılara uygulanması ile birlikte elektrokimyasal teknikler oldukça hızlı gelişmiştir. Hasarsız olmaları ve periyodik olarak ve uzun süreli ölçümlere olanak sağlamaları, bu yöntemlerin yaygın kullanımı için ciddi bir avantaj sağlamaktadır. Donatı korozyonu ile erken hasara uğraması nedeni ile yapıların kalan yapısal ömür ve koşullarının belirlenmesi ihtiyacı bu uygulamalar için bir itici güç olmuştur (Yiğiter, 2008).

Elektrokimyasal tekniklerle, donatı korozyonu ile ilgili zaman içinde ortaya çıkan eğilim ve değişimler gözlemlenebilmekte, hatta elde edilen veriler dikkatli bir biçimde yorumlanarak gelecekte betonda olabilecek çatlama anı tahmin edilebilmektedir. Elektrokimyasal teknikler, betonda donatı korozyonu aktivitesi ile ölçüm yapıldığı anda korozyon hızı hakkında fikir veren tekniklerdir. Ölçülen korozyon hızı kesin bir değer olmayıp korozyon hızının seviyesi ile ilgili bir büyüklüktür (Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Haberal, 2010).

Korozyona uğrayan yapıların güvenliğinin değerlendirilmesi ana sorunlardan biridir. Ancak, bilgi durumu hala bunların değerlendirilmesi için tamamıyla tatmin edici yöntem verememektedir. Bununla birlikte, son on yılda, korozyon akımı ölçümünün yerinde yapılabilirliği ile ilgili birçok gelişme olmuştur. Yıllık tipik Icorr değerinin elde edilmesinde bazı belirsizlikler olmasına rağmen, korozyon hızının niceliği, yapının kalan yük taşıma kapasitesinin hesabı için bir yaklaşıma olanak sağlamıştır. Hava koşulları betonun nem içeriğini etkiler ve korozyon akımında buna karşı gelen değişimlere neden olur. Andrade ve Alonso (2001) çalışmalarında, korozyon akımını yerinde doğru bir şekilde ölçme koşulları ile birlikte yıllık tipik Icorr değeri elde etmek için bir yöntem sunmaktadır. Bunun, donatı kesit alanı kaybının bulunması için gerekli formüllere yerleştirilmesi de verilmektedir (Yiğiter, 2008).

2.5.1. Ohm kanunu ve korozyon hızı

Metalik özellik gösteren malzemeler üzerinde, çeşitli etkenler nedeniyle bir film tabakası oluşur ve bu film tabakasına biz korozyon oluşumu şeklinde nitelendirebiliriz. Bu oluşum, elektriksel bir dirence neden olur.



Şekil 2.11. Demir üzerinde elektriksel dirence sebep olan filmlerin şematik olarak gösterimi (Dönmez vd., 2004; Üncü, 2006)

Ohm yasasına göre;

$$E = I \times R \quad (2.13)$$

E; potansiyel, I; akım, R; direnç şeklinde tanımlanır.

$$E = I \times (R_{\text{film}} + R_{\text{beton}}) \quad (2.14)$$

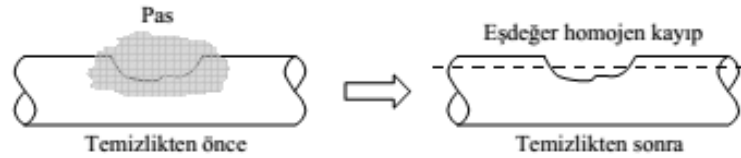
Burada;

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

R_{beton} ; Beton direnci (Dönmez vd., 2004; Üncü, 2006).

2.5.1.1. Korozyon hız birimleri

Korozyon hızı pratik olarak, birim yüzey alanından birim zamanda uzaklaşan metal kütlesi olarak tanımlanır. Hesapları kolaylaştırmak için korozyon hızını, malzeme koroziv ortama maruz bırakılmadan önce ve sonra kütle kaybının belirlenmesi ile ölçülebilir. Test süresi boyunca ifade edildiğinde toplam, üniform korozyon kabulü yapıldığında ise ortalama bir gösterge olmaktadır (Yiğiter, 2008; Yalçın ve Koç, 2004) (Şekil 2.20).



Şekil 2.12. Donatıda gerçekleşen lokal korozyon hasarı ve eşdeğer üniform malzeme kaybının şematik olarak gösterimi (Yiğiter, 2008)

2.5.1.1.1. Akım yoğunluğu

Tanım olarak, birim anot yüzey alanından geçen akım şiddeti korozyon hızını verir. Bu nedenle katodik koruma hesaplarında korozyon hızı birimi olarak anot akım yoğunluğunun mA/m^2 (veya $\mu\text{A/cm}^2$) olarak kullanılması tercih edilir. $1\text{mA/cm}^2 = 10\text{ A/m}^2$ 'dir (Yalçın ve Koç, 2004).

2.5.1.1.2. Kütle kaybı

Endüstride, birim yüzeyden birim zamanda kaybolan madde kütlesi de korozyon hızı olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla en çok kullanılan korozyon birimi, $\text{gram/m}^2.\text{gün}$ (gmd) ve $\text{mg/dm}^2.\text{gün}$ (mdd)'dir. 1 gmd, 1 metre kare yüzey alanından 1 günde kaybolan gram madde miktarını ifade eder. 1 mdd ise, 1 desimetre kare yüzey alanından 1 günde kaybolan miligram madde miktarıdır. Bu iki birim aynı ilkelere dayanır ve birbirlerine dönüştürülebilir. $1\text{ gmd} = 10\text{ mdd}$ 'dir.

Kütle kaybı ile akım yoğunluğu arasındaki bağıntı Faraday Yasası ile ifade edilir. Bu nedenle aynı akım yoğunluğunda farklı metallerin kütle kayıpları farklı olur. Demir. Metali için korozyon hız birimleri eşdeğerleri şöyledir (Yalçın ve Koç, 2004):

$$1 \text{ g/m}^2.\text{gün} = 10 \text{ mdd} = 0.0465 \text{ mm/yıl} = 1.85 \text{ mpy}$$

1 mpy: Korozyona uğrayan metal yüzeyinde 1 yılda meydana gelen mil (0.001 inç) olarak kalınlık azalmasıdır.

2.5.1.1.3. Penetrasyon

Pratikte korozyon hızının derinlik (yani metal kalınlığındaki azalma) olarak ifade edilmesi büyük kolaylık sağlar. Korozyon hızı olarak genellikle “mm/yıl” birimi kullanılır. Bunun anlamı, metal yüzeyinden 1 yılda korozyon ile uzaklaşan mm olarak metal kalınlığıdır. İngiliz ölçü sisteminde penetrasyon değeri ipy (inch per year) veya mpy (mil per year) cinsinden verilmektedir. Bu birimlerin mm/yıl olarak karşılıkları şöyledir:

$$1 \text{ ipy} = 25.4 \text{ mm/yıl}$$

$$1 \text{ mpy} = 0.0254 \text{ mm/yıl}$$

Penetrasyon derinliğinden kütle kaybına geçmek için söz konusu metalin yoğunluğu kullanılır. Dolayısıyla her metal için ayrı olarak hesaplanması gerekir. Demir metali için korozyon penetrasyonu eşdeğerleri şöyledir (Yalçın ve Koç, 2004):

$$1 \text{ mm/yıl} = 21.5 \text{ gmd} = 215 \text{ mdd} = 40.0 \text{ mpy}$$

2.5.2. Korozyon ölçüm yöntemleri

Betonarme yapılarda korozyon problemlerini incelemek ve değerlendirmek üzere kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Yapıda ne kadar hasar olduğunun ve bu hasarın zamanla nasıl büyüdüğünün anlaşılması için tek bir yöntem yeterli olamamakta ve ne yapılacağına karar vermek mümkün olmamaktadır. Donatı korozyonu dışında donma-çözülme, termal etkiler, alkali-agrega reaksiyonu, yapıda farklı oturmalar gibi

sebepler de yapıda hasara neden olabilmektedir. Bazı durumlarda çoklu sebeplerle ortaya çıkan hasar, korozyon hasarının şiddetini arttırmaktadır. Çizelge 2.4'te betonarme yapılarda inceleme teknikleri verilmiştir (Yiğiter, 2008).

Betonarme yapının tam olarak değerlendirilmesi iki aşamalı bir süreçtir. İlk aşamadaki ön inceleme, problemin yapısını karakterize etmeli ve detaylı inceleme için oluşturulacak plana yön vermelidir. Detaylı inceleme ise, problemin nedenleri ile hasarın boyutları ortaya konmalıdır. Yapısal hasarların ortaya çıkmış olması veya yapı güvenliğinin belirsiz olduğu durumlarda ise yapısal analiz gerekmektedir (Yiğiter, 2008).

Çizelge 2.4. Uygulamada kullanılan yöntemlerin özet gösterimi (Yiğiter, 2008)

Yöntem	Ölçülen	Kullanım	Yaklaşık hız
Görsel inceleme	Yüzey hasarları	Genel	1 m ² /sn
Çekiçle kırma	Tabaka atma	Genel	0.1 m ² /sn
Paspayı ölçer	Donatı derinliği ve boyutu	Genel	1 okuma / 5dk
Phenolphtalein	Karbonatlaşma derinliği	Genel	1 okuma / 5dk
Klorid içeriği	Klorür korozyonu	Genel	Karot alma veya delme + laboratuvar veya özel şantiye analizleri
Yarı hücre potansiyeli	Korozyon riski	Genel / uzman	1 okuma / 5sn
Lineer polarizasyon	Korozyon hızı	Genel / uzman	Ekipmana bağlı olarak 1 okuma / 5-30dk
Direnç	Beton direnci / korozyon riski	Genel / uzman	1 okuma / 20 sn
Permeabilite	Difüzyon hızı	Genel / uzman	1 okuma / 5 dk veya karot + labaratuvar
Ultrases	Betondaki hasarlar	Uzman	1 okuma / 20 dk
Petrografi	Beton özellikleri	Genel	Karot + laboratuvar
Radar ve radyografi	Hasarlar, çelik yeri, koşullar	Uzman	Araçlı sistemde > 1 m ² /sn, el sisteminde 1 m ² /20sn + yorumlama

Görsel inceleme, karbonatlaşma, klorid ölçümleri ve pas payının belirlenmesi her durumda gerekli metotlardır. Diğer tekniklerin kullanımı ile korozyon sebepleri, hasarın miktarı ve korozyonun yayılımı ile ilgili detaylar edinilir (Yiğiter, 2008).

2.5.2.1. Elektrokimyasal yöntemler

Donatı korozyonu ile ilgili çalışmalarda en yaygın yöntem elektrokimyasal ölçüm yapılmasıdır. Bu yöntem beton içerisindeki çeliğin korozyon açısından davranışını hasarsız olarak inceleme olanağı vermesinin yanında belirli bir süre içinde donatının davranışının izlenmesini de sağlar (Doğan, 2008; Yamaç, 2010).

2.5.2.1.1. Korozyon potansiyeli ölçümü (yarı hücre potansiyeli)

Bu test yöntemi, betonarme donatısının korozyon aktivitesini tespit etmek amacıyla laboratuvarda veya yerindeki betondaki kaplamasız donatıların elektriksel yarı hücre potansiyellerinin tespiti amacıyla kullanılmaktadır. Kurutulmuş beton yüzeyleri veya dielektrik bir malzeme ile kaplanmış yüzeyler kabul edilebilir mertebelerde elektrik akımı sağlamadıklarından, böyle şartlarda kullanımları doğru değildir. Yöntemin ASTM C876 (2004)'da belirtilen kullanım koşulları ve önemi şu şekildedir:

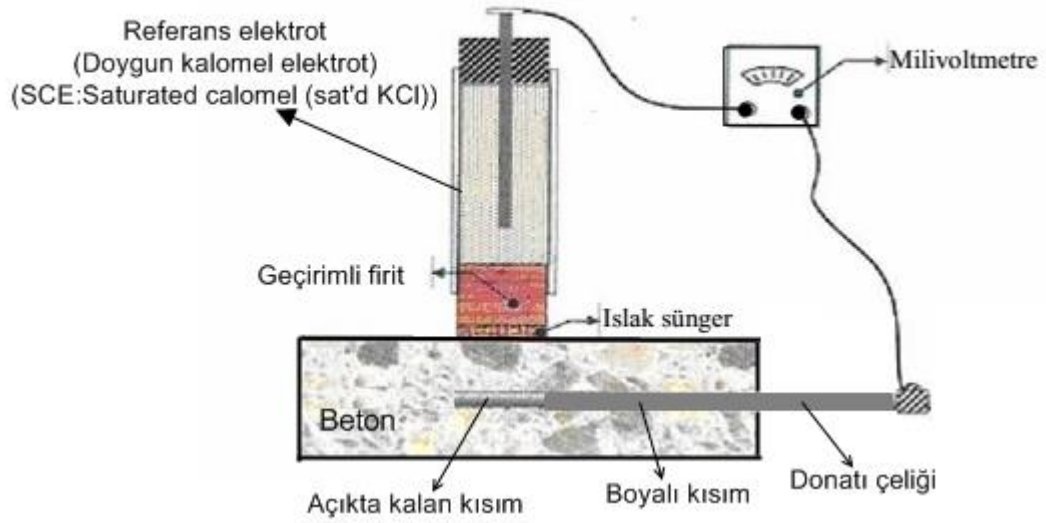
- Yöntem, servisteki yapıların değerlendirilmesi ve araştırma-geliştirme işleri için uygundur.
- Bu metot elemanların boyutu ve betonarme çeliği üzerindeki beton paspayı kalınlığı ne olursa olsun kullanılabilir bir yöntemdir.
- Betonarme elemanın servis süresi boyunca herhangi bir zamanda kullanılabilir.
- Bu test metodunun kullanımıyla elde edilen sonuçlar, çeliğin veya betonarme elemanın yapısal özelliklerinin tahmini anlamında ele alınmamalıdır.
- Potansiyel ölçümleri, beton malzemeleri alanında ve korozyon deneylerinde tecrübeli mühendisler ve teknik uzmanlarca yorumlanmalıdır.

Betona gömülü çeliğin korozyon aktivitesinin incelenmesi ve yapının servis süresi boyunca yapıya olan muhtemel etkilerinin belirlenmesi amacıyla; potansiyel ölçümlerine ek olarak sıklıkla, klorid içeriği, karbonatlaşma derinliği, korozyon hızı

sonuçları ve çevresel etki şartları gibi diğer bilgileri de kullanmak gereklidir (Yiğiter, 2008).

Potansiyel ölçümü ile beton yüzeyinde pas lekeleri, çatlama ve parçalanma gözle görülür hale gelmeden önce donatının korozyon aktivitesi gözlemlenebilmektedir. Bu teknik, söz konusu amaç için kullanılan elektro-kimyasal tekniklerin uygulama bakımından en basit olanıdır. Teknik, donatının açık-devre veya korozyon potansiyelinin belli bir dönem süresince ölçümüne dayanır ve korozyon olasılığı hakkında fikir verir. Bunun için yüksek empedanslı ($\geq 10^8 \Omega$) bir voltmetre aracılığıyla donatı potansiyeli bir referans elektroda karşı ölçülür. Beton içine gömülü donatının elektropotansiyeli, belirli bir yarı hücrenin donatı ile bağlantısı kurularak saptanır. Referans elektrotu olarak en çok Cu/CuSO₄ (bakır/bakır sülfat)(CSE), Ag/AgCl (gümüş/gümüş klorür), Hg/Hg₂Cl₂ (kalomel) ve hidrojen elektrot kullanılır. Bunlardan KCl eriğine daldırılmış Hg/Hg₂Cl₂ Kalomel elektrotu, KCl çözeltisinin normalitesine bağlı olarak 0.1 N; 1N veya doymuş kalomel elektrot adlarını alır. Yapılması ve saklanması kolaylığı bakımından ve 1 mV'luk hassasiyet yeterli olduğundan doymuş kalomel elektrot (SCE) daha yaygın olarak kullanılır (E = 0.2425 volt) (Yüzer, 1998; Baradan vd., 2002; Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Haberal, 2010).

Yarı hücre potansiyel ölçümlerine ait düzenek şematik olarak Şekil 2.14'te gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Beton içindeki çelik donatının yarı hücre yöntemiyle elektropotansiyel değerinin belirlenmesi (Boğa, 2005; Doğan, 2008; Haberal, 2010; Yamaç, 2010)

Bazı koşullarda ölçümlerden önce beton yüzeyi devrenin elektriksel direncini düşürmek için elektriksel temas çözeltisi ile nemlendirilmesi gerekebilir. Burada önemli olan doğru ölçümler alabilmek için devrenin kararlı durumda olmasıdır. Hatalı okumalara sebep olan dalgalanmaları engellemek amacıyla, ölçüm yapılacak yüzey sprej şeklinde, serbest yüzey suyu kalmadan nemlendirilmelidir. Yarı hücre potansiyeli ölçüm değerleri 0.01 V yaklaşıklıkla kaydedilmeli ve eğer ölçüm sıcaklıkları 22 ± 5.5 °C aralığı dışında ise mutlaka sıcaklık düzeltmesi yapılmalıdır (Yiğiter, 2008).

Beton içerisinde hareket eden iyonlarla devre tamamlanır ve donatı çeliğinin elektropotansiyeli saptanmış olur. Ölçülen potansiyelde gözlenen sapmalar korozyon aktivitesinin zamanla değiştiğini gösterir. Potansiyel okumaları kaydedildikten sonra normal olmayan okumalar değerlendirilmelidir. Negatif yönde en büyük değerlerin okunduğu bölgelerde korozyon izleri ve korozyonun nedenleri araştırılmalıdır. Ölçüm ve yorumlama ASTM C 876'da belirtilen kriterlere göre yapılır ve değerlendirme kriterleri Çizelge 2.5'te özetlenerek gösterilmiştir. Farklı ölçüm elektrotları kullanılması durumunda değerlendirme Çizelge 2.6'da göre yapılabilir (Yüzer, 1998; Baradan, vd., 2002; Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Yiğiter, 2008; Haberal, 2010).

Çizelge 2.5. Yarı hücre potansiyeli değerlerine göre korozyon olasılıkları (ASTM C 876, 2004)

Yarı hücre potansiyeli		Korozyon aktivitesi
CSE*	SCE**	
-200 mV'dan daha pozitif	-120 mV'dan daha pozitif	% 90'dan daha büyük olasılıkla korozyon yok
-200 ile -350 mV aralığı	-120 ile -270 mV aralığı	Belirsiz bölge
-350 mV'dan daha negatif	-270 mV'dan daha negatif	% 90'dan daha büyük olasılıkla aktif korozyon

* Bakır/bakır sülfat elektrodu

** Doygun Kalomel elektrot

Çizelge 2.6. Betondaki çeliğin korozyon potansiyeli belirlenmesinde farklı referans elektrot değerleriyle korozyon riski arasındaki ilişki (ASTM C 876, 2004)

Bakır / bakır sülfat elektrodu (mV)	Gümüş / gümüş klorid elektrodu (mV)	Standart hidrojen elektrodu (mV)	Doygun Kalomel elektrot (mV)	Korozyon durumu
E > -200	E > -106	E > +116	E > -126	Düşük (%10 risk)
-200 >E> -350	-106 >E> -256	+116 >E> -34	-126 >E> -276	Orta
E < -350	E < -256	E < -34	E < -276	Yüksek (%90 risk)
E < -500	E < -406	E < -184	E < -426	Şiddetli korozyon

Singapur'un kuzeyindeki Woodlands'ta 24 yıllık bir betonarme rıhtımının korozyon incelemesini yapmak üzere potansiyel haritalarını çıkaran Liam vd., donatı korozyon düzeyini belirlemek ve izlemek için korozyon potansiyeli ölçümünün güvenilir ve uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir (Boğa, 2005; Haberal, 2010).

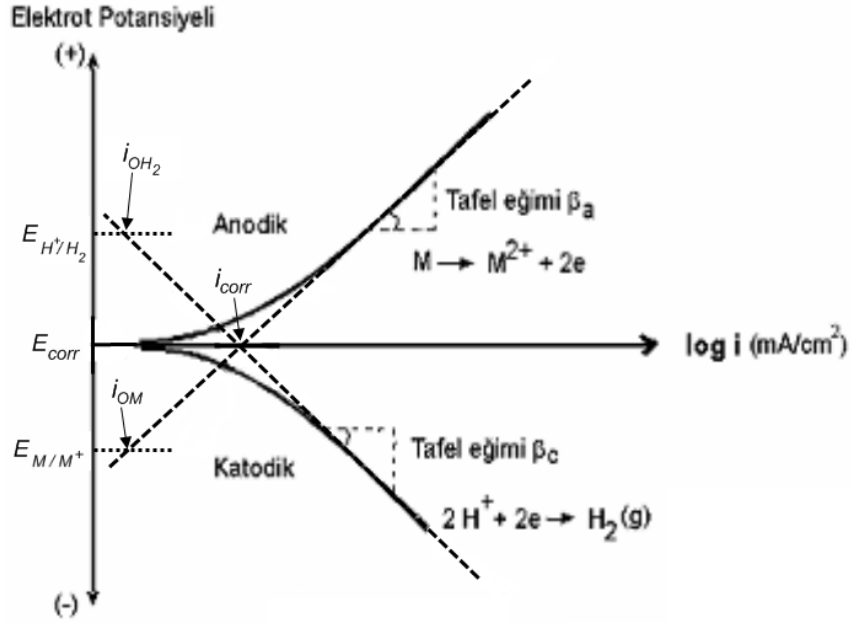
Potansiyel ölçümleri korozyon aktivitesini tespit eder ancak, korozyon aktivitesinin net yeri bu yöntemle bulunamaz. Korozyon aktivitesinin yerinin hassas olarak bulunması, yarı hücre ile korozyona uğrayan çelik arasındaki malzemenin elektriksel rezistansının bilinmesini gerektirir. Özellikle tuzlu su ortamlarında korozyon bölgesinin hassas tespiti genellikle mümkün değildir. Ancak yarı hücre potansiyeli değerlerinin sayısal büyüklüğü genellikle karbonatlaşmamış portland çimentosu harcı ya da betonuna gömülü çeliğin korozyonunun varlığı veya yokluğunun tespitini sağlar (Yiğiter, 2008).

Ölçüm yapılan noktada yarı hücrenin ucundaki çeliğin, bazı özel şartlar dışında, korozyon hızını belirtmez. Betonun suya doygun olup olmadığı, paspayı tabakasının ne kadar karbonatlaştığı, çeliğin kaplanmış olup olmadığı, gibi birçok koşul altında yarı hücre potansiyeli değerleri değişkenlik gösterir. Sonuçların yorumlanması tecrübe ve uzmanlık gerektirir. Böyle durumlarda karbonatlaşma ve kaplama gibi faktörlerin ayrıca analiz edilmesi gerekmektedir (Yiğiter, 2008).

2.5.2.1.2. Tafel ekstrapolasyon yöntemi

Korozyon, metal ile çözelti arasında karşılıklı iki elektrokimyasal reaksiyonun dengeye gelmesi sonucu oluşur. Reaksiyonlarından biri metalin çözünmesiyle oluşan anodik reaksiyon, diğeri ise çözelti ortamında bulunan O_2 veya H^+ 'nın indirgenmesi ile oluşan katodik reaksiyondur. Anodik reaksiyon sonucu açığa çıkan elektronlar katodik reaksiyonda indirgenmede kullanılır (Mamaş, 2003; Değirmenci, 2006; Üncü, 2006).

Bu yöntemde bir yardımcı elektrot kullanılarak elektroda bir dış akım uygulanır ve buna karşılık gelen potansiyeldeki artış bir referans elektrot yardımıyla ölçülür. Bir reosta yardımıyla akım her seferinde değiştirilerek potansiyeldeki artış kaydedilir. Günümüzde bilgisayar kontrollü cihazlar yardımıyla uygulanan akım otomatik olarak değiştirilerek gerçekleştirilmektedir. Böylece değişik akım ve potansiyel değerinde tutulan metalin istenen bölge aralığında akım-potansiyel eğrileri çizilir. Bu yöntemle hem anodik hem de katodik polarizasyon eğrileri elde edilebilir. Daha kolay elde edilmesi bakımından katodik polarizasyon eğrisi tercih edilmektedir (Keleştemur, 2002). Şekilde 2.15'te görüldüğü üzere yüksek katodik akım yoğunluğu uygulandığında katodik polarizasyon eğrisi ve hidrojen çıkışı doğrusu birbiriyle çakışmaktadır. Stern ve Geary bu lineer bölge korozyon potansiyeli değerine ekstrapolasyon yapılarak korozyon hızının bulunabileceğini göstermiştir. Korozyon potansiyelinde hidrojen çıkış hızı, metal çözünme hızına eşit olacaktır. Dolayısıyla bu noktaya karşı gelen akım yoğunluğu metalin korozyon hızı olarak kabul edilebilir (Keleştemur, 2002).



Şekil 2.14. Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri (Yalçın ve Koç, 2004)

Şekil 2.15'te elektrokimyasal olarak elde edilen bir tafel polarizasyon diyagramı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi E-log i polarizasyon eğrilerinde, uygulanan dış akım belirli bir değere eriştikten sonra polarizasyon eğrileri lineer 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. Bu durumda elektrot potansiyeli bir karma potansiyel değerine (E_{corr} , korozyon potansiyeli) erişir. Bu potansiyele karşı gelen akıma da korozyon akımı (i_{corr}) denir (Yalçın ve Koç, 2004).

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_{corr} ve korozyon potansiyeli E_{corr} 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 akım bölgesinde lineer olarak devam etmelidir. Birçok deneylerde bu lineer bölge istenildiği kadar uzun olmaz. Bunun sebebi konsantrasyon polarizasyonu etkisidir (Özcan, 2000; Asan, 2002; Keleştemur, 2002; Mamaş, 2003).

2.5.2.1.3. Polarizasyon direnci yöntemi (lineer polarizasyon rezistans)

Korozyon hızını izlemeye genellikle kullanılan bu yöntem ile korozyon hızını kısa sürede ölçmek mümkündür. Yöntemin temeli, polarizasyon akım eğrilerinin elde edilmesi ve bundan faydalanılarak korozyon akımının bulunmasına dayanır. Lineer polarizasyon rezistans (LPR) tekniğine ilişkin prensipler ilk kez 1950 yıllarında Stern ve Geary tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde, doğrusal akım kullanılarak uygulanan polarizasyon direnci tekniği, korozyon hızı ölçümlerinde en çok kullanılan yöntem olmuştur. Çünkü korozyon potansiyeli civarında akım ile potansiyelin logaritmik ilişkisinin doğrusal davranışı sayesinde basit, hızlı ve hasarsız bir yöntem oluşturulmuştur. Beton içerisindeki ilk uygulamaları 70'lerin başında denenmiş ve donatıda korozyon hızını belirlemede yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bir potansiyostat ve bazı yardımcı aletler gerektiren bu ölçüm yöntemi ASTM G59 (1991) standardında anlatılmıştır (Keleştemur, 2002; Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Doğan, 2008; Haberal, 2010).

Prensip olarak, beton içindeki donatıya istenilen sabit potansiyeli sağlayan bir potansiyostat aracılığıyla küçük bir elektrik akımı verilerek donatı polarize edilir ve polarizasyonun açık-devre potansiyeli üzerindeki yansıması gözlemlenir. Polarizasyon genellikle korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerinden itibaren ± 10 mV aralığında (Tafel bölgesi) gerçekleştirilir. Bu sınırlar içinde uygulanan elektrik akımı ile elektrot potansiyeli arasındaki ilişki yaklaşık olarak doğrusaldır. Bu ilişkinin doğrusal olarak değiştiği bu bölgenin eğimi polarizasyon direnci (R_p) olarak tanımlanır ve bu değer Stern-Geary bağıntısı (Denklem 2.15) yardımıyla korozyon akımı ile ilişkilendirilir (Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Haberal, 2010):

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I_{app}} \quad B = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.3(\beta_a + \beta_c)} \quad i_{corr} = \frac{B}{R_p \cdot A} \quad (2.15)$$

Burada;

ΔE : Polarizasyon değişimi

ΔI : Akım değişimi

β_a : Anodik tafel sabiti

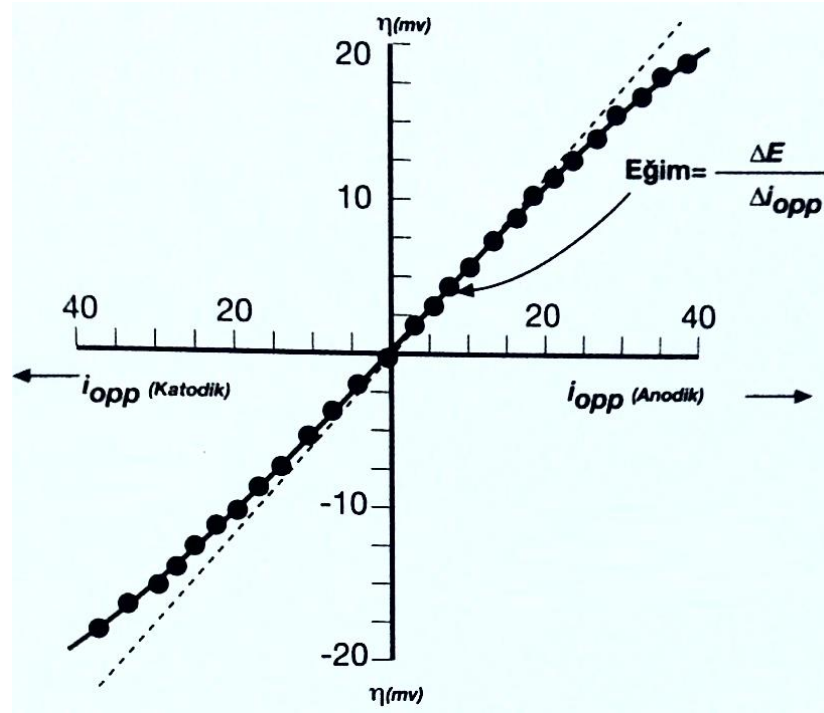
β_c : Katodik tafel sabiti

B : Stern-Geary sabiti (aktif paslanan çelikte 26 mV, pasif çelikte 52 mV)

I_{corr} : Korozyon akım yoğunluğu ($\mu A/cm^2$)

R_p : Polarizasyon direnci ($ohm.cm^2$)

A_k : Donatının aktif olarak korozyona uğradığı alan (Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Doğan, 2008; Haberal, 2010; Yamaç, 2010).



Şekil 2.15. Lineer polarizasyon eğrisi (η: Potansiyel fark, i: Uygulanan akım) (Yalçın ve Koç, 2004)

Şekil 2.16'da görüldüğü gibi E_{corr} civarındaki birkaç mV'luk polarizasyon bölgesinde meydana gelen potansiyel fark ile tatbik edilen akım değerleri birbiriyle doğrusal olarak orantılıdır. Polarizasyon direnci değerine eşit olan bu doğrusal bölgenin eğimi korozyon hızı ile ters orantılıdır (Doğan, 2008).

Korozyona neden olan akım yoğunluğu belirlendikten sonra korozyon hızı (CR), Faraday kanununa göre hesaplanır (Erdoğan, 2003; Haberal, 2010):

$$CR(\mu m / year) = 3.27 \frac{M \cdot i_{corr}}{z \cdot \rho} \quad (2.16)$$

Burada;

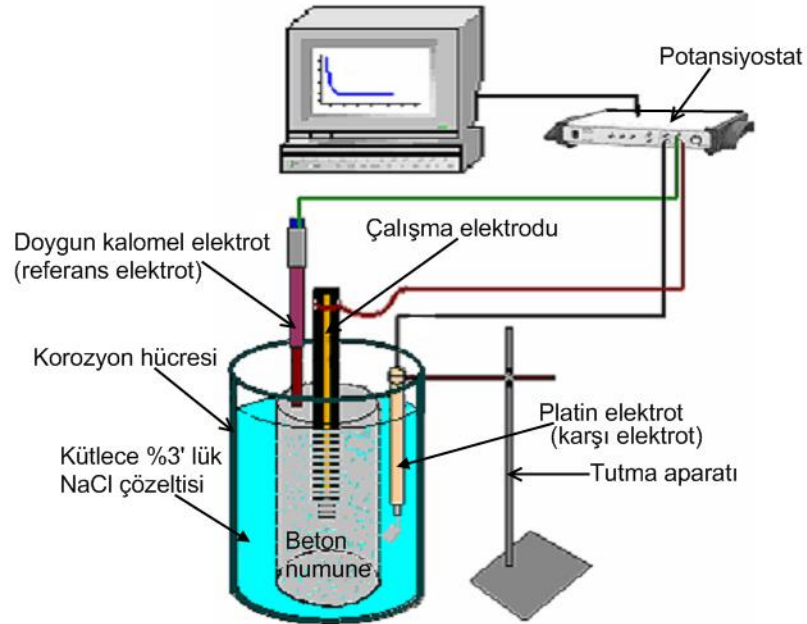
CR: korozyon hızı (mikrometre/yıl),

M: metalin atomik ağırlığı (gr),

z: metalin elektron sayısı

ρ : metalin özgül ağırlığı (gr/cm^3).

Lineer polarizasyon tekniğinde korozyon sistemi için ölçülen direnç, gerçekte ohmik direnç olarak bilinen elektrolit direnci ile polarizasyon direncinin toplamıdır. Betonda olduğu gibi, ohmik direnç çok yüksek olabilir ve dolayısıyla ölçülen korozyon hızı gerçeğinden oldukça düşük çıkabilir. Günümüzde LPR ölçümü için kullanılan cihazlarda ohmik direnç nedeniyle meydana gelen gerilim düşmesini yok edecek şekilde elektrik devreleri (IR-drop) ilave edilmektedir. Lineer polarizasyon ölçümü için Şekil 2.17’de gösterilen düzenek kullanılmaktadır. Bu düzenekte üç elektrod yer almaktadır. Bu elektrodlerden ilki yarı hücre elektrodu (referans elektrodu), ikincisi çalışan elektrod (working electrode) olarak adlandırılan donatı çeliği, üçüncü elektrod ise donatıya polarizasyon sağlayan karşı elektrottur (counter electrode) (Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Haberal, 2010; Yamaç, 2010).



Şekil 2.16. Lineer polarizasyon rezistans ölçümünde kullanılan üç elektrotlu deney düzeneği (Değirmenci, 2006; Üncü, 2006)

Bu düzeneikle, polarizasyon sırasında uygulanan tarama hızları genellikle 2.5-10 mV/min. arasında değişir. LPR tekniği ile elde edilen ölçümlerin yorumuna ait kriterler Çizelge 2.7’de özetlenmektedir (Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Haberal, 2010).

Çizelge 2.7. LPR ölçümlerinin yorumlanmasına ait kriterleri (Erdoğan, 2003)

Korozyon Akım Yoğunluğu	Korozyon Durumu
$i_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$	Pasif korozyon
$0.1 \mu A/cm^2 < i_{corr} < 0.5 \mu A/cm^2$	Hafif-orta arası korozyon
$0.5 \mu A/cm^2 < i_{corr} < 1.0 \mu A/cm^2$	Hafif-yüksek arası korozyon
$i_{corr} > 1.0 \mu A/cm^2$	Yüksek korozyon hızı

Uygulaması son derece basit ve hızlı olması yanında düzeneğin ucuz olması LPR tekniğini diğer yöntem ve tekniklere göre avantajlı kılmaktadır. Ölçüm birkaç dakika içinde yapılabilmekte ve korozyon yoğunluğu ve dolayısıyla korozyon hızı basit bir biçimde hesaplanmaktadır. Buna karşın tekniğin bir kısmı kendine özgü ve bir kısmı deneysel koşullarla ilgili bazı dezavantajları vardır (Erdoğan, 2003; Boğa, 2005; Haberal, 2010). Yalçın ve Koç (2004), pratikte ölçülen korozyon hızı ile betonarme demirlerinin korozyona dayanıklılığı arasında Çizelge 2.8’de vermişlerdir.

Çizelge 2.8. Korozyon hızına göre demirlerin korozyon dayanıklılığı (Yalçın ve Koç, 2004)

Ölçülen korozyon hızı	Betonarme demirlerinin korozyona dayanıklılığı
$i_{corr} < 0.2 \mu A/cm^2$	Demirler korozyona uğramamaktadır
$i_{corr} = 0.2 - 1.0 \mu A/cm^2$	10-15 yıl içinde korozyon etkili olabilir
$i_{corr} = 1.0 - 10.0 \mu A/cm^2$	2-10 yıl içinde korozyon beklenir
$i_{corr} > 10.0 \mu A/cm^2$	2 veya daha az yıl içinde korozyon beklenir

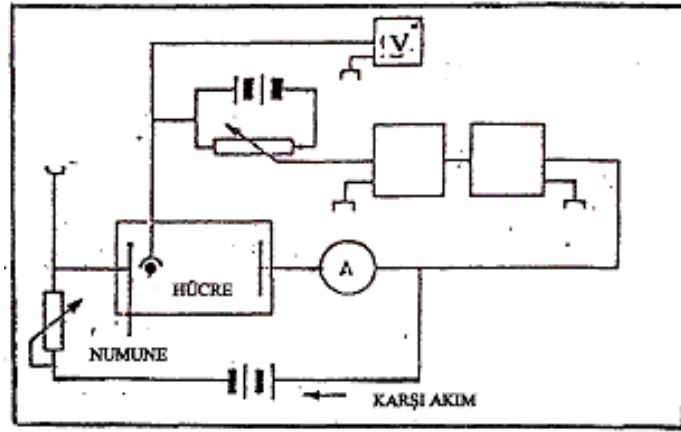
Beton, yüksek elektriksel dirence sahip bir malzeme olduğundan hatalı sonuçlar elde etmeye neden olabilir. Doğru olan polarizasyon direnci, ölçülen polarizasyon direnci ile betonun elektriksel direnci arasındaki farktır ($R_p = R_{p,ölçülen} - R_{beton}$). Beton direnci ayrıca kendi başına ölçülebildiği gibi yeni model potensiyostatlarda bulunan **akım kesme** tekniği sayesinde belirlenebildiği için oluşturduğu sorun ortadan kaldırılabilir. Beton direncinin önemsenmemesi halinde olduğundan daha düşük korozyon hızları elde edilir (Doğan, 2008).

2.5.2.1.4. Potansiyostatik/galvanostatik yöntemler

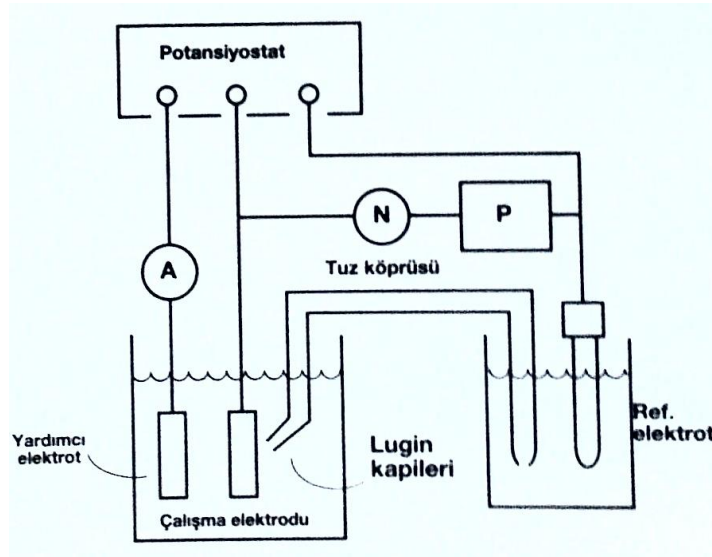
Elektrokimyasal tekniklerin ve modern cihazların gelişmesiyle birlikte korozyon hızı tayininde lineer polarizasyon direnci yöntemi önem kazanmıştır. Bu deney galvanostatik veya potansiyostatik olmak üzere iki yöntem ile yapılmaktadır. Galvanostatik yöntemde, uygulanan akım yoğunluğu sabit tutularak potansiyel düzgün aralıklarla değiştirilir. Potansiyometrik yöntemde ise, elektrot potansiyeli bir potansiyostat yardımı ile sabit tutularak bu potansiyele karşılık gelen uygulanan akım yoğunlukları ölçülür. Korozyon oluşumu, ilkinde ani potansiyel azalmaları ile, ikincisinde ise ani artan akım kayıtları sayesinde belirlenir (Yalçın ve Koç, 2004, Doğan, 2008).

Her iki yöntem de, korozyon potansiyelinin en az 100 mV üzerine çıkıldığından numuneye hasar verir ve genellikle kimyasal katkılarla inhibitörlerin donatı korozyonuna etkisini incelemek amacıyla uygulanırlar.

Potansiyostatik uygulamalarda negatif yüklü klor iyonları anot olan donatıya doğru hareket ettiğinden klorun betona girişini hızlandırdığı gibi yüksek beton direnci gerçek potansiyel değerlerinden önemli miktarda farklı potansiyel okumalarına neden olabilir. ASTM C 1202-97 veya AASHTO T 277-89 numaralı standartlarda anlatılan hızlandırılmış klor geçirimsizliği deneylerinden elde edilen toplam geçen akım miktarı değerleri, betonun klor geçirimsizliği ile ilişkilidir (Doğan, 2008). Aşağıdaki şekillerde görüleceği üzere Şekil 2.18’de eski tip, Şekil 2.19’da yeni tip diye nitelendirebileceğimiz Potansiyostatik polarizasyon incelemelerinde kullanılan deney düzenekleri mevcuttur. Yalçın ve Koç (2004), ortaya koyduğu Şekil 2.19’daki deney düzeneği, Şekil 2.18’dekine benzer yapıda olup üç elektrotlu sisteme dayanmaktadır.



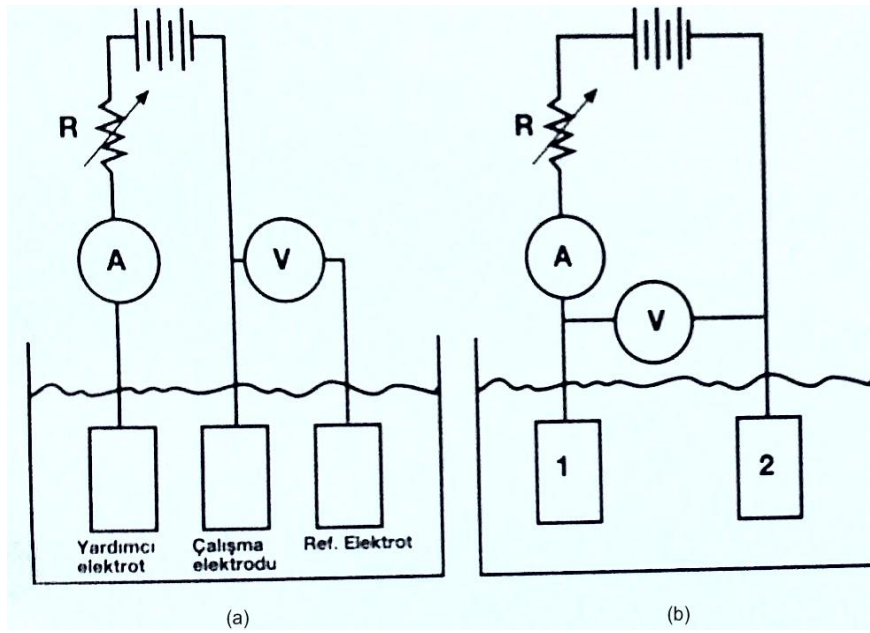
Şekil 2.17. Potansiyostatik polarizasyon incelemelerinde kullanılan eski tip deney düzeneği (Keleştemur, 2002)



Şekil 2.18. Potansiyostat cihazı yardımıyla potansiyostatik polarizasyon incelemelerinde kullanılan deney düzeneği (Yalçın ve Koç, 2004)

Galvanostatik yöntem biri üç elektrot, diğeri iki elektrot yöntemi olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Üç elektrot yönteminde biri çalışma elektrodu, biri yardımcı elektrot ve biri de referans elektrot olmak üzere üç elektrot bulunur. İncelenmekte olan elektroda inert bir yardımcı elektrot ile anodik veya katodik yönde sabit bir dış akım uygulanır. Bu akım altında belli bir süre beklenerek elektrot potansiyeli referans elektroda karşı ölçülür. Daha sonra değişken bir reosta ile uygulanan akım yoğunluğu değiştirilerek elektrot potansiyeli yeniden ölçülür (Şekil 2.20-a.). İki elektrot yönteminde birbirlerinin aynı olan iki çalışma elektrodu kullanılır. Bu yöntemde referans elektrot bulunmaz (Şekil 2.20-b.). Galvanostatik yöntem ile deney şöyle yapılır: Başlangıçta, devreye hiç akım uygulanmadan önce

iki elektrot arasındaki korozyon potansiyelleri farkı okunur. Daha sonra anodik veya katodik yönde bir dış akım uygulayarak her iki elektrot arasındaki potansiyel farkı yeniden ölçülür. Bu işleme $\pm 20\text{mV}$ potansiyel farkı elde edilinceye kadar dış akım yoğunluğu artırılarak devam edilir. Böylece lineer polarizasyon bölgesi için ($E - i$) eğrisi elde edilebilir. Lineer bölge dışında anodik ve katodik polarizasyon eğrilerinin simetrikliği bozulacağı için bu yöntemin kullanılması uygun olmaz (Yalçın ve Koç, 2004).



Şekil 2.19. Galvanostatik yöntemle polarizasyon ölçümleri (a) Üç elektrot yöntemi, (b) İki elektrot yöntemi (Yalçın ve Koç, 2004)

İnhibitör etkinliği veya katkıların korozifliği belirlenmek istendiğinde kullanılacak çimentonun C_3A miktarı(klor bağlama özelliğinden dolayı) %5'ten az olmalıdır. Bir başka yöntemde içerisine donatı yerleştirilen küçük silindir harç numuneler 3 gün kalıpta, 1 gün kireçli suda kür edildikten sonra ya $+100\text{ mV}$ (SCE) (inhibitör değerlendirmesi için), ya da $+200\text{ mV}$ (SCE)'ta 24 saat polarize edilir. Korozif olmayan bir katkıda ortalama akım yoğunluğu $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den küçük olması gerekirken anodik korozyon inhibitörü kullanıldığında verim %90'dan büyük olmalıdır (Verim = $[1 - I_{\text{inhibitör}}/I_{\text{kontrol}}]$) (Doğan; 2008).

2.5.2.2. Ağırlık kaybı yöntemleri (gravimetrik yöntemler)

Korozyon hızını ölçmek üzere kullanılan en eski yöntem ağırlık kaybı yöntemidir. Bu yöntem, tahribatlı yöntemlere dâhildir ve test edilecek betonun ilk ağırlığı ile korozyona uğradıktan sonraki ağırlık farkının belirlenmesine dayanır (gravimetrik kayıp). Korozif ortamda belli bir süre bekletilen metalin birim yüzey alanı başına birim zamandaki kütle kaybı ölçülür. Ağırlık farkının deney süresine oranı korozyon hızını verir (Keleştemur, 2002; Yamaç, 2010).

İncelenen donatıda korozyonun oluşturduğu kesit kaybını araştırmak için ağırlık kaybından yararlanılarak penetrasyon derinliği belirlenebilir. Bunun için korozif ortamda bekletilen metal numunenin, belirli süre sonunda, yüzeyinde meydana gelen malzeme kaybı bulunarak malzemenin ortalama yıllık penetrasyon hızı (2.17) denklemi ile hesaplanır. Bu ifadede P , cm/yıl olarak penetrasyon hızını; W_K metalin korozyonla ağırlık kaybını (gr); S , korozyonun olduğu yüzeyi (cm^2); t , deney süresini (saat); Δ ise metalin yoğunluğunu göstermektedir (Boğa, 2005; Elyiğit, 2011).

$$P = \frac{W_K}{\Delta \cdot S \cdot t} \times 24 \times 365 \quad (2.17)$$

Korozyon nedeni ile birim zamanda, metal yüzeyinden taşınan tabakanın kalınlığını ifade eden ve literatürde korozyon hızı olarak tanımlanan (2.18) denklemi, mpy (mil/yıl: $25.4\mu/\text{yıl}$) cinsinden standartlarda da yer almaktadır. Korozyon hızı, ağırlık kaybının oranı olarak (%) veya yüzeyden ağırlık kaybı olarak (mg/cm^2) ya da ortalama kesit kaybı (mikron) olarak ifade edilmektedir. Ancak literatürde hem zamanı hem de yüzeyi dikkate alan ve en sık kullanılan ifade mpy'dir.

$$K.H.(mpy) = \frac{3.45 \times 10^6 W_K}{\Delta \cdot S \cdot t} \quad (2.18)$$

Korozyon nedeni ile oluşan ağırlık kaybı, pas tabakasının Clarke Çözeltisi olarak bilinen kimyasal sıvı (1000 mL HCl, 24 gr Sb_2O_3 ve 71.3 gr $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile temizlenmesinden sonra belirlenir. Bazı çalışmalarda 300 gün süre ile farklı konsantrasyonlarda Cl^- içeren çözeltilerde bekletilen harç içindeki donatıların ağırlık

kaybının çok küçük düzeyde olduğu belirtilmiştir (Yüzer, 2003). Ancak Andrade vd. (1993), donatı kesitindeki çok küçük kayıpların betonun çatlamasına neden olabileceğini göstermişlerdir (Boğa, 2005; Elyiğit, 2011).

Bu yöntemin basitlik ve uygulamadaki bazı kolaylıklarına karşın deney sürelerinin uzun olması, çok daha fazla korozif ortam gerektirmesi, özellikle korozyon hızının çok düşük olduğu hallerde ve korozyon hızının üniform dağılım göstermediğı hallerde güvenilir sonuç vermediğı için korozyon ölçümlerinde elektrokimyasal tekniklerin daha uygun olacağı sonucuna varılabilir (Keleştemur, 2002; Boğa, 2005; Elyiğit, 2011).

2.6. Kaynak Taraması

Endüstriyel bazı atıkların ve doğal minerallerin çimento içerisine puzolan olarak kullanılabileceğine dair bulgular yer almaktadır. Bütün bunların yanında, tuğla ve kiremitlerin öğütülmesiyle elde edilen ince taneli malzeme puzolanik malzeme olarak yaygın kullanım alanına sahiptir. ABD’de, Brezilya’da ve Hindistan’da birçok baraj inşaatında bu puzolanlar kullanılmıştır (Erdoğan, 2003). Aşağıda da tuğla endüstrisinde açığa çıkan tozların beton içerisinde değerlendirilebileceğine dair bazı çalışmalar da mevcuttur.

Kırgız (2007), mermer ve tuğla endüstrisi atıklarının çimento üretiminde mineralojik katkı olarak kullanımını incelemiştir. Çalışmasında mermer tozu, tuğla tozu, CEM I 42.5 çimentosu, klinker, su ve CEN standart kumu malzemelerini kullanmıştır. Mermer veya tuğla tozunun %6, 20, 21 ve 35 oranlarında çimento yerine ikamesiyle, ikameli çimento örnekleri ve klinkere bu oranlarda katılmasıyla katkılı çimento örnekleri üretmiştir. Mermer ve tuğla tozu eklenmeden, sadece CEM I 42.5 N çimentosu kullanılarak referans numuneleri oluşturmuştur. Bütün olarak ele alacak olursak; ikameli, katkılı ve referans çimento hamuru, akabinde harç örnekleri hazırlamıştır. Kullandığı çimento ve oluşturduğu çimento hamuru örneklerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra devamında 7, 28 ve 90. günlük sürelerde kürlenmiş numuneler üzerinde fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini belirlemiştir. Elde ettiği sonuçlar; mermer tozuna göre, tuğla tozunun çimento

içerisinde ikame veya klinkerde katkı olabilecek, daha uygun mineralojik özellikleri taşıdığı görmüştür. Oluşturulan numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasında, çoklu doğrusal regresyon analizinde, güçlü bir ilişki olduğunu ortaya çıkarmıştır. Mermer tozunun %6, tuğla tozunun ise %20 katkı ile en iyi sonuçları verdiği ancak tuğla tozunun %35 oranına kadar çimentoda mineralojik katkı olarak kullanılabileceği yönünde tespitler yapmıştır.

Çiftçi (2004), Samsun-Kavak yöresi tuğla ununun, çimento harcı içerisinde, puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla; tuğla ununun, doğrudan çimento içerisine, ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında ikamesiyle numuneler oluşturmuştur. Hazırlanan ikameli çimento örneklerinin, TS EN 196-1 standartlarına bağlı kalarak fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemiştir. Devamında, 40x40x160mm boyutlarında referans ve ikameli çimento harcı örneklerini oluşturarak 7, 28, 90 ve 180. gün sonundaki kürlenmiş numuneler üzerinde, mekanik özelliklerine ait değerleri tespit etmiştir. Çalışma sonunda; tuğla unu katkısının, çimento-su miktarını, priz başlangıç ve bitiş sürelerini artırdığı sonucuna varmıştır. Mekanik özelliklerinden olan eğilme ve basınç dayanımı değerlerinin, referans örneklerine göre, en iyi sonucu %10 karışım grubunun verdiğini belirlemiştir. Normal değerlere göre bu gruptaki artışın yaklaşık %5 oranında olduğunu tespit etmiştir. Tuğla ununun, beton içerisinde kullanılarak betonun özelliklerine etkisini ve sıva harcında kullanılabilirliği yönünden, bu çalışmanın faydalı olduğunu düşünmektedir.

Gerçek beton örnekleri üzerinde yapılan çalışmalarda genellikle klorür iyonu konsantrasyonlarında beton içindeki çeliğin korozyon hızı belirlenmiş ve klorür iyonlarının korozyona neden olan minimum sınır değeri tayin edilmiştir. Bunun yanı sıra betonun permeabilitesi (geçirgenliği), porozitesi, mukavemeti, rutubet yüzdesi ve elektriksel iletkenliği gibi fiziksel özellikleri ile çimento cinsi ve dozajı, su/çimento oranı, beton katkı maddeleri ve inhibitörlerin korozyon üzerine etkileri araştırılmıştır (Keleştemur, 2002).

Jang ve Iwasaki (1991), klorür iyonlarının betonarme demirleri üzerindeki korozyon oluşturma etkisini gerçek beton ortamlarında inceleyerek bunu da, beton kırıklarıyla beraber doygun olacak miktarda su kullanarak oluşturmuştur. Galvanik akım

yöntemini ilk defa kullanarak, 120 gün süreyle ölçümler yapmıştır. Araştırmacılar çalışma sonunda, klorür iyonu arttıkça korozyon hızının arttığı sonucuna varmışlardır.

Zhang ve Lounis (2006), yaptıkları bu çalışmada, betonarme elemanlar içerisinde bulunan çeliğin klorürlü ortamlar göz önüne alınarak, korozyon olayını başlatmasını araştırmışlardır. Bu amaçla, beton harcının içindeki klorür iyonu difüzyonunu, betonarme çeliği yüzeyinde klorür iyonun başlangıç seviyesini, beton kaplamanın dip kısımları ve metal yüzeyi klorür iyonu derişimi gibi dört farklı parametredeki değişimi, analitik diferansiyel teknikler uygulayarak yorumlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, korozyon başlama zamanları yüzeydeki klorür iyonu konsantrasyonuna karşı oldukça duyarlı olduğu ve beton kaplamanın dibindeki klorür başlangıç seviyesine ve klorür iyonu difüzyon katsayısına bağlı olarak da bu niceliğin değişim gösterdiği belirlenmiştir.

Yılmaz vd. (2003), betonarme örneklerini farklı sülfat iyonu içeren karıştırma suyuyla (standart, 400 ppm ve 3500 ppm) hazırlanmış ve saf ya da karıştırma suyu ile aynı suda, iki farklı pH'da kür uygulamışlardır. Bu amaçla sülfat iyonlarının ve pH'ın, beton dayanımına ve özellikle betonarme çeliğine etkilerini; galvanik akım değişimlerini ve potansiyellerini ölçerek araştırmışlardır. Sonuç olarak; sülfat iyonunun konsantrasyonu arttıkça betonların basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmişlerdir. Yüksek sülfat iyonu içeren koşullarda, betonarme demirinde korozyon gözlemişlerdir. Beton içindeki porlarda dışarıya difüzlenen sülfat dış çözelti ile beton içerisindeki konsantrasyon seviyesine bağlı olarak gerçekleştiğini anlamışlardır. Temas suyu saf olduğunda demir donatının potansiyelleri daha pozitif değerlere ulaştığını gözlemlemişlerdir.

Morris vd. (2004), yapılan çalışmada elektrokimyasal ölçümler sonucu elde ettikleri verileri matematiksel olarak karşılaştırarak bir yargıya varmaya çalışmışlardır. Korozyon potansiyeli, akım yoğunluğu, beton direnci ve klorür konsantrasyonu parametrelerini deney sonunda bularak, korozyon oluşumunda önemli olan klorür eşik konsantrasyonunu belirlemeye çalışmışlardır. Buldukları matematiksel ilişki de; aktif korozyon bölgesinin $E_{cor} < -0.35V$ (CSE) veya $i_{cor} > 0.2 \mu A/cm^2$ olduğunu ve pasif bölgede ise korozyon potansiyeli $> -0.2V$ (SCE) veya $i_{cor} = 0.1 \mu A/cm^2$

olduğu bölgeyi saptamışlardır. Sonuç olarak; $CITH = 0.019 \rho + 0.401$ (CITH: klorür konsantrasyonu eşik değeri ve ρ : direnç $k\Omega cm$) matematiksel bir ilişki gözlemlenmiştir.

Ülger ve Kılıççeker (2006), yapmış oldukları çalışmada glikozu, beton harçları içerisine katarak betonarme donatısı üzerindeki etkisini, 25 °C sıcaklığındaki ortamda araştırmışlardır. Ürettikleri beton numunelerinin su/çimento oranlarını 0.45 olarak seçmişler ve bu örneklerin polarizasyon dirençlerini beraberinde akım potansiyel eğrilerini bularak birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda, glikoz iyonunun betonarme çeliği üzerinde zayıf bir koruma yaparak korozyonu azda olsa önleyici bir etki yaptığını görmüşlerdir.

Dehghanian ve Locke (1982), beton içine klorür difüzyonu sonucu kullanılan çelikte oluşan korozyon olayını araştırmışlardır. Numuneleri oluştururken TipI ve TipV portland çimentolarını sade halde kullanarak, karışım harçları içerisine NaCl eklemeden oluşturmuşlardır. 28 gün süreyle kür havuzunda bekletildikten sonra %0.1 ve %2 aralığında değişen farklı NaCl içeren tuz çözeltili havuzlara daldırılmışlardır. M_0/M_0O_3 referans elektrotunu kullanarak, polarizasyon (direnç) yöntemiyle betonarme çeliğinin korozyonunu incelemişlerdir. Çalışma sonunda, hazırlanan her iki beton tipinde de, tuz oranı yüksek olan çözeltiye maruz bırakılanların korozyon potansiyeli yüksek bulmuşlardır. Çözeltiye temas süresi arttıkça, beton içine giren klorür iyonu fazla olduğundan korozyon olayının arttığını görmüşlerdir. TipI beton örneğinin korozyon potansiyeli, TipV'e göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

Wheat ve Eliezer (1985), beton içine gömülü olan çeliğin korozyon potansiyellerini (Ecor) zamana göre değişimini araştırmışlardır. Araştırmacılar bu deneyi yaparken, potansiyostatik ve potansiyodinamik yöntemler kullanarak betonarme çelikleri üzerinde üç ayrı tipte deney yapmışlardır. Deneylerde üretilen beton numuneler %10 NaCl çözeltisi içine konularak polarize edilmeleri sağlanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre, korozyon potansiyelinin pozitifliği çeliğin pasif durumda oluşunu, negatifliği ise çeliğin aktif durumda olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Her zaman doğru olmamakla beraber, korozyon potansiyeli > -300 mV (SCE) ise çeliğin daha pasif,

korozyon potansiyeli < -300 mV (SCE) ise çeliğin daha aktif halde olduğunu ortaya koymuşlardır.

Locke ve Siman (1980), beton içerisindeki gömülü çeliğin korozyon hızını, doymuş kireç çözeltisi içinde tayin edilmesinin bazı hatalara neden olacağını ve gerçek korozyon hızının tespit edilemeyeceği konusunu ortaya atmışlardır. Araştırmacılar, gerçek beton numuneleri üzerinde korozyon hızı deneylerini yaparken üç elektrot yöntemini kullanmışlardır. Betonu hazırlarken su/çimento oranını 0.40 olacak şekilde ve %0 ile %1 aralığında NaCl çözeltisi de katarak oluşturmuşlardır. Bu şekilde klorür iyonlarının korozyon hızına etkisini üç elektrot polarizasyon (direnc) yöntemiyle incelemişlerdir. Araştırmacılar sonuç olarak, NaCl konsantrasyonu (%0 - %1) arttıkça, korozyon hızının da 0.08 ile 5.66 mil/yıl aralığında arttığını belirtmiştir.

Yazıcı vd. (1996), yaptıkları bu çalışmada demirin korozyonunu üzerinde asetat iyonunun etkisini araştırmak için klorürlü ve klorürsüz ortamlarda incelemişlerdir. Deneyi yaparken üç elektrotlu yöntem tekniğinden faydalanarak, korozyon potansiyelleri ve polarizasyon dirençlerini belirlemiş ve bu şekilde korozyon hızlarını bulmuşlardır. Referans elektrot olarak doymuş kalomel elektrot (SCE), çalışma elektrotu olarak %99.9 saflıkta Armco demir ve yardımcı elektrot olarak da platin elektrot kullanmışlardır. Bütün bu elektrotlu çalışmaları 20 °C derecede olan ve %3.4 NaCl içeren çözeltiler içerisinde daldırılmak suretiyle yapmışlardır. Çalışma sonunda, demir çözünmesinin asetat konsantrasyonundaki ve pH'daki değişime bağlı olarak değişim gösterdiğini bulmuşlardır. Üç elektrotlu yöntemi farklı türdeki demirler için de uygulanmış ve bu demirler alınarak farklı tekniklerle de işleme tabi tutmuşlar ve hepsinde de benzer sonuçlar kaydetmişlerdir.

Kayalı ve Zhu (2005), silika fume katkılı çimentolarla üretilen, betonarme donatılı betonları, önceden hazırladıkları %2 NaCl çözeltili karışımlarda bekletmişlerdir. Silika fume çimentolu betonlar yüksek dayanımlı olduklarından klorür difüzyonlarının düşük olduğunu gözlemişlerdir. Fakat 32 Mpa basınçla preslenmiş betonlarda klor iyonu konsantrasyonunu, yüksek seviyede olduğunu görmüşlerdir. Yüksek mukavemetli betonların potansiyel değerleri daha stabil olmakta ve yaklaşık -200 mV (SCE) değerinde olduğu saptanmıştır. Dayanımı 32 MPa olan beton örneklerinin korozyon potansiyeli başlangıç değeri olan -350 mV'dan (SCE) daha

yüksek negatif bir değere doğru ilerlemekte olduğunu belirlemişlerdir. Yüksek mukavemetli betonların korozyon akımı yoğunluğu başlangıçtaki aktivasyon değerine yaklaştığı, bunun aksine 32 MPa dayanımındaki betonlarda göreceli olmakla beraber aktif değerlere sahip olduğunu görmüşlerdir. Kısaca; yüksek mukavemete sahip %10'luk silika fume katkılı betonların, korozyon dayanımlarını arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Hoşhan (1994), betonarme demirleri kullanılarak oluşturulan, klorürlü ve klorürsüz beton numuneleri üzerinde, üç elektrot yöntemini kullanmak suretiyle, korozyon hızlarını araştırmıştır. Üretilen klorürlü ve klorürsüz beton numunelerinin korozyon potansiyellerini; 1, 7, 28, 60 ve 90. gün sonundaki tafel ekstrapolasyon ve lineer polarizasyon yöntemleriyle, zamana göre değişimlerini incelemiş ve korozyon hızlarını belirlemeye çalışmıştır. Sonuçların karşılaştırması ile 90. gün sonundaki, lineer polarizasyon yönteminden faydalanılarak, klorürlü beton numunelerinde korozyon hızı $0.94 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ (0.033 mil/yıl) ve klorürsüz beton örneklerindeki ise $0.07 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ (0.44 mil/yıl) elde etmiştir. Sonuç olarak, klorürlü betonların klorürsüzlere göre 13 kat daha büyük korozyon hızının olduğunu bulmuştur.

Keleştemur (2002), yapmış olduğu çalışmada, beş ayrı ildeki fabrikalardan alınan (portland-kompoze çimentosu) PKÇ/B 32.5 R türü çimentosunun, içlerindeki kompozisyonundaki farklılıklarından dolayı korozyon hızı üzerine etkisi araştırmıştır. Numuneleri korozif bir ortam oluşturabilmek için karışım suyuna deniz suyu baz alınarak %3 oranında NaCl ilave edilmesiyle üretilen beton bloklar içerisindeki çelik üzerine gerçekleştirilmiştir. Beş grup halinde hazırlanan numunelerdeki tek farklılık oksit bileşenleri değişik olmasıdır. Her beton örneği içerisindeki donatının ASTM-C-876-91'e uygun olarak 90 gün boyunca, korozyon potansiyel değerleri ölçülerek, zamana göre potansiyel değişimlerini voltmetre cihazı ile incelemiş ve aynı numuneler üzerinde daha sonra polarizasyon-kırılma yöntemi (galvanostatik yöntemi) ile korozyon hızlarını belirlemiştir. Sonuç olarak, ölçülen elektrot potansiyel değerleri sırasıyla -0.526 V, -0.454 V, -0.474 V, -0.496 V ve -0.360 V olarak tespit etmiştir. Elektrot potansiyelleri hemen hemen hepsinde korozyon açısından aktif bölgede oldukları saptanmıştır. Asit oksit kompozisyonundaki artışa karşılık baz oksit kompozisyonundaki azalma ya da tam

tersi, numunelerin pH değerlerini düşürerek veya yükselterek ortamdaki elektrotların korozyon hızlarında artışa veya azalışa sebebiyet verdiğini görmüştür.

İsmail ve Ohtsu (2006), yaptıkları çalışmada; normal beton (OPC) ve yüksek performanslı beton (HPC) çimentolarının, betonarme çelikleri üzerindeki korozyon hızlarını araştırmışlardır. Hazırlanan OPC ve HPC çimentolu silindirler %0, 1, 3 ve 5'lik klorür konsantrasyonlarındaki çözelti içinde bekletilmiştir. Klorür çözeltisine maruz kalan betonarme numunelerin korozyon hızlarını hesaplamak için alternatif current (AC) impedans (IS) tekniğini kullanmışlardır. AC impedans spektrum değerlerini yorumlamak için AC impedansı tafel eğrileri (TP) ve lineer polarizasyon (LP) gibi elektriksel eşitliklerinden faydalanmıştır. Bu elektriksel eşitliklerle bulunan değerleri, yaygın olarak kullanılan diğer tekniklerle karşılaştırmışlardır. Çalışma sonunda, AC impedans tekniği ile hesaplanan korozyon hızı TP'ye göre %5-20 oranında daha düşük, LP'nin sonuçları %20-30 oranında daha yüksek olduğu tespit etmişlerdir. AC impedans (TP ve LP) yönteminin, diğer tekniklerle uyumlu olduğunu ve bu tekniğin, betonarme çeliğinin korozyon hızlarını hesaplamada kullanılabileceği konusunda bir sağlama araştırması yapmışlardır.

Avacı (1988), puzolanların kullanıldığı betonlarda, gömülü donatının korozyon etkilerini incelemiştir. Çalışmasında puzolanlı ve puzolansız olmak üzere beton numuneleri üretmiş ve üzerlerinde korozyon deneyleri yapmıştır. Numuneleri oluştururken çimento içerisine %20 oranında puzolan ikamesi yapılarak puzolanlı örnekler ile, sadece çimento yani puzolan katılmamış referans örnekler üretmiştir. Bu numuneleri kürlendirerek yeterli dayanımlarını sağladıktan sonra %5'lik NaCl çözeltisi içerisinde bekletmiş ve bu şekilde numunelerin korozyona olan etkilerini karşılaştırmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre, başlarda referans yani puzolan katılmamış örneklerin donatıları, puzolanlılara göre daha az korozyona uğradığı gözlemiştir. Fakat aradan 80 gün geçtikten sonra, aynı su/çimento oranına sahip puzolanlı ve puzolansız örnekler karşılaştırılmış ve puzolanlı çimentolardaki çeliğin korozyon hızları, puzolansızlara göre yarı yarıya daha az olduğu ortaya çıkmıştır. Bunu da puzolanların etkisini gösterebilmesi için belirli bir süreyi tamamları gerektiği yargısına varmıştır.

Sivaslı (2000), yaptığı çalışmasında, puzolanlı çimento kullanımının gerekliliğine işaret ederek, betonarme yapıların korozyon tehlikesi olan veya olacak bölgelerde bu tür çimentolarla hazırlanan betonların veya harçlarının kullanılması üzerinde durmuş ve önemine işaret etmiştir. Çimento içerisinde puzolan kullanılmasıyla birlikte, su katılarak harç oluşturulması, çimento klinkerlerin hidrolojisi sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit ile birleştiği ve devamında betonarmenin boşluklarında kristalleşme meydana getirdiğini, betonun permeabilitesini yani geçirgenliğini azalttığını görmüştür. Sonuç olarak, puzolanlı çimento beton bünyesinde O_2 ve Cl iyonu difüzyonunu engellediğini ve korozyonu önlediğine dair bilimsel bir açıklama getirmiştir.

Elyiğit (2011), yüzeyleri bor ile kaplanmış betonarme çeliklerinin, beton numuneler içerisindeki korozyon dayanımını incelemiştir. Bunun için, önceden temizlenip hazır hale getirilen betonarme çeliklerini, kül fırını yardımı ile katı borlama yöntemini uygulayarak kaplama işlemi yapılmıştır. Bor kaynağı olarak ticari Ekabor 2 tozu ile donatıların üzerleri kaplamıştır. CEM I 42.5 R çimentosu kullanılarak oluşturduğu betonlar içerisine bor ile kaplanmış ve kaplanmamış betonarme çeliklerini batırmak suretiyle betonarme numuneler elde etmiştir. Bu numuneleri önceden hazırlanan 0.3 mol NaCl çözeltisi içerisinde, 120 gün boyunca belirli periyotlarla takip edecek şekilde bekleterek, üç elektrotlu ölçüm tekniği ile çeliklerin elektrokimyasal korozyon parametrelerini belirlemiştir. Sonuç olarak, çeliklerin yüzeyini kaplayan borür tabakasının çok yüksek sertlik ve aşınma dirençlerine sahip hale getirmesi; çelik yüzeyindeki gözenekleri kapatmasına, su ve çeşitli kimyasalların yapıya girişini ve çeliğe difüzyonunu engelleyerek korozyonu yavaşlatıcı bir etki gösterdiği görmüştür.

Yalçın (1996), beton karışımı içerisine değişik oranlarda kolemanit katılmasıyla oluşturulan numunelerdeki, betonarme çeliklerinin korozyonunu araştırmıştır. Deney numunelerini üç grup halinde oluşturarak incelemiştir. Birinci grup beton numuneleri içine çimento ağırlığının %0.25, 0.50, 1, 2, 5 ve 10'u oranında kolemanit katılmıştır. İkinci grup beton numuneleri içine de aynı oranlarda kolemanit katılmış ve ayrıca 6 kg Cl^-/m^3 olacak şekilde sodyum klorür beton karışım suyu ile birlikte beton içine karıştırmıştır. Üçüncü grupta ise, birinci gruba benzer şekilde hazırlanmış sertleşmiş beton numunelerini %3'lük orana sahip NaCl çözeltisi içerisine konularak, klorür

difüzyonunun belirlenmesi amaçlamıştır. ASTM C-876-91 standardına uygun olarak her üç gruptaki numuneler üzerine galvanik akım yöntemi ile periyodik olarak ölçmüştür. Yapılan deneyler sonunda, %0.5'den daha az kolemanit katkısının betonarme demirlerinin korozyonu üzerine inhibitif etki göstermediği, %2'den daha fazla kolemanit katkısının ise, çimentonun fiziksel özellikleri üzerine bozucu etki yaptığı, en uygun kolemanit katkısının %1 olduğunu gözlemlemiştir.

Üncü (2006), boya sanayinde katkı maddesi olarak kullanılan kolofonun, betonarme çeliği korozyonu üzerindeki etkilerini, üç elektrotlu yöntemi kullanarak araştırmıştır. Çalışmada kullanılacak numunelerde, PÇ 42.5 çimentosuna ağırlıkça %0.5, 1 ve 1.5 oranlarında kolofon eklenerek kolofon katkılı betonlardan, referans örneği de dahil olmak üzere üçer adet üretmiştir. Üretilen numuneler %3'lük NaCl çözeltisi ortamlarda bekletilerek beton içindeki çelik elektrotun korozyon davranışlarını incelemiştir. Beton kaplama içinde olmayan çelik elektrotların da farklı pH'larda, kolofonlu ve kolofonsuz sulu ortamlardaki korozyon davranışları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, birbirleriyle ve yüzey görüntüleri ile beraber değerlendirmiştir. Beton numuneler içindeki çeliklerin korozyonu, ADP (açık devre potansiyeli), $E_{i=0}$ (korozyon potansiyelleri), EIS (elektrokimyasal empedans spektroskopisi), kronoamperometri, kronoklonometri ve dönüşümlü voltametri teknikleri kullanılarak 71 gün boyunca belirli periyotlarda takip etmiştir. Deney sonunda, kolofonun yapışkan özelliği ile betonun gözeneklerini kapatmasından dolayı su ve çeşitli kimyasalların yapıya girişini ve çeliğe difüzyonunu engelleyerek korozyonu yavaşlatıcı bir etki gösterdiğini ve devamında, kolofonun yüzey oksit filminin çözünmesini hızlandırarak, beton içerisindeki çeliğin korozyonunu artırma eğiliminde olduğu da belirlemiştir.

Yüzer (1998), yapmış olduğu çalışmada çimento içerisinde silis dumanını, puzolan olarak kullanmış ve klorür difüzyonuna maruz betonarme elemanların performansını artırdığını tespit etmiştir. Klorür iyonlarının betona üretim aşamasında karışması durumunda ise donatı korozyonunu hızlandığını belirleyerek, ancak beton sertleştikten sonraki klor difüzyonuna karşı puzolanın etkili olabileceğini söylemiştir. Donatı korozyonu hızlandırılan numunelerin aderans dayanımında önemli kayıplar olduğunu ve bu numuneler yerine puzolanın kullanılmasıyla bu sorunun engellenebileceğini belirtmiştir.

Yiğiter (2008) ve Öntürk (2011), ayrı olarak yaptıkları çalışmalarda beton içerisindeki alkalitenin azalması, atmosferde bulunan karbondioksitin kapiler boşluklara girerek betonun bünyesinde bulunan Ca(OH)_2 ile birleşmesi sonucu CaCO_3 meydana gelmektedir. Karbonatlaşma adı verilen bu reaksiyona sonucunda, başlangıçta 12-13 olan alkali ortamın pH derecesi, 9.5'in altına inmekte ve paslanma olayı başlamaktadır. Karbonatlaşma olayı donatı korozyonunun önemli sebeplerinden biri olduğu için, yapılarda inceleme yapılırken bu olay da detaylı olarak araştırılmalıdır. Karbonatlaşma cephesinin paspayını aşır donatıya ulaşması halinde, kararlı hali bozulan çelik korozyon eğiliminde olduğu görüşlerine varmışlardır.

Aköz ve Yüzer (1998), yaptıkları çalışmalarında silis dumanı katkılı betonun normal betonlara göre, klorür geçirimsizliğini azaltıp son derece düşük olduğu, elektriksel direnci çok yüksek olduğunu ve elemanın dayanıklılığını artırdığını tespit etmişlerdir. Normal betonlarda klorür difüzyonuna maruz betonlarda, beton içinden geçen akım miktarı daha yüksek değerler almış, silis dumanı katkılı betonlar, yaklaşık kuru betonun gösterdiği direnci göstermiştir.

Keleştemur ve Yıldız (2005), beton karışım suyuna NaCl ilave edilerek ve çimento içerisine puzolan olan silis dumanı eklenmesiyle, betonarme donatısında oluşan korozyonu incelemişlerdir. Numuneleri oluştururken, karışım suyunun %1, 2 ve 3'ü oranlarında NaCl ilave edilmiş ve klorür konsantrasyonlarına sahip bu betonlara, çimento hacminin %10'u oranında silis dumanı katılarak betonarme çeliğinin korozyonunda meydana gelen değişimi galvanik akım ölçülmek suretiyle incelemişlerdir. Sonuç olarak, NaCl oranındaki artışa bağlı olarak, beton içerisinde gömülü olan çelik elektrotun korozyon hızında artış gözlenmişler ve puzolanın ilavesiyle bu hızda ciddi bir azalma görmüşlerdir.

Değirmenci (2006), beton içerisindeki silis dumanı katkısının, kullanılan çelik üzerinde korozyon etkisini araştırmıştır. Deney numunelerini oluştururken silis dumanını, PÇ 42.5 çimentosuna ağırlıkça %5, 10 ve 15 yerine ikame edilerek kullanmıştır. Beton içindeki çeliğin korozyonunu üç elektrotlu sistem kullanarak belirlemiş ve devamında, akım potansiyel gürültü ölçüm teknikleri, betonarme çeliği korozyonu için uyarlanmış, ayrıca tahribatlı ve tahribatsız ölçüm yöntemleri ile

yaşlandırma yapılarak betonarme çeliği korozyonu farklı yöntemlerle de belirlemeye çalışmıştır. Sonuç olarak, silis dumanının poroziteyi azaltarak çevredeki çeşitli koroziif maddelerin çelik yüzeyine difüzyon hızını kısıtlamasına rağmen, çelik yüzeyinde kendisinin temas ettiği bölgelerde korozyon direncini düşürerek, özellikle lokalize korozyonu hızlandırıldığını tespit etmiştir. Betonarme çeliği korozyonu üzerinde, silis dumanı katkısının, birbirine zıt iki farklı etki yaptığını görmüştür.

Boğa (2005), uçucu külün katkı olarak kullanıldığı betonarme örneklerini, korozyon dayanımları bakımından araştırmıştır. Bu amaçla, CEM II/B 32.5 R, CEM I 42.5 R ve CEM I 52.5 N çimentoları kullanılarak ve bu çimentoları da 300 ve 375 dozajlarında kullanarak katkısız ve % 10 ve 20 oranında uçucu kül katkılı olmak üzere beton karışımları hazırlamıştır. Ayrıca numunelere 28 ve 180 gün olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. Böylece toplam 36 farklı seri üretim yapmıştır. Başlangıçta, donatısız üretilen beton numuneleri üzerinde mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemiş sonrasında, donatılı beton numuneleri üzerinde hızlandırılmış korozyon deneyleri yapılarak betonlarda hasar oluşum süreleri belirlemeye çalışmıştır. Hızlandırılmış korozyon deneyi yaparken, doğru akım kapasiteli bir güç kaynağı, içerisinde %4 konsantrasyonlu NaCl çözeltisi ve iki adet paslanmaz çelik plaka bulunan bir plastik kap ve deney numunesinden oluşan bir düzenek oluşturmuştur. Sonuç olarak, Kullanılan uçucu külün artmasıyla hasar oluşum sürelerinin arttığı görmüştür. Ayrıca dozaj miktarının artmasıyla da hasar oluşum süreleri artmıştır. Korozyon sonucu hasara uğrayan numunelerde aderansın çok büyük oranlarda azaldığı, genleşmelerin ve çatlamlar oluştuğunu gözlemlemiştir.

Haberal (2010), uçucu küllü betonlarda, klor iyonu geçirgenliğinin donatı korozyonuna etkisini incelemiştir. Puzolan olarak kullanılan uçucu külün, CEM I 42.5 R çimento yerine %15, 30 ve 45 oranlarında kullanılmak suretiyle % 0.8 kg katkılı olmak üzere beton karışımları hazırlamıştır. Sertleşmiş numunelere 28 ve 56 günlük olmak üzere dış ortam koşullarında ve suda bekletilmek üzere iki farklı kür uygulamıştır. Uçucu kül kullanımının basınç dayanımı düşürdüğü, klor iyon geçirimliliğini azalttığı görülmüştür. Hazırlanan betonlara güç kaynağından elektrik verilerek hızlandırılmış korozyon deneyi uygulamıştır. Uçucu külün artmasıyla da hasar oluşum sürelerinin arttığı görülmüş ve korozyona karşı dayanıklılık açısından oldukça yararlı olduğu sonucuna varmıştır.

Türkmen ve Gavgalı (2003), farklı puzolanların (silis dumanı ve yüksek fırın cürufu) portland çimentosu yerine belirli oranlarda katılmak suretiyle betonun, hem mekanik ve fiziksel özelliklerini, hem de betonarme donatısının korozyona karşı dayanıklılığını araştırmışlardır. İçlerinde betonarme çelik donatısı gömülü numuneler oluşturarak; 28, 75, 150 ve 250 günlük korozyon akım yoğunluklarını lineer polarizasyon tekniğinden faydalananarak ölçmüşlerdir. Yapılan çalışma neticesinde, mineral katkıların basınç dayanımı, kılcallık katsayısını ve korozyon akım yoğunluğunu geliştirdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Sancak (2005), bims agregası ile üretilen taşıyıcı bimsbeton (BB) ve normal yoğun agregası ile üretilen normal betonların (NB) karşılaştırmalı olarak: 1-) betonların, içerisindeki donatıyı korozyona karşı koruma etkinliği, araştırmıştır. Bu amaçla, Silis Dumanı (SD), mineral katkı olarak %0, %5 ve %10 oranlarında çimento içerisine ikame edilere kullanmıştır. Süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı ise çimentoya %2 oranında ikame edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde, Yarı-hücre potansiyel verilerine göre, NaCl çözeltisinde, %10 SD-%2 SA'lı BB ve NB'ler en olumlu sonucu vermişlerdir.

Bütün bunların yanı sıra, Güney Afrika'da tuğla kırıkları gerek beton blok gerekse beton üretimi için agregası olarak kullanılır. Güney Afrika'da pişmiş kil atıkları hem tuğla üreticilerin de hem de kil boru imalatçılarındaki ortaya çıkar. Agregası olarak kullanılan kırık tuğla, çözünebilir tuz ya da permeabilitenin etkisiyle yapı çeliğinin korozyonunu kontrol altına alır (Kırgız, 2007). Bu literatürlerin ışığında, bu çalışmada tuğla tozlarının çimento içerisinde puzolan olarak kullanılmasıyla, betonarme demirleri üzerinde, korozyonu geciktirici bir etki gösterip göstermediği araştırılmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Deney Programı

Araştırmanın deneysel çalışma programı üç ana bölümden meydana gelmiştir:

- a) Tuğla tozunun bazı fiziksel özelliklerinin araştırılması.
- b) Tuğla tozu miktarlarının, çimento hamuru ve harçların çeşitli özelliklerine, prizmatik numuneler ile etkilerinin araştırılması.
- c) Prizmatik numunelerde miktarı uygun görülen karışımların, silindirik numunelerde donatı çeliği eklenmesi ile korozyon etkilerinin araştırılması.

3.2. Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında çimento, su ve transmisyon inşaat düz demiri kullanıldığı gibi tuğla tozu, çimento ile yer değiştirilip mineral ikame katkısı olarak; standart CEN kumu (Rilem kumu), agrega olarak; korozyon oluşturabilmek için de, %5 NaCl içeren çözelti materyal olarak kullanılmıştır.

3.2.1. Tuğla tozu

Tuğla tozu haline getirilip bu şekilde kullanılacak olan tuğla kırıkları, Manisa’da faaliyet gösteren Yüksel Toprak Sanayi ve Ticaret A.Ş. (Manisa) fabrikasının stok alanında bulunan atık konumundaki yığınının elde edilmiştir. Buradan alınan tuğla atıkları SDÜ Maden Mühendisliği Bölümünün laboratuvarındaki değirmenlerde öğütülerek istenilen boyutlara getirilmiştir. Numunelerin çok büyük boyuttaki parçaları çekiçle kırılarak Şekil 3.1-a.’da görülen uzun çeneli kırıcı cihazında kullanıma uygun hale getirilmiştir. Uzun çeneli kırıcıda ufaltılan numuneler Şekil 3.1-b.’de görülen silindirik bilyeli değirmende yaklaşık 3 saat süre ile öğütülerek toz haline getirilmiştir. Öğütülen tozlar 200 mikronluk eleklerden elenmek suretiyle, çimento harçlarında kullanabilecek boyutlara indirgenmesi sağlanmıştır (Şekil 3.2-a.-b.). Elek üstünde kalanlar tekrar bilyeli değirmende öğütülerek tüm tozların elekten geçecek boyuta gelmesi sağlanılmıştır. Tuğla tozlarına ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.1 ve 3.2’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. Tuğla tozlarının fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Değerleri
Yoğunluk (gr/cm ³)	2.79
Özgül yüzey (blaine) (cm ² /gr)	4400
Su emme oranı (%)	40.1

Çizelge 3.2. Tuğla tozlarının (Çiftci, 2004; Kırgız, 2007), CEM I 42.5 R Portland çimentosunun (Fab. tarafından verilen föye göre), CEN standart kumunun (Özkan, 2008) kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Özellikler	Tuğla Tozu (%)	Göлтаş <u>CEM I 42.5 R</u> Miktarı (%)	CEN Standart Kumunu (%)
SiO ₂	58.50	19.87	93.05
Al ₂ O ₃	16.50	4.11	3.11
Fe ₂ O ₃	8.00	3.44	0.37
CaO	3.50	63.65	0.17
MgO	0.15	1.61	0.03
SO ₃	0.00	2.68	0.07
Na ₂ O	1.00	0.12	1.10
K ₂ O	2.41	0.48	1.50
B ₂ O ₃	-	-	-
LOI (Kızdırma kaybı) (%)	11.30	2.89	0.57
Cl ⁻	-	0.008	-
TiO ₂ (%)	0.88	-	-
pH	11.20	-	-
CaO (free)			
C ₃ S		65.52	
C ₂ S		6.44	
C ₃ A		5.04	
C ₄ AF		10.47	



(a) Uzun çeneli kırıcı



(b) Bilyalı değirmen

Şekil 3.1. Tuğla atıklarının kırıldığı ve öğütüldüğü cihazlar



(a) Bilyalı değirmenden alırken



(b) 200 mikronluk elekte elerken

Şekil 3.2. Öğütülen tuğla tozlarının alınışı ve eleme işlemi

3.2.2. Çimento

Harç üretimlerinin ana malzemesi olan çimentolar, Isparta ilinde faaliyet gösteren Göltaş Çimento Fabrikasından, TS EN 197-1 standartına uygun CEM I 42.5 R Portland Çimentoları kullanılmıştır. Çimentolara ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.2 ve 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Deneyde kullanılan CEM I 42.5 R Portland çimentosunun fiziksel özellikleri (Fab. tarafından verilen föye göre)

Fiziksel Özellikler	Değerleri
Specific Gravity (Özgül ağırlık) (g/cm^3)	3.16
Specific surface area (Özgül yüzey alanı) (cm^2/g)	3440
Initial set (Priz başlama süresi) (min.)	140
Volumetric expansion (Hacimsel genleşme) (mm)	1
Comp. Str. 2days (Basınç dayanımı 2 günlük) (N/mm^2)	24.4
Comp. Str. 7days (Basınç dayanımı 7 günlük) (N/mm^2)	42.1
Comp. Str. 28days (Basınç dayanımı 28 günlük) (N/mm^2)	51.1

3.2.3. Standart CEN kumu

Çimento ile birlikte harç üretiminde, CEN standart kumu kullanılmıştır. Kullanılan kum silis kumudur, Limak Batı Çimento San. Ve Tic. A.Ş. Trakya (Pınarhisar/Kırklareli) Fabrikasından TSE EN 196-1 standardında belirtilen esaslara uygun, poşetler halinde temin edilmiştir. CEN kumları herhangi bir öğütme ve tartma işlemine gerek olmayacak şekilde, standart incelik ve ağırlıktadır. Kullanılan CEN standart kumunun yoğunluğu 2.63 gr/cm^3 'tür. Kumun kimyasal kompozisyonu ve gradasyonu Çizelge 3.2 ve 3.4'da verilmektedir.

Çizelge 3.4. CEN standart kumun gradasyonu (tane büyüklüğü dağılımı) (Fab. tarafından verilen föye göre)

Elek göz açıklığı (mm)	Standart Kalan (%)	Analiz Sonuçları Kalan (%)
2.00	0.00	0.00
1.6	7 ± 5	6.60
1.00	33 ± 5	33.94
0.50	67 ± 5	65.03
0.16	87 ± 5	85.98
0.08	99 ± 1	99.12
Rutubet	0.20	0.05

Deneyssel çalışmalarda kullanılan tuğla tozu ve CEN kumu (Rilem) kumunun özgül ağırlık ve su emme değerleri Çizelge 3.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Tuğla tozu ve CEN kumu (Rilem) kumu numunelerinin özgül ağırlık ve su emme değerleri

Numune	Kuru özgül ağırlık (ρ_{ik}) (gr/cm ³)	DKY özgül ağırlık (ρ_{id}) (gr/cm ³)	Görünen özgül ağırlık (ρ_{ig}) (gr/cm ³)	Su emme oranı (m_i) (%)
Tuğla tozu	1.89	2.16	2.59	14.25
Rilem kumu	2.53	2.57	2.63	1.51

Çizelge 3.5'te görüldüğü üzere, fabrikanın vermiş olduğu rilem kumunun yoğunluğu (2.63 gr/cm³), görünen yoğunlukla (ρ_{ig}) örtüşmektedir.

Birim hacim ağırlığı yüksek olan bir agreg a ile üretilen betonun dayanımı, dayanıklılığı ve taşıma gücü fazladır. Diğer yandan, agreg a boşlukların fazla olması agreg anın donma ve çevre etkilerine karşı dayanıklılığını azaltır (Erdoğan, 2003).

3.2.4. Karışım suyu

Çimento harçlarının deneyssel çalışmalarda karışım suyu olarak, Süleyman Demirel Üniversitesi Batı kampusüne gelen şebeke suyu kullanılmıştır. Süleyman Demirel Üniversitesi Jeotermal Enerji, Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma ve Uygulama Merkezi tarafından yapılan suyun in-situ ve hidrojeokimyasal analizleri Çizelge 3.6'te verilmiştir.

Çizelge 3.6. Kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi (SDÜ, 2012)

<u>Parametre</u>	<u>Su (Batı Kampüsü)</u> <u>değerleri</u>	<u>Parametre</u>	<u>Su (Batı Kampüsü)</u> <u>değerleri</u>
T (°C)	20.1	Mg ²⁺ (mg/l)	30.76
pH	7.25	Ca ²⁺ (mg/l)	85.90
Eh (mV)	359	NO ₃ ⁻ (mg/l)	12.11
EC (µS/cm)	640	NO ₂ ⁻ (mg/l)	<0.01
O ₂ (mg/l)	6.1	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	408.7
TDS (mg/l)	321	As (mg/l)	<0.01
Toplam Sertlik (°f)	34.2	Cl ⁻ (mg/l)	5.97
Na ⁺ (mg/l)	6.55	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	21.78
K ⁺ (mg/l)	2.42	PO ₄ (mg/l)	<0.05

3.2.5. Donatı çeliği (çalışma elektrodu)

Prizmatik örneklerden farklı olarak, korozyon deneyleri için silindirik olarak üretilen numunelerde, Ø10'luk nervürlü transmisyon yapı çelikleri kullanılmıştır. Saka Demir Çelik San. Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen düz yapı çelikleri, DIN St 37-2 (Fe 37-2) sınıfında olup, standart olarak çekme mukavemeti 370 Mpa ve uzama miktarı % 43'tür. Silindirik numunelere orta noktasından her çeperine eşit paspayı kalınlığını korunacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.28). Tüm çelik çubuklar aynı pürüzlükte tormalanmış olarak hazır şekilde alınmıştır. Bu şekilde passız olarak kullanıma uygundur. Çeliğin bir ucunda; 10 mm içeriden, 1 mm genişliğinde ve derinliğinde yiv açılmıştır (Şekil 3.3). Korozyon ölçümlerini yapabilmek için açılan bu yive yumuşak çok telli bakır kablo bağlanmıştır (Şekil 3.28). Donatı çubuğu boyanırken çok telli bakır tel ile donatı çubuğu arasında, bir elektrik akımı temassızlığı yapmaması için yive bağlanan bakır telin, oksijen kaynağıyla donatı çeliğine kaynaklanması sağlanmıştır. Daha sonra kaynak olmayan ucun Ø10'luk ön yüzü ve uçtan itibaren 10 mm'lik yanal yüzü boyanmamış, geriye kalan tarafları antipas boya ile üç kat boyanmıştır. Kullanılan yapı çeliğinin boyutları Şekil 3.3'te görülmektedir. Donatıların kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.7'da sunulmuştur.

Boyama işi bittikten sonra açıkta olan kısmın alanını:

$$A = \pi r^2 + 2\pi rh \quad (3.1)$$

Technical drawing of a rectangular plate with dimensions and labels:

- Korozyona Maruz Kalacak Alan**: Corrosion-susceptible area (indicated by a green rectangle).
- Boyanacak Alan**: Painting area (indicated by a red rectangle).
- Dimensions**:
 - Height: 10
 - Width of corrosion-susceptible area: 10
 - Length of painting area: 114
 - Length of corrosion-susceptible area: 125
 - Length of the plate: 135
 - Distance from the right edge to the end of the painting area: 10

Çizelge 3.7. Kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonu (Fab. tarafından verilen föye göre)

Bileşen	Miktarı (%)
C	0.13
Mn	0.66
Si	0.21
S	0.026
P	0.023
Cu	0.052
Fe	98.899

Bu bölümde tuğla tozu atıklarının beton harcı üretmek üzere kullanılabilirliğini araştırmak için yapılan deneysel çalışmalar sunulmaktadır. Asıl karışımları belirlemek üzere, öncelikle ön denemeler için; %0-5-10-15-20-25-30-35-40, oranlarında azaltılarak yerine tuğla tozu ikame edilmiştir. Yüzdelik sırasına göre tuğla tozu ikame örneklerinin harç kodları; TTİ0 (referans numunesi), TTİ5, TTİ10, TTİ15, TTİ20, TTİ25, TTİ30, TTİ35, TTİ40 olarak gösterilmiştir.

68

İlk aşamada, tuğla tozu ve CEN standart kumunun (rilem kumu) özgül ağırlık ve su emme oranları tayini deneyleri TS 3526 standardına uygun olacak şekilde, üçer defa tekrar edilerek yapılmıştır. Çimentonun ve tuğla tozu ikameli (TTİ) çimento karışım örneklerinin; kıvam, priz süresi ve hacim genleşme özelliklerinin belirlenmesinde TS EN 196-3 (2002) standardı esas alınmıştır. İlk aşamanın son deneyinde, yayılma tablası ile taze harç kıvamının tayini deneyi, TS EN 1015-3 standardına uygun olarak yapılmıştır.

Deneyisel çalışmanın ikinci aşamasında, ikameli çimento örneklerinde kullanılacak tuğla tozunun önceki; Kırgız (2007), Kurugöl (2010) ve Çiftci (2004) çalışmalarda verilen kimyasal özelliklerine göre puzolanik özelliğe sahip olduğu anlaşılan, TS 25 ve ASTM C 593 standartlarına uygun olarak yapılan deneylerle anlaşılmıştır. Çimento içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilirliği anlaşılan tuğla tozu atıklarının %5 – 40 arasında ikamesi ile TS EN 196-1 standardına uygun harç karışımları hazırlanmış ve prizmatik kalıplar içerisine dökülmüştür. Kalıplara dökülen numuneler TS EN 196-1 standardına uygun kür ortamında bekletilmiş ve aynı standarda bağlı kalarak dayanım tayini deneyleri yapılmıştır.

Üçüncü aşamada ise, dayanım tayini deneyleri sonucu bulunan, en ideal karışım oranlarına göre; korozyon numunelerinin üretimi ve ölçümleri araştırılmaktadır. Korozyon numunelerinin hazırlanmasında kullanılmak üzere, yeterli minimum dayanımı sağlayan, karışım oranları arasından, %0-5-15-30-40 seçilmiştir. Bu serilerin harç kodları TTİ0, TTİ5, TTİ15, TTİ30, TTİ40'tır. Korozyon numunelerinin harç karışımları; donatılı ve silindirik olacak şekilde, TS EN 196-1 standardına uygun olarak hazırlanmış ve kalıplara yerleştirilmiştir. Korozyon numuneleri TS EN 990 standardına uygun deney ortamında korozyona tabi tutulmuştur. Bu numunelerin elektrokimyasal ölçümlerini yapabilmek için PAR marka potansiyostat cihazı kullanılmıştır.

Üretilen numuneler üzerinde, yukarıda bahsedilen standartlarda önerilen deney metotları kullanılarak Çizelge 3.8'de verilen araştırma planında belirtilen örnek sayıları kullanılmıştır.

Çizelge 3. 8. Deneylere göre numune üretim sayılarını gösteren araştırma planı

Harç Karışım Kodları	TTi0	TTi5	TTi10	TTi15	TTi20	TTi25	TTi30	TTi35	TTi40
Tuğla Tozu Oranı	% 0	% 5	% 10	% 15	% 20	% 25	% 30	% 35	% 40
<i>Deneyler</i>	<i>Numune Sayıları</i>								
Standart Çimento Kıvamı	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Priz Başlama ve Sonu	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Hacim Genleşmesi	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Taze Harç Kıvamı	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>Prizmatik Numuneler</i>									
Eğilme Dayanımı	7 Gün	3	3	3	3	3	3	3	3
	28 Gün	3	3	3	3	3	3	3	3
Basınç Dayanımı	7 Gün	6	6	6	6	6	6	6	6
	28 Gün	6	6	6	6	6	6	6	6
Kılcal su emme	7 Gün	3	3	3	3	3	3	3	3
	28 Gün	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>Silindirik Numuneler</i>									
Korozyon Tayini	5	5		5			5		5
Karbonatlaşma Tayini	3	3		3			3		3

Tuğla tozunun CEM I 42.5 R Portland çimentosu ile çeşitli yüzdelerde ikame olunarak yapılan deneylerden elde edilen verilerin, aritmetik ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmış, bulgular ve tartışma bölümünde verilmiştir.

3.3.1. Özgül ağırlık ve su emme oranı tayini deneyi

Özgül ağırlık (yoğunluk) ve su emme oranı tayini deneyi, TS 3526 standardının belirtilen hususları dikkate alınarak yapılmıştır.

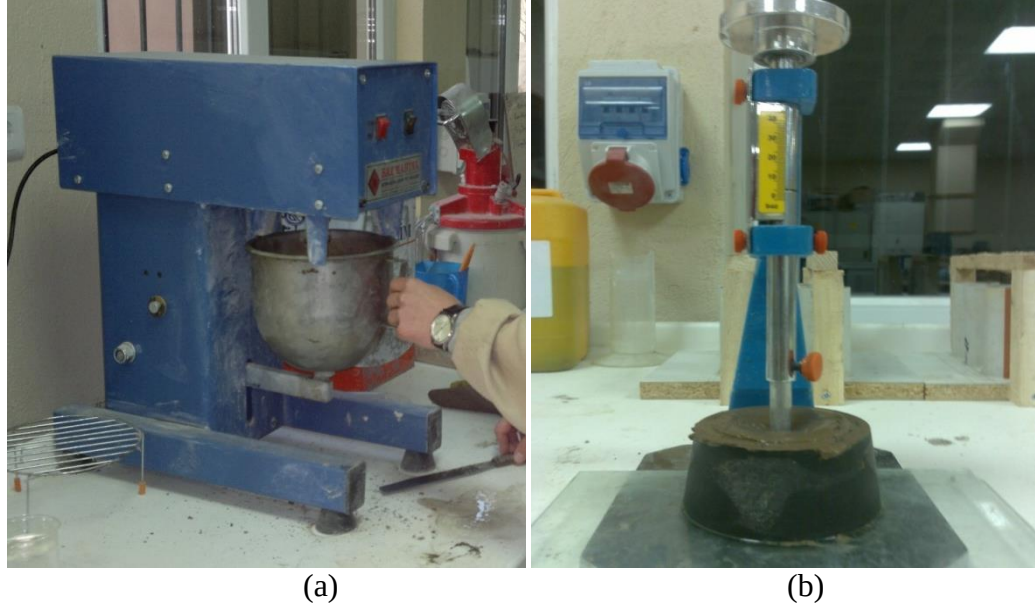
Deneyde; 105 ± 5 °C sıcaklıklara çıkabilen etüv, ± 0.1 gr hassaslıkta ve 30 kg'a kadar olan ağırlıkları ölçebilen terazi, hava üflemeli ısıtıcı, 500 ml (cm³)'lik cam bir ölçü kabı (balon joje) ve üst iç çapı 38 mm, yüksekliği 73 mm, alt iç çapı 89 mm olan kesik koni biçimli metal bir kalıp kullanılmıştır.

Deney, iki ayrı numuneden üç ayrı örnek alınıp, her örnek için tekrar edilmiştir. Deneylerin sonuçları arasındaki fark standartta belirtilen değerlerin içinde olduğu için bulunan sonuçların ortalaması alınıp numunelerin birim hacim ağırlıkları ve su emme oranı olarak kabul edilmiştir.

3.3.2. Standart kıvam tayini deneyi

Standart kıvam tayini deneyi, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Priz süresi ve genleşmesi” standardında belirtildiği gibi yapılmıştır.

Karıştırma mikseri, düşük hızda çalıştırılarak 3 dakikalık süre içerisinde, çimento hamuru hazırlanmıştır (Şekil 3.4-a.). Çimento pastasının yerleştirme işlemi bittikten sonra, göstergesi daha önceden ayarlanan vicat aletindeki sondaya, pasta merkezleştirilmiş ve pastanın üst seviyesine 1 mm kalacak şekilde sonda indirilerek pasta üzerine serbest bırakılmıştır. Serbest bırakılan vicat sondası, kendi ağırlığı ile çimento hamuru içerisine, 30 saniyedeki yavaş yavaş batması gözlenmiştir (Şekil 3.4-b.). Sondanın 30 saniye içindeki batma derinliği okundu ve cam levhaya olan uzaklığı 5-7 mm kalıncaya kadar, aynı deney tekrar edilmiştir. Mesafenin 6 ± 1 mm olduğu andaki su miktarı, kıvam için gerekli olan su olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.4. (a) Numunelerin karıştırma cihazında su ile çimento hamuru haline getirilmesi (b) Ucuna sonda takılı vicat aletiyle kıvam tespitinin yapılışı

Kıvam miktarlarından emin olmak için, kaydedilen su miktarına göre Çizelge 3.8’de gösterildiği gibi deney, iki sefer daha tekrar edilmiş ve yine belirtilen mesafede ise standart kıvam olarak tespit edilmiştir. Deney, kıvam için gerekli olan mesafeyi yakalayınca kadar, tüm ikameli veya ikamesiz çimento örnekleri için tekrar edilmiştir. Oluşturulan çimento serileri Çizelge 3.9’da açıklamasıyla birlikte verilmiştir.

Çizelge 3. 9. Çimento serilerinin yüzde ve ağırlık olarak açıklımları

Çimento Serisi	Açıklama	Karışım Oranları (gram)	
		Çimento	Tuğla Tozu
TTİ0	%0 tuğla tozu, %100 çimento (Referans-Kontrol)	500	0
TTİ5	% 5 tuğla tozu, %95 çimento	475	25
TTİ10	%10 tuğla tozu, %90 çimento	450	50
TTİ15	%15 tuğla tozu, %85 çimento	425	75
TTİ20	%20 tuğla tozu, %80 çimento	400	100
TTİ25	%25 tuğla tozu, %75 çimento	375	125
TTİ30	%30 tuğla tozu, %70 çimento	350	150
TTİ35	%35 tuğla tozu, %65 çimento	325	175
TTİ40	%40 tuğla tozu, %60 çimento	300	200

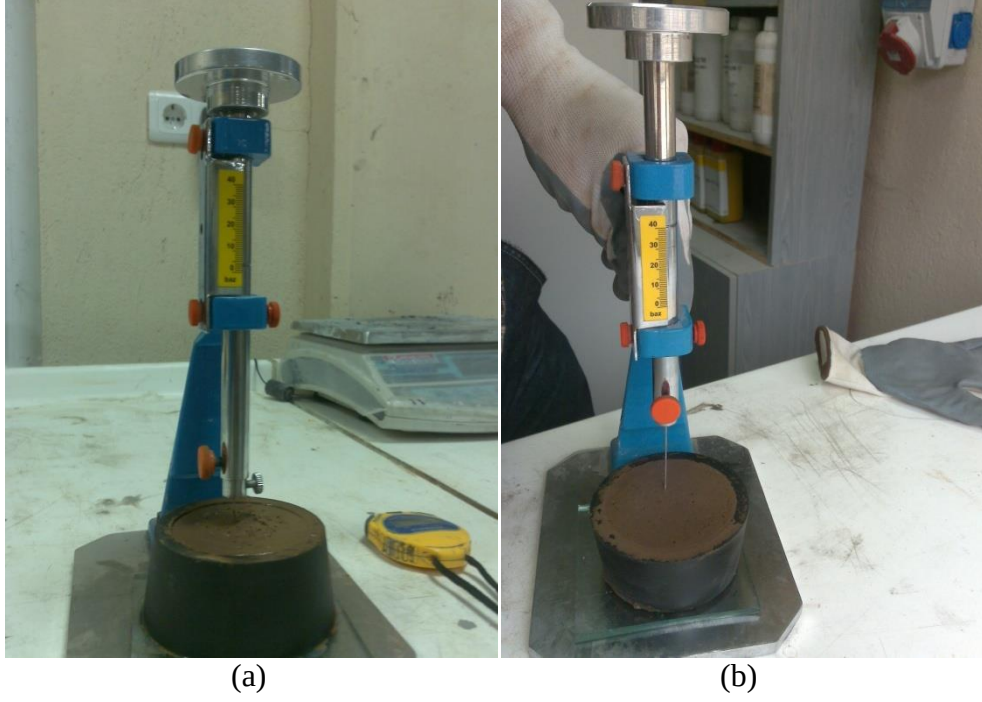
3.3.3. Priz başlama ve bitiş süresinin tayini deneyi

Priz başlama ve sona erme süreleri, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Priz süresi ve genleşmesi” standardına uygun olarak yapılmıştır.

Deneyde; hareketli parçaların (iğne ile beraber) toplam kütlesi (300 ± 1) gram olan vicat aleti, silindir şeklindeki çelikten yapılmış ve etkili uzunluğu 50 ± 1 mm ve çapı 1.13 ± 0.05 mm olan vicat iğnesi, sert lastikten yapılmış ve derinliği 40.0 ± 0.2 mm; üst iç çapı 70 ± 5 mm, alt iç çapı 80 ± 5 mm olan kesik koni şeklindeki vicat halkası, 12×12 cm boyutunda ve en az 2.5 mm kalınlığında cam levha, kademeli hız ayarlı karıştırıcı, ± 0.1 gr hassaslıkta ve 30 kg’a kadar olan ağırlıkları ölçebilen terazi kullanılmıştır.

İlkönce vicat aletine iğne takılıp, vicat halkası (kalıp) ve taban camı, ince (makine) yağ ile hafifçe yağlandı. İğne cam levha üzerine indirilip vicat aletinin göstergesi ayarlandı. Tüm ikameli ve ikamesiz çimento numunelerinden, 500’er gram tartılıp, her örnek için ayrı ayrı standart kıvam tayini deneyinde bulunan, su miktarları kullanılmıştır. Bu deneyi yaparken, kıvam deneyinde uygulanan, işlem sırası takip edilmiştir.

Karıştırma kabına, kıvam deneyinde bulunan su katıldı ve bunu takiben çimento 10 saniyeyi geçmeyecek şekilde suyun içine boşaltılmıştır. Karıştırma mikseri, düşük hızda çalıştırılarak 3 dakikalık süre içerisinde, çimento hamuru hazırlanmıştır. Burada çimento hamuruna batan iğnenin, çimento ile suyun karıştırıldığı andan, cam levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı ana kadar geçen süre, priz başlangıcını vermektedir (Şekil 3.5-a.).



Şekil 3.5. (a) Ucuna iğne takılı vicat aletiyle priz başlangıcı tespiti (b) Ucuna iğne takılı vicat aletiyle priz sonu tespiti

Priz sonu için, çimento dolu vicat kalıbı ters çevrildi ve iğnenin ilk 0.05 mm'ye kadar batabildiği süre priz sona erme süresi olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.5-b.). Bu deneyde yine Çizelge 3.8'de bağlı olarak tekrar edilmiştir. Çizelgede 3.9'da oluşturulan çimento serilerinin ağırlık olarak çimento ve tuğla tozu karışım miktarları verilmiştir.

3.3.4. Hacim genleşmesinin tayini deneyi

Hacim genleşmesi deneyi, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Priz süresi ve genleşmesi” standardına uygun olarak yapılmıştır. Çimento içerisinde bağlanmamış (serbest) kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) hidratasyonu sebebiyle, zamanla ortaya çıkabilecek, çimento hacim genleşmesine neden olabilir. Bu hacim artışı iç gerilmelere akabinde, betonda çatlamlar meydana getirebilir. Bunun gibi istenmeyen durumlar için çimentolarda hacim genleşmesi deneyi yapılarak, daha öncesinde tedbirlerinin alınması mümkün olur.

Standart kıvam deneylerinde, her numune için ayrı ayrı bulduğumuz, kıvam için gerekli su miktarı baz alınarak yapılmıştır. Süreyi kısaltmak için tekrar döküm

yapılmayarak, standart kıvam deneyi sırasında hazırlanan çimento hamuru kullanılmıştır (Şekil 3.6).



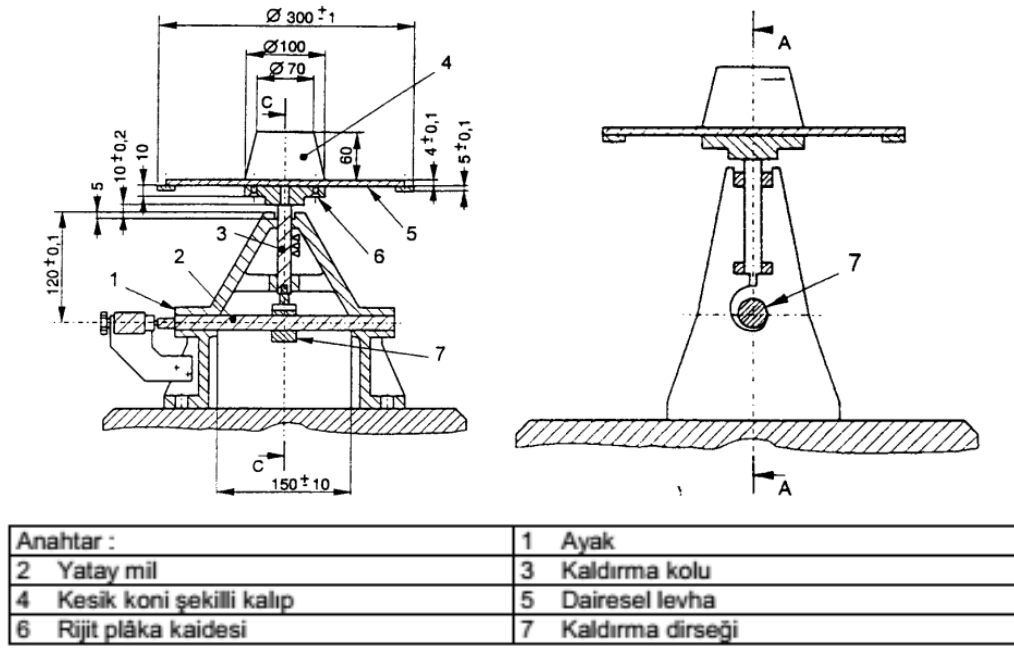
Şekil 3.6. Üstüne ilave ağırlıkları konulmuş Le Chatelier kalıpları

Deney, tüm ikameli veya ikamesiz çimento örnekleri için tekrar edildi ve aritmetik ortalaması alınarak, sonuçlar tam sayıya yuvarlatılmıştır.

3.3.5. Taze harç kıvamının tayini deneyi

Taze harçların kıvam tayini deneyi, TS EN 1015-3 “Kagir Harcı Deney Metotları – Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (Yayılma Tablası İle)” standardına uygun olarak yapılmıştır.

Deneyde; Şekil 3.7’deki niteliklere uygun yayılma tablası, pirinçten yapılmış 60 ± 0.5 mm yükseklikte, alt yüz iç çapı 100 ± 0.5 mm ve üst yüz iç çapı 70 ± 0.5 mm olan kesik koni şekilli kalıp, sıkıştırma yüzeyi yaklaşık 40 mm çaplı ve yaklaşık 200 mm uzunlukta, daire kesitli, sert, su emmez tokmak, 300 mm uzunlukta cetvel kullanılmıştır. Tuğla tozu ile çimento arasındaki uyumun belirlenebilmesi ya da harç karışımlarının, su ihtiyacı tayini için kullanılabilir. Bu deneyde, tüm taze harç karışımları için ayrı ayrı gereken su miktarlarını bularak; istenilen kıvamda ve işlenebilecek nitelikte harç karışımları elde etmek hedeflenmektedir.



Şekil 3.7. Yayılma tablasının şematik olarak gösterimi

3.3.5.1. Harcın hazırlanması

Taze harç karışımlarını oluştururken, TS EN 196-1 “Çimento deney metotları – Bölüm 1: Dayanım tayini” standardına uygun olarak taze harç karışımları hazırlanmıştır.

Deneyde; kademeli hız ayarlı çimento mikseri, ± 0.1 gr hassaslıkta ve 30 kg’a kadar olan ağırlıkları ölçebilen terazi ve kronometre kullanılmıştır.

Standartta belirtilen karışım oranları kullanılmıştır. Harcın bileşiminde kullanılan oranlar: Kütlece 1 birim çimento, 3 birim CEN standart kum ile $\frac{1}{2}$ birim su (su/çimento oranı 0.50) karıştırılması ile hazırlanmıştır. Bu değerleri ağırlık olarak ifade edecek olursak 450 gr çimento, 1350 gr standart kum, 225 gr içme suyu kullanılmış ve harç karışımları Şekil 3.8’de görülen kademeli hız ayarlı çimento mikseri cihazında yapılmıştır. Çizelge 3.10’da referans numunesinin karışımını oluşturan malzemelere ait oranlar verilmiştir.



Şekil 3.8. Rilem kumu katılarak oluşturulan taze harcın hazırlanması

Harç karışımları hazırlanmadan önce Şekil 3.9’da görülen yayılma tablasının dairesel levhası ve kesik koni şekilli kalıbın iç ve dış yüzü ve kenarları nemli bir bezle silinip kurularak ince madeni yağ ile hafifçe yağlanmıştır. Yağlama işleminden sonra kesik koni şekilli kalıbın geniş yüzü, yayılma tablasının dairesel levhasına oturtularak, tam ortasına gelecek şekilde ayarlanır.



Şekil 3.9. Taze harç kıvam deneylerinin yapıldığı yayılma tablası

TTİ0 (Referans) numunesinin harcı hazırlandıktan sonra taze harç kıvamının tayini deneyine devam edilmiştir. Doldurma işlemi iki tabaka halinde oluşturulmuştur. Her harç tabakasının farklı yerlerine tokmakla en az 10 kısa vuruş yapılarak, harç yüzeyinin düzgün şekilde dağıtılması ve sıkıştırılması sağlanmıştır.

Vakit kaybetmeden, kalıp düşey olarak, yukarı doğru yavaşça kaldırılarak alınır ve dairesel levha üzerindeki harç kütlesi, yayılma tablasının kolunu döndürmek sùretiyle yaklaşık olarak saniyede bir defa olmak üzere, sabit sıklıkla 15 defa düşürülerek levhaya yayılmıştır (Şekil 3.10). Yayılan harç kütlesinin çapı, birbirine dik doğrultuda pergel ya da cetvel yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.11). Bu iki ölçme değerinin aritmetik ortalaması hesaplanmış ve sonuçları en yakın milimetreye yuvarlatılarak verilmiştir. Her bir numunenin yayılma değerleri, toplam ortalama değerden %10'dan fazla sapma göstermeyen, en az iki numunenin ortalaması bulunarak, yayılma değerleri hesaba katılmıştır.



Şekil 3.10. Yayılma tablasında kıvam tayini deneyinin yapılışı



Şekil 3.11. Taze harç düşürüldükten sonra yayılmanın ölçülme işlemi

Deney, başlangıçta diğer numunelere yön göstermesi amacıyla referans olarak nitelendirdiğimiz TTİ0 numunesi üzerinde yapılmış ve ölçülen yayılma çapı 140 mm olarak ölçülmüştür. Devamında ikameli olan diğer TTİ5, TTİ10, TTİ15, TTİ20, TTİ25, TTİ30, TTİ35, TTİ40 kodlu harçlar üzerinde sırasıyla yapılmıştır. Çizelge 3.10'da ikame katkılı taze harçların, su hariç karışımına giren malzemeler gram olarak verilmiştir. Referans numunesinin yayılma çapı ortalaması, hedef değer olarak baz alınmış ve ikameli olan diğer numunelerin harçları oluşturulurken gerekli olan su miktarını azaltılmak ya da artırılmak sûretiyle açığa çıkan yayılma değerlerinin, baz olarak alınan harç karışımının yayılma değerine ulaşmaya çalışılmıştır. TS EN 1015-3 standardına göre oluşturulan kıvam değerlerine ulaşmaya çalışılırken her harç karışımı için gerekli olan su miktarları Çizelge 3.10'da gösterildiği üzere bulunmuştur. Kullanılan su değerlerini de harçların ihtiyaç duyduğu su miktarları denilmiştir.

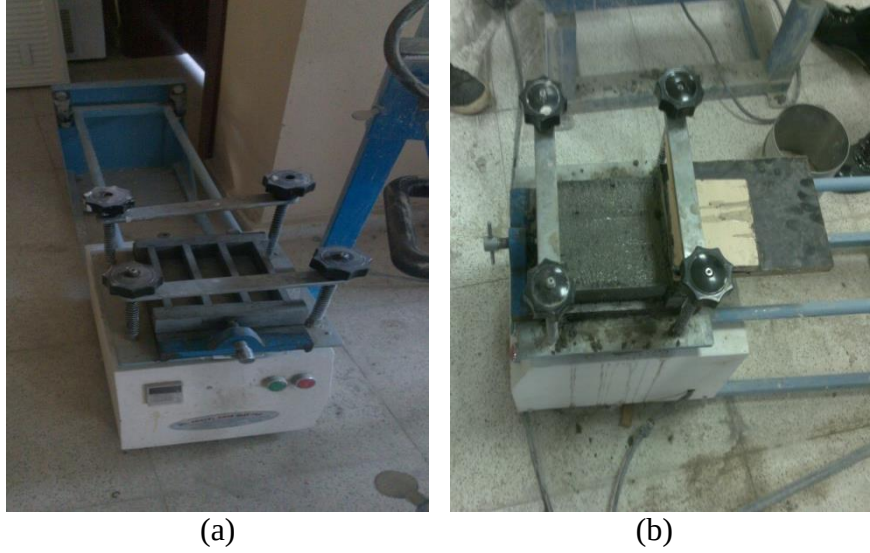
Çizelge 3.10. Referans ve ikame katkılı taze harçların, karışımına giren malzemeler

Çimento Harç Kodu	Karışım Oranları (gr)			Su/Çimento Oranı	Harç Su İhtiyacı (gr)
	Çimento (gr)	Tuğla tozu (gr)	Rilem kumu (gr)		
(Referans) TTİ0	450	0	1350	0.5	225
TTİ5	427.5	22.5	1350	0.5	225
TTİ10	405	45	1350	0.51	230
TTİ15	382.5	67.5	1350	0.51	230
TTİ20	360	90	1350	0.515	232
TTİ25	337.5	112.5	1350	0.52	234
TTİ30	315	135	1350	0.517	233
TTİ35	292.5	157.5	1350	0.522	235
TTİ40	270	180	1350	0.524	236

3.3.6. Kullanılan çimento harçların dayanım tayini deneyleri

Çimento harçlarının dayanım tayini deneyleri, TS EN 196-1 “Çimento deney metotları – Bölüm 1: Dayanım tayini” standardına uygun olarak yapılmıştır.

Deneyde; bölüm: 3.3.5.1’de harçların hazırlanması başlığı altında; kullanılan cihazlardan farklı olarak, 40x40x160 mm boyutlarında, üç gözü bulunan, çelik veya plastik harç kalıbı, tam otomatik bilgisayar kontrollü; basınç deneyi kapasitesi 250 kN (25 ton), eğilme deneyi kapasitesi 15 kN (1,5 ton) olan çimento basma ve eğilme test presi, saniyede bir vuruş yapabilen, ayarlanabilir, ışıklı göstergesi olan şok masası (sarsma tablası) kullanılmıştır. Aşağıdaki Şekil 3.12’de görüldüğü gibi şok masası ve üzerine konulmuş harç kalıbı görülmektedir.



Şekil 3.12. (a) Üzerine harç kalıpları konulmuş sarsma tablası, (b) Sarsma tablasında taze harcın sıkıştırılması

Harçların hazırlanışı, taze harç kıvamının tayini deneyi başlığı altında oluşturulan, harçların hazırlanış safhalarının aynısı uygulanmıştır. İkame katkılı çimento harçlarının hazırlanış safhasında sadece, taze harç kıvamı deneyinde bulunan harçların ihtiyaç duydukları su oranları Çizelge 3.10 kullanılmıştır. Oluşturulan harç karışımları Çizelge 3.8’de gösterildiği sayıda oluşturularak dökümleri yapılmıştır (Şekil 3.13-a.). Numuneler bu şekilde nem odasına kaldırılmış ve burada 24 saat bekletildikten sonra numuneler dikkatlice sökülüştür (Şekil 3.13-b.). Kalıplardan çıkartılan harç prizmaları, 7. ve 28. deney günlerine kadar, içerisinde $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ su bulunan Şekil 3.14’deki kür havuzunda, tüm yüzeylerine su değecek şekilde ve birbirinden ayrı olarak bekletilmiştir. Bu şekilde, prizmatik numuneler %100 nispi nem ortamında tutularak kürlenmesi sağlanmıştır.



(a) Sarsma tablasından alınan kalıplardaki taze harçlar



(b) Kalıplardan çıkarılan harç prizmaları

Şekil 3.13. Kalıplardaki taze harçlar ve çıkarılan harç prizmalarının görünüşleri



(a) Kür havuzunda bekletilen numuneler



(b) Kür havuzundaki numunelerin yakından görünüşü

Şekil 3.14. Prizmatik numunelerin kür havuzunda bakımı

Harç prizmaları, kür havuzunun içinde kırılacakları güne kadar bekletildikten sonra deneyin yapılacağı zamandan 15 dakika önce sudan çıkartılıp kurulanmıştır. 7 ve 28 günlük numuneler, ilkönce eğilme sonra basınç mukavemeti deneyleri yapılmış değerleri kaydedilmiştir.

3.3.6.1. Eğilme dayanımı tayini deneyi

Sertleşmiş prizmatik numunelerinin, eğilmede çekme mukavemeti deneyleri; TS EN 196-1 standardına ve uygun olarak tam otomatik bilgisayar kontrollü, eğilme deneyi kapasitesi 15 kN (1.5 ton) olan LCD okumalı ünitesi olan çimento basma ve eğilme test presini kullanılmıştır.

Yerleştirme işleminde numunelerin yan yüzeyleri daha pürüzsüz olduğu için bu yüzeylerin biri seçilerek, iki tane olan destek silindirler üzerine yatay olarak konulmuştur (Şekil 3.15). Burada sağ ve sol taraflardaki silindirik mesnetlerinden itibaren, dışarıda kalan numune uzunlukları eşit mesafede olmasına özen gösterilmiştir. Cihazın yükleme hızı 0.2 kN/sn olarak ayarlanmış ve diğer deneyleri de yaparken bu yükleme hızı değiştirilmemiştir (Şekil 3.16). Suda kürlenmiş numuneler, 7 ve 28 günlük süreler dolduğunda her bir harç grubundan Çizelge 3.8’de gösterildiği gibi 3’er adetleri kırılarak, sonuçların aritmetik ortalamaları eğilme dayanımı değeri olarak alınmıştır. Bu dayanım değerlerini, yukarıda bahsedilen standartta geçen, aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Denklemler 3.2).

$$R_f = 1.5 (F_f \ell / b^3) \quad (3.2)$$

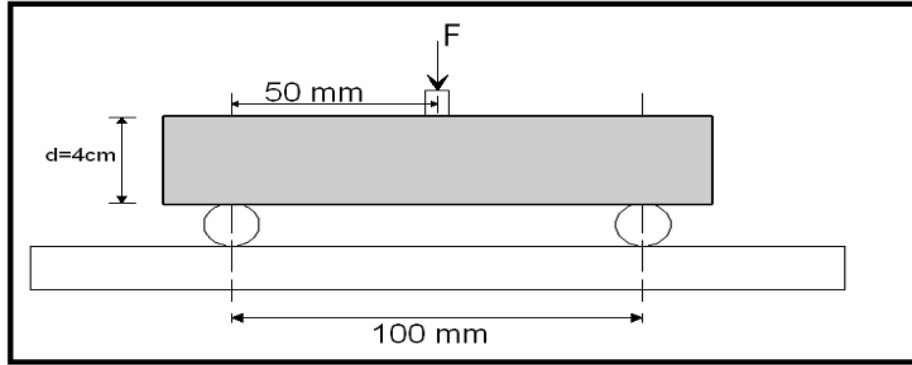
Burada;

R_f : Eğilmede çekme mukavemeti, (N/mm²)

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu, (40 mm)

F : Prizmanın ortasına uygulanan maksimum kuvvet, (Newton)

ℓ : Mesnet silindirlerin eksenleri arasındaki uzaklık, (100 mm)



Şekil 3.15. Cihazın eğilme test aparatı bölümündeki numunenin şematik gösterimi (Öntürk, 2011)



Şekil 3.16. Cihazın eğilme test aparatı bölümünde eğilme deneyi yapılmış numune

3.3.6.2. Basınç dayanımı tayini deneyi

Eğilme deneyi uygulanmış prizmatik numunelerin, ikiye ayrılan parçaları üzerinde yapılan basınç mukavemeti deneyleri; TS EN 196-1 standardına uygun olarak, eğilme dayanımı deneyinde kullanılan tam otomatik bilgisayar kontrollü basınç deneyi kapasitesi 250 kN (25 ton), olan çimento basma ve eğilme test presi kullanılmıştır.

İkiye ayrılmış olan yarım prizmalar, düzgün olan yüzeyleri, basınç uygulayan 40 x 40 mm.'lik kare plakalar arasına gelecek şekilde, cihazın basınç test aparatı bölümüne Şekil 3.17'de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Bu şekilde; basınç test aparatı, Çizelge 3.8'de gösterildiği belirtilen sayıda her yarım prizmaya, F yükü uygulayarak kırılması sağlanmıştır. Sonuçların aritmetik ortalamaları alınarak, numunelerin maksimum basınç dayanım değerleri aşağıdaki formül ile hesap edilmiştir (Denklem 3.3).

$$R_c = F_c/b^2 \quad (3.3)$$

Burada;

R_c : Basınç mukavemeti, (N/mm²)

b: Basınç plakasının kenar uzunluğu, (40 mm)

F_c : Kırılma anında uygulanan en büyük kuvvet, (Newton).



Şekil 3.17. Cihazın basınç test aparatı bölümünde basınç mukavemeti deneyi yapılırken

3.3.7. Su emme oranı, birim ağırlık, boşluk oranı ve yoğunlukların tayini deneyleri

İkameli ve ikamesiz sertleşmiş harç örneklerinin, mekanik özellikleriyle ilişkisini ortaya koymak için bazı fiziksel özelliklerini (su emme oranı, birim ağırlık, boşluk oranı ve yoğunlukları) belirlerken TS EN 12390-7 standardına uygun olarak yapılmıştır.

Deneyde; $\pm 0,1$ gr hassaslıkta ve 30 kg'a kadar olan ağırlıkları ölçebilen terazi ve Şekil 3.18-a.'de gösterilen 105 ± 5 °C sıcaklıklara çıkabilen etüv ve Şekilde 3.19-a.'de gösterilen arşimet terazisi kullanılarak yapılmıştır.



(a) Kullanılan etüv



(b) Etüvden çıkarılan ve soğuması için bekletilen numuneler

Şekil 3.18. Deneylerde kullanılan etüv ve etüvden çıkarılan numuneler

Sertleşen numunelerin laboratuvar ortamında bir süre bekletildikten sonra tartımları yapılarak tabii durumdaki numune kütlesi bulunmuştur (m_r). Numuneler, 7 ve 28 gün kalmak üzere, kür havuzuna konulmuştur. Kür işlemleri sonuçlandırılan numuneler suya doygun durumda oldukları için hemen Arşimet terazisine konularak su içerisindeki asılı kütleleri bulunmuştur (m_w) (Şekil 3.19-a.). Su içerisindeki asılı kütleler bulunurken, numunelerin su içerisindeki derinliklerinin aynı olmasına özen gösterilmiştir. Kefe boş halde, su içerisindeki derinliği aynı olacak şekilde tartılmış ve numune kefesinin su içerisinde asılı kütlesi bulunmuştur (m_{st}). Arşimet terazisinden çıkarılan numunelerin üzerleri havlu ile silinmiş ve bu şekilde, hava ortamındaki tartımları yapılarak suya doygun ve ıslak durumdaki numune kütlesi bulunmuştur (m_a) (Şekil 3.19-b.). Suyu doygun halde, yaş olan numune, yüzeyi kuru hale gelinceye kadar laboratuvar şartlarında bekletilerek yüzey ıslaklığı giderilmiş ve yüzeyi kuru, suya doygun durumdaki numunenin kütlesi bulunmuştur (m_s). Bir sonraki aşamada numuneler, 105 °C'ye ayarlı hava dolaşımli etüve konularak 24 saat bekletilmiştir. Bu şekilde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulan numuneler etüvden çıkartılarak laboratuvar ortamında tutulmuş ve oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiş ve etüv kuru kütleleri bulunmuştur (m_o).



(a) Arşimed terazisinin kefesinde asılı duran numune



(b) Terazi üzerinde tartılan numune

Şekil 3.19. Arşimed terazisinde ve normal terazide tartılan numunelerin görünümü

Numunelerin kütleleri bulunduğundan sonra, yoğunluklarını bulabilmek için her birinin hacimlerinin bulunması gerekmektedir.

Su ile yer değiştirme yoluyla tayin edilen hacim:

Su yardımıyla bulunan hacim hesaplamasında, numune suya doygun hale getirilmiş durumda iken arşimet terazisinde ve havadaki tartımlarından faydalanılmıştır. Aşağıdaki denklem yoğunluk (ρ) hesaplamalarında kullanılmıştır.

$$V_w = \frac{m_a - [(m_{st} + m_w) - m_{st}]}{\rho_w} \quad (3.4)$$

V_w : Numunenin su yardımıyla elde edilen hacmi, cm^3 ,

m_a : Numunenin suya doygun durumdaki havadaki kütlesi, gr,

m_{st} : Kefenin su içerisindeki görünür kütlesi, gr,

m_w : Suya doygun numunenin su içerisindeki görünür kütlesi, gr,

ρ_w : Suyun, 20 °C sıcaklıktaki yoğunluğu olarak kabul edilen 0.9982071 gr/cm^3 değeridir. (Bu değerin, noktadan sonra sadece ilk üç hanesi kullanılmıştır.)

Ölçümle elde edilen hacim:

Su yardımıyla bulunan hacimden farklı olarak numunelerin en, boy ve yükseklikleri kumpasla hassas olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki formül birim hacim ağırlık (Δ) hesaplamalarında kullanılmıştır.

$$V_e = a \cdot b \cdot h = V_b + V_d \quad (3.5)$$

V_e : Numunenin ölçümle elde edilen tüm hacmi, cm^3 ,

V_d : Numunenin yalnızca katı hacmi,

V_b : Numunenin boşluk hacmi,

a : Taban kesitinin tek kenar uzunluğu, cm ,

b : Taban kesitinin diğer kenar uzunluğu, cm ,

h : Prizmatik numunenin yüksekliği, cm .

3.3.7.1. Su emme oranı

Kullanılan numunelerin birim ağırlık veya hacminin emmiş olduğu su yüzdesini bulurken aşağıdaki formül kullanılmıştır.

Kütlece su emme oranı (%);

$$S_k = \frac{m_a - m_o}{m_o} \times 100 \quad (3.6)$$

Hacimce su emme oranı (%);

$$S_h = \frac{m_a - m_o}{m_a - m_w} \times 100 \quad (3.7)$$

S_k : Numunenin kütlece su emme oranı (%),

S_h : Numunenin hacimce su emme oranı (%),

m_a : Numunenin suya doymuş durumdaki havadaki ıslak kütlesi (g),

3.3.7.4. Özkütle (yoğunluk)

Düzgün şekilde olmayan numunelerin yoğunlukları, su emme deneyinde bulunan değerlerden faydalanılarak yapılmıştır.

Yığın (Bulk) yoğunluk:

Numunelerin yığılımlı birim hacminin ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır. Bu formülde verilen V_w , Denklem 3.4’de verildiği üzere, numunenin özel metodla tayin edilen hacmidir.

$$D_b = \frac{m_o}{V_w} \quad (3.10)$$

D_b : Birim hacim ağırlığı (Bulk Yoğunluk) (Yığın Yoğunluk) (gr/cm^3),

V_w : Numunenin Denklem 3.4’de tayin edilen hacmi (cm^3),

m_o : Numunenin etüvde değişmez kütleyle kadar kurutulmuş kütlesi (gr).

Doygun Kuru Yüzey Yoğunluğu:

Numunelerin, deney esnasında bulunduğu durumunun yoğunludur. Deney esnasında tüm numuneler doymuş kuru yüzey halinde olduklarından, yoğunlukları Denklem 3.11 ile bulunmuştur.

$$D_d = \frac{m_s}{V_w} \quad (3.11)$$

D_d : Numunenin suya doymuş durumdaki, yüzeyi kuru yoğunluğu (gr/cm^3),

m_s : Numunenin suya doymuş durumdaki, havadaki yüzeyi kuru kütlesi (gr),

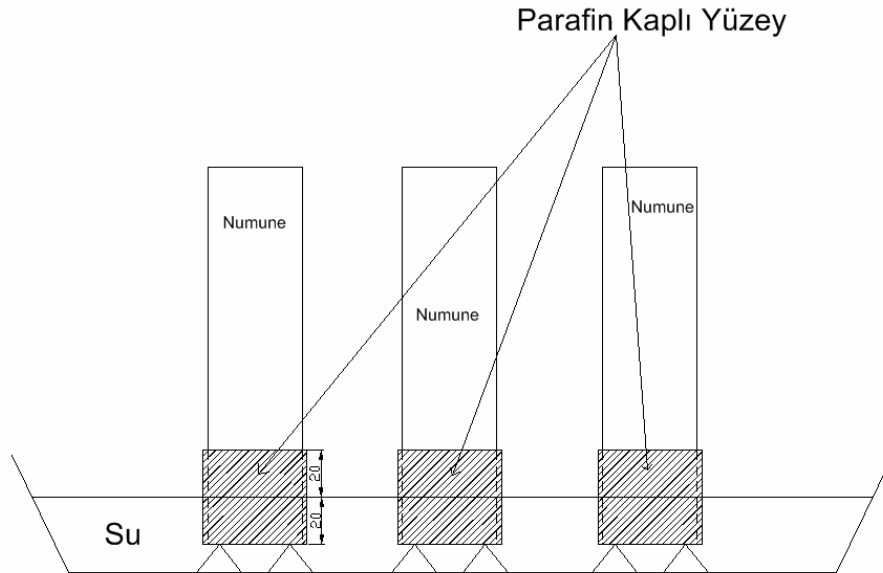
V_w : Numunenin Denklem 3.4 yardımı ile tayin edilen hacmi (cm^3)

3.3.8. Kılcal su emme (kapilarite) tayini deneyi

Prizmatik numunelerin kılcal su emme (Kapilarite) tayini deneyleri, TS EN 772-11 “Kâgir birimler – Deney yöntemleri – Bölüm 11: Betondan, gazbetondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kâgir birimlerde kapiler su emme ve kil kâgir birimlerde ilk su emme hızının tayini” standardına uygun olarak yapılmıştır.

Deneyde; ± 0.1 gr hassaslıkta ve 30 kg’a kadar olan ağırlıkları ölçebilen terazi ve Şekil 3.18-a.’da gösterilen 105 ± 5 °C sıcaklıklara çıkabilen havalandırılmalı etüv, kronometre ve laboratuarda bulunan tepsisi ve diğer araç-gereçler kullanılmıştır.

Birimi $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \sqrt{t}$ ’de veya $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \sqrt{\text{sn}}$ ’dir (Sungur, 2009; Bilim, 2006).



Şekil 3.20. Kılcal su emme deney düzeneğinin şematik olarak görünümü

Kapiler su emme deneyinde kullanılan numuneler; su emme oranı, birim ağırlık, boşluk oranı ve yoğunlukları tayini deneyinde kullanılan, 40x40x160 mm boyutlarındaki örneklerdir. Numuneler; Çizelge 3.8’de gösterildiği kadar oluşturulup, deneyden önce 105 °C sıcaklığındaki etüvde değişmez kütleye gelinceye kadar kurtulmuşlardır. Kılcallık katsayısı belirlenecek olan 7 ve 28 günlük numunelerde, suya dokundurulan yüzey taban kesitidir. Numunelerin sadece alt tafralarındaki kare kesitlerinin su ile temasa geçip, yan taraflarından su geçişi olmaması için, örneğin suya değecek yan yüzeylerine, eritilmiş parafin, fırça yardımıyla sürülmüştür.

Parafinle 40 mm yüksekliğine kadar yalıtılmış numunelerin ilk ağırlıkları alınmıştır. Parafinle birlikte kuru ağırlıkları alınan numunelerin alt yüzeylerine gelecek şekilde tepsiye mesnetler yerleştirilmiştir. Mesnetler üzerine konulan numunelerin bulunduğu tepsiye, numunelere 20 mm temas edecek şekilde su ile doldurulmuştur (Şekil 3.20). Şekil 3.21'deki gibi; 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81 ve 100 dakikalık sürelerde numuneler tarafından kapiler yolla emilen su miktarları belirlenmiş ve kapilarite katsayısı, Denklem 3.12 yardımıyla tespit edilmiştir. Deney boyunca su seviyesi kontrol edilmiş ve su seviyesi düştüğünde takviye yapılmıştır.

$$N = \frac{m_s - m_i}{A\sqrt{t_s}} \quad (3.12)$$

N : Kılcallık katsayısı [$\text{g}/(\text{cm}^2 \times \text{dk}^{1/2})$],

m_i : Deney numunesinin ilk kütlesi (gr),

m_s : Deney numunesinin (t) süreyle suya tema ettirildikten sonraki kütlesi (gr),

A : Deney numunesinin suya temas ettirilen yüzeyinin brüt alanı (cm^2),

t_s : Deney numunesinin suya temas ettirilme süresi (dk).



Şekil 3.21. Numuneler üzerinde kılcal su emme deneyi yapılırken

3.3.9. Korozyon tayini deneyleri

Korozyon deneylerinde kullanılmak üzere, % 0-5-10-15-20-25-30-35-40 tuğla tozu ikameli olarak üretilen prizmatik numunelerin içerisinde, % 0-5-15-30-40 oranlı numuneler korozyona tabi tutulacak oranlar olarak seçilmiştir. Seçilen karışımlardan orta noktasına donatı konarak, silindirik numuneler dökülmüştür. Korozyon numunelerinin üretimi için seçilen silindirik numunelerin adetleri Çizelge 3.8’de verilmiş ve bunlara ait karışım oranları ise Çizelge 3.10’da gösterilmiştir.

Korozyon tayin deneyleri ASTM C876, TS EN 480-14 standartların ve Yalçın ve Koç (2004) araştırmaları, Bölüm 2.5’te detaylı olarak değerlendirilmiş ve gözden geçirilmiştir. Tuğla tozu ikameli çimento araştırmalarında, donatı korozyonu üzerinde durulmadığı, yapılan literatür çalışmalarında, anlaşıldığından; bu tez çalışması kapsamında araştırma kapsamına dahil edilmiştir.

Deneyde kullanılan cihazlar, elektrotlar ve temas suyu aşağıda madde başlıkları halinde ayrı olarak ele alınmıştır.

3.3.9.1. Kullanılan cihaz ve ekipmanlar

3.3.9.1.1. Elektrokimyasal analiz cihazı

Silindirik numunelerindeki korozyon oluşumlarını öğrenebilmek için voltametrik ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümleri; VersaStudio3 programı ile bilgisayar kontrollü VersaSTAT3: Model-300 (V 1.55.3817) potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. VersaSTAT3 potansiyostat/galvanostat (elektrokimyasal) ölçüm cihazı (Nel Elektronik, 2013)

3.3.9.1.2. Referans elektrot

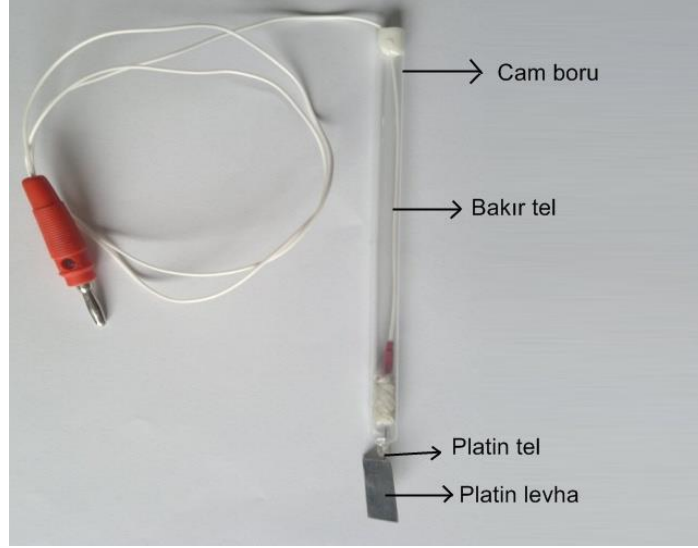
Referans elektrot olarak doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır (Şekil 3.23). Bu elektrotun içine potasyum klorür çözeltisi, şırınga ile eklenerek kullanılmıştır. Bu çözeltinin, elektrot tüpünden akmaması için ucunda firit denilen iletken aparat kullanılmıştır. Bu aparat sayesinde temas suyuna batırılarak ölçümler yapılmıştır.



Şekil 3.23. Referans elektrot

3.3.9.1.3. Karşı elektrot

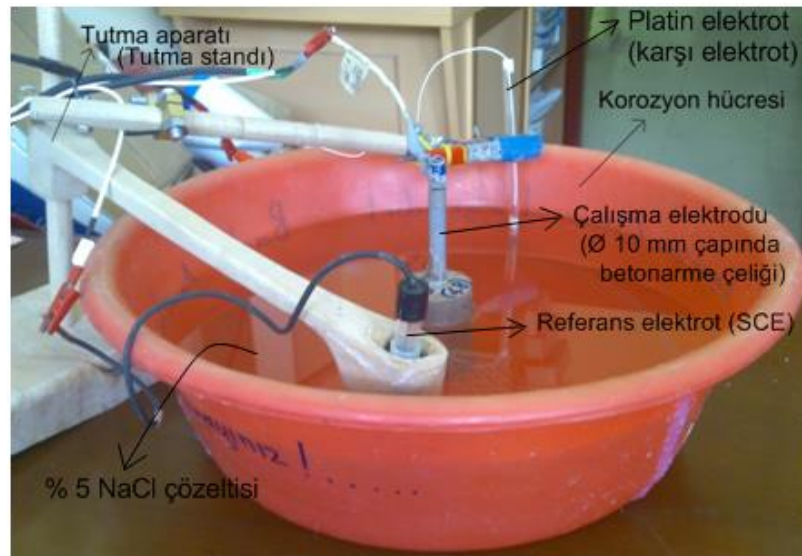
1.8 cm²'lik yüzey alanına sahip, paslanmayan platin elektrot, karşı elektrot olarak kullanılmıştır (Şekil 3.24). Platin levha ile bakır tel birbirlerine platin tel ile lehimlenerek bağlanmıştır. Platin levhanın dik durabilmesi ve bakır telin çözeltiyle temasının kesilebilmesi için platin telin bakır tele kaynak olan bölgeleri cam tüp içerisinde muhafaza edilmiştir.



Şekil 3.24. Karşı elektrot

3.3.9.1.4. Korozyon hücresi

Voltametrik ölçümleri yapabilmek için korozyon hücresine ihtiyaç duyulmuştur. Korozyon hücresi, daha sağlıklı ölçümler yapabilmek ve numune değişimlerini daha kolay gerçekleştirebilmek için geniş ağızlı plastik esaslı havuz kullanılmıştır (Şekil 3.25). Bu havuz içerisinde üzerinde referans ve karşı elektrotların sabit tutabilmek için, özel olarak imal edilmiş, stand kullanılmıştır.



Şekil 3.25. Korozyon hücresi ve elektrotları tutan aparat (stand)

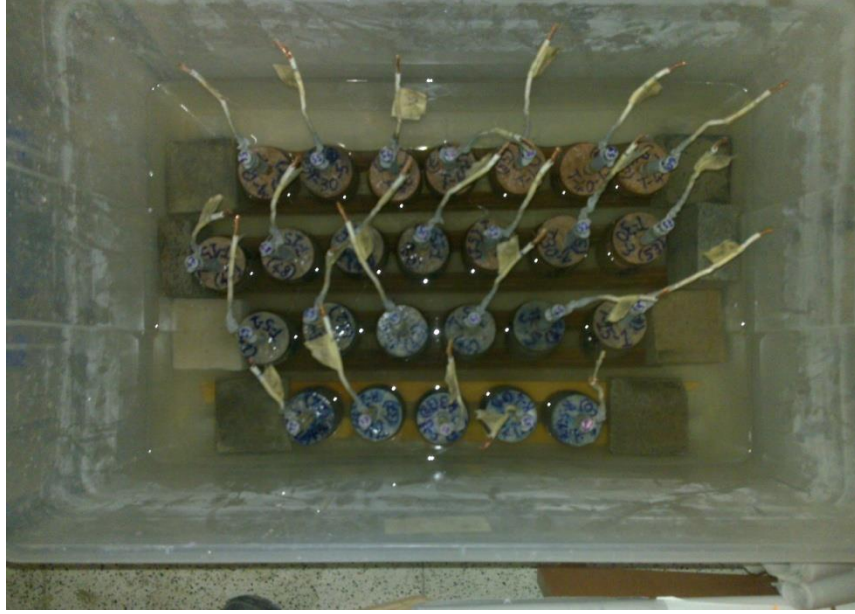
3.3.9.2. Çalışma elektrotlarının (donatı çeliği) ve temas suyunun hazırlanması

Çalışma elektrotları için, Bölüm 3.2.5'te anlatıldığı gibi düz yapı çelikleri kullanılmıştır. Çizelge 3.7'de kimyasal bileşimi verilmiş donatı çubukları, Şekil 3.3'te gösterildiği boyutta olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen çubuklar, torna ile üzerlerine yiv açılarak, buralara elektrik iletkenliği sağlayabilmesi için çok telli bakır kablolar kaynak yapılarak bağlanmıştır. Şekilde 3.26'te gösterildiği gibi 3.93 cm²'lik bir ucu açıkta kalacak şekilde ve geri kalan bölgeleri antipas boya ile boyanarak beklemeye bırakılmış ve kurumaları sağlanmıştır. Kuruyan çalışma elektrotları, silindirik numuneler dökülmeden önce plastik kalıplar ortalanarak, içerisine yerleştirilmeye hazır hale getirilmişlerdir (Şekil 3.29).



Şekil 3.26. Ø10x10 mm'lik alan hariç, geriye kalan kısmı antipas boya ile boyanan çelik çalışma elektrotları

Harç numunelerin olgunlaştırılmasında kullanılan temas suyu için, kimyasal analizi Çizelge 3.6'da verilen içme suyu niteliğindeki şebeke suyu kullanılmıştır. %5'lik NaCl içeren çözelti korozif ortam olarak ve aynı zamanda korozyon hücresinin oluşturulmasında elektrolit olarak voltametrik ölçümlerin yapılmasına imkân sağlamıştır (Şekil 3.27).

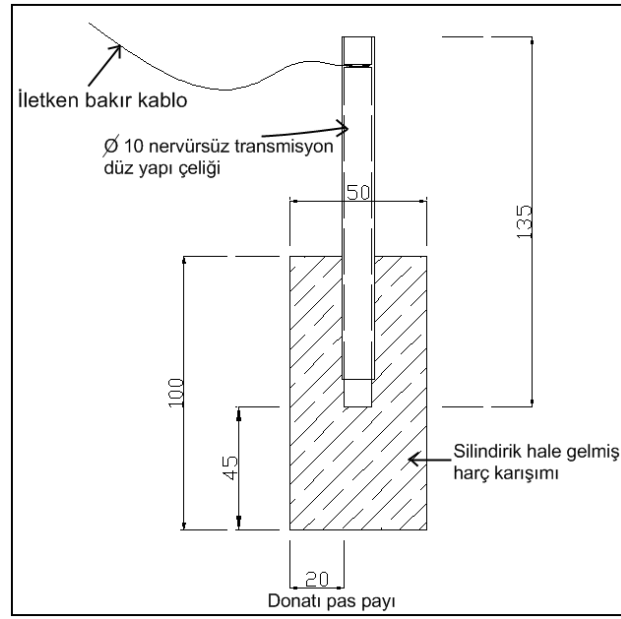


Şekil 3.27. Hazırlanan numuneler %5'lik NaCl çözeltisi k r ortamında bekletilmesi

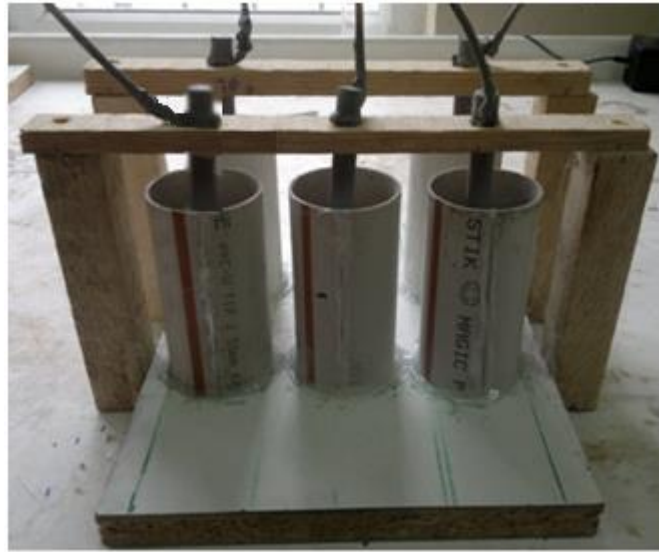
3.3.9.3. Elektrokimyasal  l  mler için numune  retimi

Elektrokimyasal korozyon ölçümleri için  50 x 100 mm'lik silindir olan  imento harcı numuneleri üretilmiştir. Çimento harçları, korozyon deneylerinden önce fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş ve bulunan sonuçlar değerlendirilerek korozyon deneyi için karışımlar belirlenmiştir. Çizelge 3.8'de belirtilen sayılarda ve karışıma giren malzeme miktarları  izelge 3.10'da belirtildiği gibi, TT 0 (referans) numunesi başta olmak üzere TT 5, TT 15, TT 30 ve TT 40 kodlu numunelerin üretimi kararla tırılmı tır.

Korozyon  rneklerinin üretimi için şekilde 3.29'da görülen silindir kalıpları ve çalışma elektrotlarının tutturulaca ı askı sistemleri oluşturulmuştur. Bu kalıpların her biri döküm öncesi ince makine ya ı ile hafifçe ya lanarak numunelerin kalıba yapışması engellenmiştir. Bu şekilde oluşturulan numune kalıplarının, orta noktalarına hizalanmış pozisyonundaki deliklere daha önceden hazırlanmış çalışma elektrotları asılmıştır. Donatılar askı sistemine asılırken, X yatay düzleminde eşit paspayı sağlanması dikkat edilmiştir. Alt tarafında ise  ekil 3.28'de gösterildiği gibi 45 mm yükseklik olması sağlanmıştır.



Şekil 3.28. Oluşturulan silindirik korozyon numunelerinin şematik olarak gösterimi



Şekil 3.29. Askı sistemine sabitlenmiş çalışma elektrotları ve plastik kalıplar

Seçilen bu numunelerin, tekrar aynı şekilde Bölüm 3.3.5.1.'de anlatıldığı gibi referans ve tuğla tozu ikameli harçları oluşturularak, Şekilde 3.30 ve 3.31'de gösterildiği gibi harçlar doldurulmuş ve sıkıştırılmıştır.



Şekil 3.30. Sarsma tablasında kalıplara harç dolduruluşu ve sıkıştırılması



Şekil 3.31. Harçlara doldurulan kalıpların görünüşü

Kalıplara doldurulmuş taze harç halindeki donatılı korozyon numuneleri, nem odasına kaldırılmayıp, Şekil 3.32’de gösterildiği gibi plastik örtüler altında 24 saat bekletilmiştir. Sonra Şekil 3.33’te görüldüğü üzere; harç kalıpları 24 saat sonra sökülüştür. Kalıplardan, sertleşmiş silindirik harç numuneleri, kür havuzuna alınmıştır (Şekil 3.27).



Şekil 3.32. Örneklerin nemi kaybetmelerini önlemek üzere plastik örtüye sarılmış halde bekletilmesi (24 saat)



Şekil 3.33. Silindirik kalıplarından çıkarılan numunelerin görünüşleri

3.3.9.4. Elektrokimyasal ölçümler

Numuneler, silinmeyecek şekilde kod numarası verildikten sonra, çözeltinin buharlaşmasını engelleyecek şekilde, kapalı kür tankı içerisine, numunelerin üst yüzeyinden 1 cm aşağıda kalacak %5’lik NaCl çözelti ile doldurulmuştur (Şekil 3.35) ve haftada birer defa korozyon ölçümleri tekrar edilmiştir (Şekil 3.36).



Şekil 3.34. NaCl çözeltili kür havuzunun kapağı kapatılarak korozyon ortamında bekletilmesi

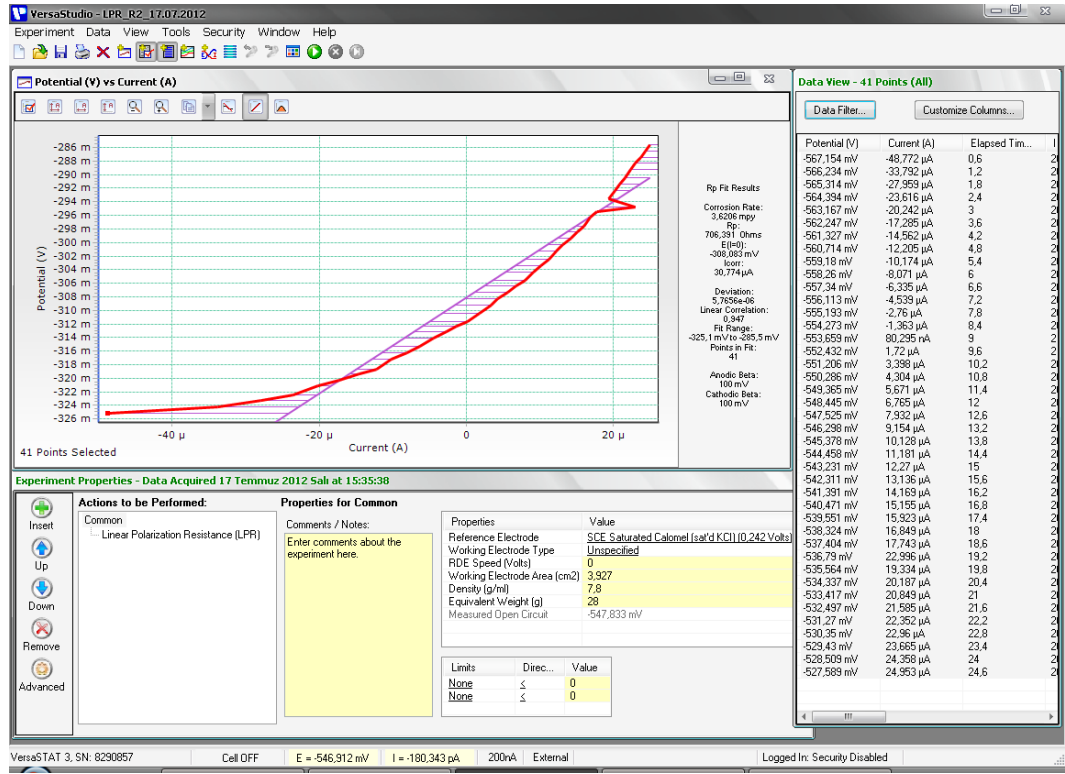


Şekil 3.35. Çözeltili ortamda bekletilen korozyon numunelerinin görünümü

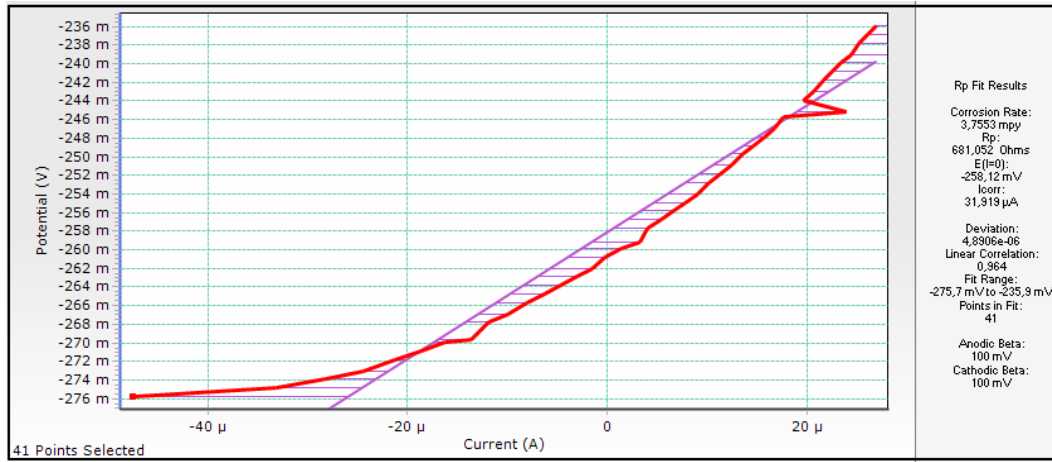
Numunelerde bulunan donatılı çeliklerinin, elektrokimyasal yöntemle korozyon değerlerinin ölçülmesi; R (direnç), E (potansiyel), ve I (akım) ölçüm parametrelerine bağlıdır. Bu değerler ıslak ve kuru betonlar için büyük değişimler gösterir. İletken ve sulu ortamda bulunan bir betonarme çeliğinin korozyon özelliklerini anlamak için I, R ve E değerlerini kapsayan ohm kanunundan yararlanılabilir (Yalçın ve Koç, 2004).

Betonarme elik donatılı numuneler, % 5 NaCl özeltisi bulunan hazneden alınarak haftada bir defa korozyon hücresinde bilgisayar kontrollü VersaSTAT3: Model-300 (V 1.55.3817) potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak korozyon ölçümleri yapılmıştır. Bu cihaz ve programı; açık devre potansiyelinde, yukarıda bahsedilen parametreleri de içine alan, ohm kanunundan faydalanılarak, korozyon değerlerini hesaplamış ve grafiklerini oluşturmuştur. Cihazla, donatılardaki korozyon değerlerinin belirlenmesinde üç elektrotlu ölçüm tekniğinden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu düzenekte elde edilen potansiyostatik ve galvanostatik yöntemlerde açık devre potansiyelleri (ADP) ve bu potansiyellerde yüzeyden geçen akımlar belirlenmiştir. Oluşturulan devrede, lineer polarizasyon (LPR) tekniğı ile korozyon potansiyelinden itibaren, otomatik olarak tespit edilen potansiyel aralıklarda 1.6 mV/s tarama hızıyla polarizasyon parametreleri belirlenmiştir. Lineer polarizasyon tekniğinde polarizasyon direncini kullanarak, korozyon hızını bulmak üzere, cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.43 ve 3.44). Farklı betonarme numune grupları için elde edilen veriler Bölüm 4.6’da değerlendirilmiştir.



Şekil 3.36. Referans numunesinin bilgisayar ölçümleriyle oluşturulan lineer polarizasyon grafiği ve diğer değerler



Şekil 3.37. Tuğla tozu ikameli numunelerden birine ait örnek bir lineer polarizasyon grafiği

3.3.10. Karbonatlaşma tayini deneyi

Korozyon numunelerinin yarılmaları sonucu, elde edilen parçalarına uygulanan karbonatlaşma deneyi, Hearn et al (1994), Erdoğan (2003) ve Sancak (2005) araştırmaları baz alınarak yapılmıştır.

50 x 100 mm olan silindir numunelerinin yarma deneyleri sonucu ortaya çıkan yarım parçaların kırılma yüzeylerine bir indikatör sıvı püskürtülerek renk değişimi gözlemlenmesiyle anlaşılmıştır (Çizelge 3.11). İndikatör sıvısı, etil alkol içerisine %0.1 çözelti oluşturacak şekilde, phenolphtalein maddesi eklenmesiyle elde edilmiştir. Bu solüsyonu bir sprey şişesi içerisine dökerek numunelerin kırılan yüzeylerine püskürtülmüştür. Püskürtme sonucu renk değişimleri gözlemlenerek, serbest Ca(OH)_2 pembe renk gösterirken, karbonatlaşmış kısımlar renk değişimine uğramadığı açık olarak Şekil 4.9’te görülmektedir.

Çizelge 3.11. Fenolftaleinin asit-baz konsantrasyonuna göre renkdeğişimi çizelgesi (Agar, 2009)

Fenolftalein (pH indikatörü)	
8.2 pH altında ise	10.0 pH üstünde ise
renksiz	pembe

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Tuğla Tozu Miktarı Standart Kıvama Etkisi

Tuğla kırıklarının öğütülerek mineral ikame olarak kullanıldığı çimentoların standart kıvam için ihtiyaç duydukları su miktarları, hem yüzde olarak hem de olarak Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çimento hamurlarının standart kıvam suyu ihtiyaçları

Çimento örneklerinin kodları	Su ihtiyacı	
	(%)	(gr)
TTİ0 (Referans)	28.5	142.5
TTİ5	27.5	137.5
TTİ10	31	155
TTİ15	31	155
TTİ20	31	155
TTİ25	31.7	158.5
TTİ30	31.8	159
TTİ35	32.2	161
TTİ40	32.4	162

Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere, ikameli çimento örnekleri, kendi arasında incelendiğinde; TTİ10, TTİ15 ve TTİ20 numunelerinin kıvam suyu miktarları aynı kalmasına rağmen, %25, %30, %35, %40 Tuğla tozu ikameli numunelerde artan bir eğilim gözlenmiştir. Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında; referans numunesine göre, TTİ5 numunesinin kıvam suyu ihtiyacı %1 daha düşük iken, %10 - %15 - %20 ikameli örneklerde kıvam suyu ihtiyaçları %2.5 artmış, %25 - %40 oranları arasında da bir artış eğilimi olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 4.1’den anlaşıldığı üzere standart kıvam suyu ihtiyacı en fazla olan TTİ40 numunesi, en az olan TTİ5 numunesi ve sabit kalanlar TTİ10, 15, 20 numuneleridir. TTİ5 numunesi, referans numunesinden daha az kıvam suyu ihtiyacı olduğu ortaya çıkmıştır.

TTİ5 numunesinden daha fazla ikame katkısı olanların, (eksiltelen çimento miktarlarından daha az bağlayıcı özellik göstermesine rağmen) referansa göre, daha fazla suya ihtiyaç duydukları görülmüştür. Bunun sebebi, referans çimento inceliğinin, ikame olunan tuğla tozu inceliğinden daha düşük değerde olmasıdır. Böylece tuğla tozu yoğunluğunun çimento yoğunluğundan daha düşük değerde olması nedeniyle hacim artışı söz konusudur. Hacim artışı ve daha fazla tanenin karışıma girmesi, referans numunesinden daha fazla standart kıvam suyu ihtiyacını doğurduğu söylenebilir (Çiftci, 2004).

Çiftci (2004)'nin; tuğla tozunun %10-20-30 oranlarında ikameli örnekleri üzerinde yaptığı çalışmasında, sırasıyla %25.7 - 26.4 – 27.5 ve referansta ise %25.4 olarak belirlenmiştir. İkameli numunelerin kıvam suyu ihtiyacı referanstan daha yüksek çıkmıştır. Tuğla tozu miktarı arttıkça standart kıvam suyunun da arttığı görülmüştür.

4.2. Tuğla Tozu Miktarının Priz Sürelerine Etkisi

Çizelge 4.1'de gösterilen standart kıvam suyu miktarları kullanılarak, çimento hamurlarının priz süreleri belirlenmiş ve Çizelge 4.2'de, priz süresi – tuğla tozu oranı ilişkisi de verilmiştir. Çizelge 4.2 incelendiğinde üretilen tüm çimentoların priz sürelerinin TS EN 197-1'de verilen sınır değerlere uygun olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2. Çimentoların priz başlangıcı, sonu ve hacim genleşmesi bulguları

Çimento örneklerinin kodları	Priz süresi (saat:dakika)		Katılma süresi (saat:dakika)	Hacimsel genleşme (mm)
	Başlangıç	Bitiş		
TTİ0 (Referans)	3:30	4:50	1:20	1
TTİ5	3:57	4:47	0:50	1
TTİ10	4:31	6:15	1:44	1
TTİ15	4:40	6:32	1:52	1
TTİ20	4:28	5:35	1:07	2
TTİ25	4:55	6:37	2:42	2
TTİ30	5:13	6:47	1:34	2
TTİ35	5:21	7:23	2:02	2
TTİ40	5:28	7:45	2:17	2
TS EN 197-1	Min. 1:00	Max. 10:00	-	Max. 10

Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi ikameli çimento örneklerinin priz başlangıç ve bitiş sürelerinde en düşük değerler TTİ5 numunesinde, en yüksek değerleri ise TTİ40 numunesinde elde edilmiştir. Referans numunesi ile göre karşılaştırıldığında, tüm ikameli çimento örneklerinin referans değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Priz sonu değerlerinden, TTİ5 numunesi, referansa göre 3 dakika kısa olması, ihmal edilebilir bir fark olması nedeniyle dikkate alınmaz.

Çizelge 4.2’ye göre genel bir değerlendirme yapılacak olursa, ikame katkı oranı arttıkça priz başlama ve bitiş sürelerinde, TTİ20 numunesi hariç, artış eğilimi olduğu söylenebilir. TTİ20 kodlu numune, ikame oranı artışına bağlı priz süresi artış eğilimini bozmakla birlikte, referans numuneye göre priz başlama süresinde 58 dakika, bitiş süresinde 45 dakika gecikmeye neden olduğu görülmektedir. Katılma sürelerinde ise tuğla tozu oranına bağlı doğrusal bir ilişki yoktur.

Çiftci (2004)’nin; tuğla tozunun %10-20-30 oranlarında ikameli örnekleri üzerinde yaptığı çalışmasında, ikameli numunelerin prize başlama, sona erme sürelerinin referanstan daha uzun sürede başlamış ve sona ermiştir. Prize başlama süresinde ikame oranı arttıkça artan su ihtiyacı ile birlikte prize başlama süresinin de arttığı görülmüştür. Katılma sürelerinde ise sadece %30’luk numune diğer tüm numunelerden daha düşük sürede çıkmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonuçlarında genel olarak, ikame oranı arttıkça priz başlama ve bitiş sürelerinden artışma görüldüğü ve referansa göre yüksek çıkması, Çiftci (2004)’nin sonuçlarıyla genel olarak benzerlik gösterdiği, söylenebilir.

4.3. Tuğla Tozu Miktarının Hacim Genleşmesine Etkisi

Elde edilen çimentolara ait hacim genleşmesi deney sonuçları Çizelge 4.2’de priz süreleri ile beraber verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere hacim genleşmeleri TS EN 197-1’de verilen sınır değerinin (<10 mm.) çok altında bulunduğundan standarta uygun veriler elde edilmiştir. Bu sebeple çimento ikame katkısı olarak kullanılan malzemelerin hacim genleşmeleri yönünden belirgin bir olumsuzluğa neden olmadığı söylenebilir.

Çiftci (2004)'nin; tuğla tozunun %10-20-30 oranlarında ikameli örneklerinde 3mm – 2mm – 3 mm ve referansta 4mm olarak bulunmuştur. Kırgız (2007)'in %6-20-21-35 oranlarında çimentoya tuğla tozunun ikamesiyle yaptığı çalışmasında ise, 0mm yani genişlemenin yaşanmadığı, referansta ise 2mm olarak bulunmuştur. Çiftci (2004) ve Kırgız (2007)'in ayrı olarak, hem referans hem de ikameli örnekler üzerinde yaptıkları çalışmalarında, genişleme değerleri standartta belirtilen sınır değerin çok altında kalmıştır.

4.4. Tuğla Tozu Miktarının Taze Harç Kıvamına Etkisi

Tuğla tozu ikameli çimento, Rilem kumu ve suyun Bölüm 3.3.5'te bahsedildiği gibi karıştırılması ile oluşturulan taze harçların uygun görülen kıvam (140 mm yayılma) için ihtiyaç duydukları su miktarları, hem su/çimento oranı hem de bu oranın kütle olarak değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Taze çimento harçlarının su ihtiyaçları

Çimento harç kodları	Harcın su ihtiyacı (gr)	Su/Çimento oranı
TTİ0 (Referans)	225	0.5
TTİ5	225	0.5
TTİ10	230	0.51
TTİ15	230	0.51
TTİ20	232	0.515
TTİ25	234	0.52
TTİ30	233	0.517
TTİ35	235	0.522
TTİ40	236	0.524

Çizelge 4.3'te görüleceği gibi ikameli çimento harcı örneklerinin su ihtiyacı en düşük değer, referans ile aynı olarak, 225 gr TTİ5 numunesinde, en yüksek ise 236 gr olarak TTİ40 numunesinde gözlenmiştir. Referans numunesine göre değerlendirilirse, TTİ5 numunesi referansla aynı değerde iken, diğer ikame oranlarında artışa paralel olarak karışım suyu ihtiyacı da artmaktadır.

Kırgız (2007)'in %6-20-21-35 oranlarında çimentoya tuğla tozunun ikamesiyle yaptığı çalışmada, yine sırasıyla; 142.5gr - 153gr - 153gr - 171.2gr ve referansta 136.7gr olarak su ihtiyaçları bulunmuştur. Sabit bir yayılma çapı belirlemeyip sırasıyla, 140mm - 131mm - 126mm - 110mm ve referansta 180mm olarak belirlemiştir. Yaptığımız çalışmada, sabit bir yayılma çapı belirlenmiş ve bu çap üzerinden numunelerin ihtiyaç duydukları su oranları bulunmuştur. Çizelge 4.3'de referans numunesinin 140mm olan çapına göre değişim miktarı değerlendirilmiştir. Genel olarak değerlendirdiğimizde ikame oranı arttıkça su ihtiyacının da arttığını belirlenmiştir.

4.5. Tuğla Tozu Miktarının Prizmatik Numuneler Üzerindeki Etkileri

4.5.1. Tuğla tozunun su emme, boşluk oranı ve birim hacim ağırlıklarına etkisi

Çimento yerine belirli oranlarda tuğla tozu ikamesinin, fiziksel özelliklere etkisini belirlemek üzere yapılan su emme oranı, birim ağırlık, yoğunluk, porozite deney sonuçları, Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Deneyler 28 günlük kür sonunda yapılmıştır.

Çizelge 4.4. Prizmatik numunelerin fiziksel özellikleri

Prizmatik numune kodları	Kütlece su emme oranı (S_k , %)	Birim ağırlık (Δ_h , gr/cm ³)	Boşluk oranı (Porozite) (P_g , %)	Yığın yoğunluk (D_b , gr/cm ³)	DKY yoğunluk (D_d , gr/cm ³)
TTİ0 (Referans)	7.59	2.24	15.67	2.06	2.21
TTİ5	7.65	2.22	15.88	2.07	2.23
TTİ10	8.31	2.19	16.93	2.03	2.19
TTİ15	8.47	2.17	17.23	2.03	2.20
TTİ20	9.04	2.22	18.29	2.02	2.20
TTİ25	8.97	2.25	18.16	2.02	2.19
TTİ30	8.14	2.23	16.67	2.04	2.20
TTİ35	8.88	2.17	17.84	2.01	2.17
TTİ40	9.46	2.09	18.56	1.96	2.14

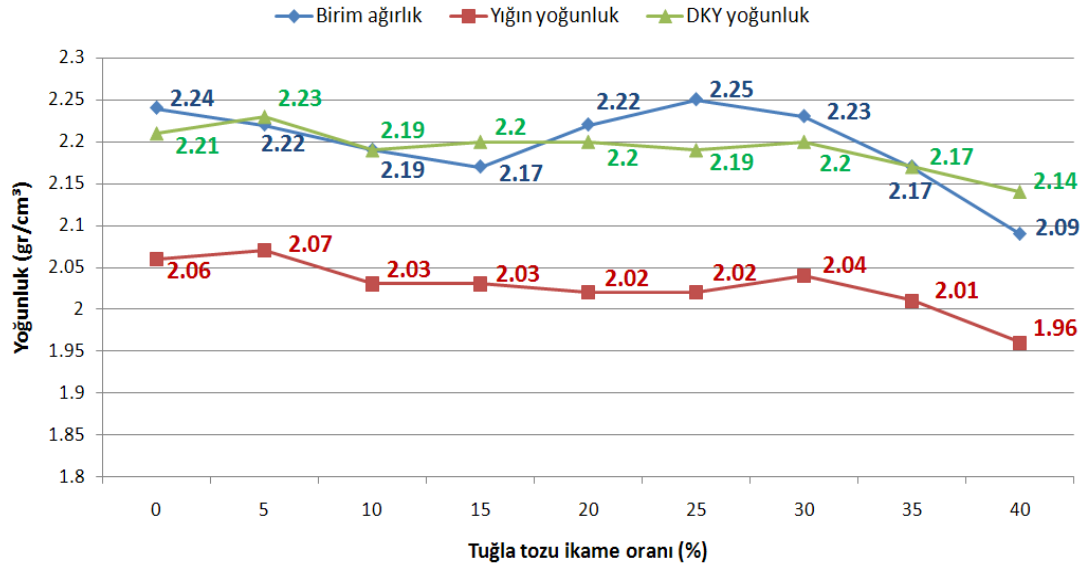
Çizelge 4.4'e göre, ikameli çimento prizmalarında en düşük su emme oranı TTİ5 numunesinde, en yüksek değer ise TTİ40 numunesinde gözlenmiştir. Tüm ikameli numunelerin, referans numunesinden daha yüksek su emme oranı değerlerine sahip olduğu Çizelge 4.4'te görülmektedir. Genel olarak, tuğla tozu ikame oranı arttıkça su

emme oranının bir artış eğilimi sergilediği, yani atık ikameli numunelerin referans numuneye göre daha geçirimli bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. %5 Tuğla tozu ikameli TTİ5 örneği referansa göre %0.16 daha fazla su emme değerine sahip iken, tuğla tozu ikame oranı %10'a çıktığında su emme oranı %0.66 oranında artmaktadır. Buna göre %10 tuğla tozu ikameli numuneler, %5 tuğla tozu ikameli numunelere göre 4 kat daha fazla boşluğa sahiptir.

TTİ10 – TTİ15 arasında da %0.16 fark var iken, %15 tuğla tozu içeren TTİ20 ve TTİ15 arasında %0.57'lik su emme oranı farkı vardır. TTİ20 ve TTİ25 birbirlerine çok yakın su emme oranı değerlerine sahip iken, %30 tuğla tozu ikameli numunelerden %5 tuğla tozu ikamesi ile elde edilen numunelerin, su emme oranı değerlerine en yakın ve referans örnekten %0.55 fazla su emme oranı değerine sahiptir. Su emme oranı bakımından referans örneğe göre %0.87 daha fazla olarak %9.46 değeri ile TTİ40 serisi olmuştur.

Çizelge 4.5'e göre, ikameli çimento prizmalarının porozite değeri en düşük olan TTİ5 numunesinde, en yüksek değeri ise TTİ40 numunesinde sergilemiştir. Tüm ikameli numuneler, referans numunesinden daha yüksek porozite değerlerine sahip oldukları Çizelge 4.5'te görülmektedir. Çizelge 4.5'ten de anlaşılabacağı üzere, porozitenin değişimi; kütlece su emme oranına benzer bir eğilim sergilemiştir. Boşluk oranı değişimi küçükten büyüğe doğru TTİ0-TTİ5-TTİ30-TTİ10-TTİ15-TTİ35-TTİ25-TTİ20-TTİ40 olarak sıralanmıştır.

Prizmatik numunelerin yoğunlukları ile tuğla tozu oranı arasındaki ilişkileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Prizmatik numunelerin yoğunluk – tuğla tozu oranı ilişkisi

Şekil 4.1’de üç yoğunluk grafik değerine ilişkin verilmiştir. Yoğunluk değerleri birbirleriyle örtüşmemektedir. Şekil 4.1’e göre ikameli çimento prizmalarındaki tüm yoğunluk değerleri için en düşük olanı TTİ40 numunesi, en yüksek olanı ise Yığın ve DKY yoğunluğu değerleri bakımından TTİ5 numunesi iken, birim ağırlık değeri açısından durum ise TTİ25 numunesine aittir.

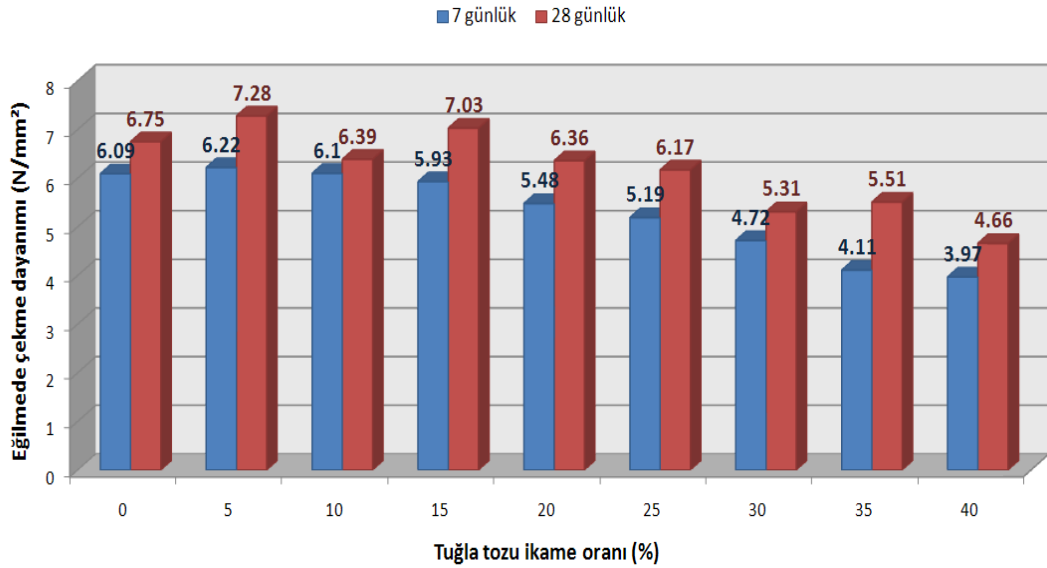
Genel bir değerlendirme yapıldığında, referans numunesine göre ikameli numunelerin yoğunlukları doğrusal olmasa da tuğla tozu kullanım oranına bağlı olarak azalma eğilimi sergilemiştir. Ayrıca Çizelge 4.4’deki veriler birlikte değerlendirildiklerinde; kütlece su emme oranı, porozite bakımından referans serisine en yakın değerleri, %5-%10-%30 tuğla tozu ikameli TTİ5-TTİ10 ve TTİ30 örnek serileri sergilerken benzer davranışı birim ağırlık, DKY yoğunluk değerlerinde de gözlemlenmiştir.

%0, %5 ve %40 oranlarındaki tuğla tozu ikame katkılı numunelerin birim ağırlıkları sırasıyla; 2.24 – 2.22 – 2.09 gr/cm³, yığın yoğunluk; 2.06 – 2.07 – 1.96 gr/cm³ ve DKY yoğunluk; 2.21 – 2.23 – 2.14 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

4.5.2. Tuğla tozu miktarının eğilme ve basınç dayanımlarına etkisi

Prizmatik numuneler üzerinde Bölüm 3.3.6’da anlatıldığı gibi yapılan, eğilme ve basınç dayanımı deneylerine ait değerlerin aritmetik ortalamaları alınmıştır.

Bu numunelere ait tuğla tozu oranı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.2’de, gösterilmiştir.



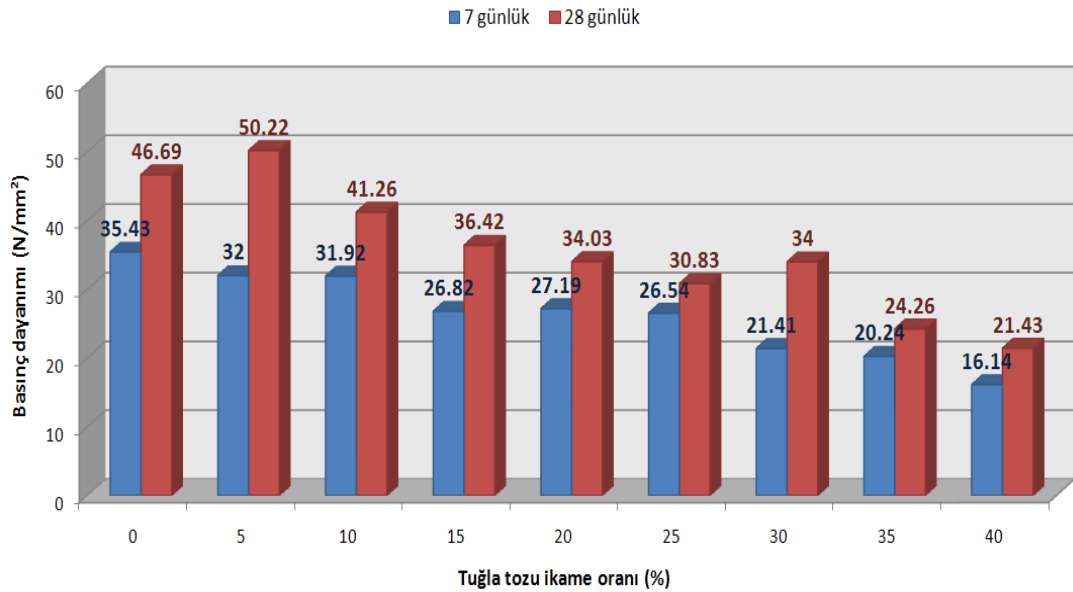
Şekil 4.2. Prizmatik numunelerin eğilmede çekme dayanımı – tuğla tozu oranı ilişkisi

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, 7 günlük eğilme dayanımlarında tuğla tozu ikameli çimento prizmaları kendi içerisinde kıyaslandığında (7 günlük TTİ0’ın eğilme dayanımına göre sırasıyla; % 102 – 100 – 97 – 90 – 85 – 78 – 68 – 65 değişimleri), en yüksek değeri TTİ5 numunesi, en düşük değeri ise TTİ40 numunesi (% 65) vermiştir. Tuğla tozu kullanım oranının artışına bağlı olarak, 7 günlük eğilme dayanımlarında doğru orantılı olarak bir azalma olduğu gözlenmektedir. Referans numunesine göre değerlendirilirse, sadece TTİ5 ile TTİ10 numunelerinin eğilme dayanımları, referanstan yüksek çıkmıştır. 28 günlük eğilme dayanımlarında tuğla tozu ikameli çimento prizmaları kendi arasında değerlendirildiğinde (eğilme dayanımı değişimi % 102), (28 günlük TTİ0’ın eğilme dayanımına göre sırasıyla; % 108 – 95 – 104 – 94 – 91 – 79 – 82 – 69 değişimleri), en yüksek değeri TTİ5 numunesi (% 108’lik değişim ile 7.28 N/mm²), en düşük değeri ise TTİ40 numunesi (% 69’luk değişim ile 4.66 N/mm²) vermiştir. Tuğla tozu oranının artışına bağlı olarak, 28 günlük eğilme dayanımlarında doğru orantılı bir azalış olmasa da genel bir

azalma eğilimi gözlenmiştir. Referans numunesine göre değerlendirilirse, sadece TTİ5 ile TTİ15 numunelerinin eğilme dayanımları, referanstan yüksek çıkmıştır.

Çiftci (2004)'nin; tuğla tozunun %10-20-30 oranlarında ikameli örnekleri üzerinde yaptığı çalışmada, 7. gün eğilme dayanımları sırasıyla 36.80 – 32.58 – 28.83 kgf/cm² ve referansta ise 39.38 kgf/cm² olarak, 28. gün eğilme dayanımları sırasıyla 55.55 – 53.44 – 48.98 kgf/cm² ve referansta ise 54.84 kgf/cm² olarak belirlenmiştir. İkameli numunelerin, 7. gün değerleri referanstan daha düşük çıkmış ve 28. gün değerlerinde ise sadece %10'luk numune referanstan yüksek çıkmıştır. Kırgız (2007)'in %6-20-21-35 oranlarında çimentoya tuğla tozunun ikamesiyle yaptığı çalışmada, 7. gün eğilme dayanımları sırasıyla 5.27 – 4.51 – 4.83 – 5.38 N/mm² ve referansta ise 5.37 N/mm² olarak, 28. gün eğilme dayanımları sırasıyla 5.33 – 6.56 – 6.50 – 6.59 N/mm² ve referansta ise 6.25 N/mm² olarak belirlemiştir.

Tuğla tozu oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Prizmatik numunelerin basınç dayanımı – tuğla tozu oranı ilişkisi

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi, 7 günlük basınç dayanımlarında ikameli çimento prizmalarını kendi aralarında kıyaslandığında (7 günlük TTİ0'ın basınç dayanımına göre sırasıyla; % 91 – 90 – 76 – 77 – 75 – 60 – 57 – 46 değişimleri), en yüksek değeri eğilmede olduğu gibi TTİ5 numunesi (basınç dayanımı değişimi % 91), en düşük değeri ise TTİ40 numunesi (% 46) vermiştir. Tuğla tozu kullanım oranının

artışına bağlı olarak 7 günlük basınç dayanımlarında bir azalma eğilimi söz konusudur. 28 günlük basınç dayanımlarında Tuğla tozu ikameli numuneleri karşılaştırıldığında (28 günlük TTİ0'ın basınç dayanımına göre sırasıyla; % 108 – 88 – 78 – 73 – 66 – 73 – 52 – 46 değişimleri), en yüksek değeri TTİ5 numunesi (% 108'lik değişim ile 50.22 N/mm²), en düşük değeri ise TTİ40 numunesi (% 46'lık değişim ile 21.43 N/mm²) vermiştir. Tuğla tozunun artışına bağlı olarak, 28 günlük basınç dayanımlarının düşüş eğiliminde oldukları ve bu düşüşün doğru orantılı bir düşüş olmadığı gözlenmektedir. Referans numunesine göre değerlendirilirse, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde TTİ5 ve TTİ30 numuneleri hariç azalma eğilimi vardır.

Çiftci (2004)'nin; tuğla tozunun %10-20-30 oranlarında ikameli örnekleri üzerinde yaptığı çalışmada, 7. gün basınç dayanımları sırasıyla 231.9 – 213.4 – 167.3 kgf/cm² ve referansta ise 253.2 kgf/cm² olarak, 28. gün basınç dayanımları sırasıyla 419.3 – 396.8 – 357.4 kgf/cm² ve referansta ise 426.6 kgf/cm² olarak belirlenmiştir. İkameli numunelerin, 7. gün ve 28. gün değerleri referanstan daha düşük çıkmıştır.

Kırgız (2007)'in %6-20-21-35 oranlarında çimentoya tuğla tozunun ikamesiyle yaptığı çalışmada, 7. gün basınç dayanımları sırasıyla 37.88 – 33.56 – 38.09 – 38.00 N/mm² ve referansta ise 34.29 N/mm² olarak, 28. gün basınç dayanımları sırasıyla 41.74 – 44.12 – 45.49 – 44.17 N/mm² ve referansta ise 43.06 N/mm² olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.2'ye göre 7 ve 28 günlük eğilme dayanımlarında, (sırasıyla TTİ5, TTİ10 ve TTİ15) hariç diğer numuneler, referans değerinden düşük çıkmıştır. Şekil 4.3'de göre ise, sadece 28 günlük basınç dayanımlarındaki TTİ5 numunesi referansın değerinden yüksek çıkmıştır. TTİ5 numunesi her iki şekilde de referans değerinden yüksek çıktığı görülmektedir.

Tuğla tozu kullanım oranının artışına bağlı olarak 7 günlük basınç dayanımlarında bir azalma eğilimi söz konusudur. Tuğla tozunun artışına bağlı olarak, 28 günlük basınç dayanımlarının düşüş eğiliminde oldukları ve bu düşüşün doğru orantılı bir düşüş olmadığı gözlenmektedir. Referans numunesine göre değerlendirilirse, 28

günlük basınç dayanımı değerlerinde TTİ5 ve TTİ30 numuneleri hariç azalma eğilimi vardır.

Puzolan ilavesi erken dönemlerde çimento ve beton dayanımını düşürür, ilave edilen puzolanın tipi ve miktarı ile ilgili olarak nihai basınç dayanım değeri Portland çimentosunun nihai değerini alabilir. Puzolan ilavesi belli yüzdeleri aştığı zaman dayanım değerleri hızla düşmektedir. Çünkü tam bir reaksiyon için kireç miktarının yetersiz olması nedeniyle puzolan fazlası sertleşmeye katkıda bulunmaz (Massazza, 1989).

Ortalama incelikteki (3000 - 4000 cm²/gr) bir puzolan ikamesiyle betonda ya da harçlarda oluşan dayanım kaybının belli bir süre sonunda kullanılan puzolan türüne ve ikame miktarına bağlı olarak yok edileceği yapılan bir çalışmada belirtilmektedir. Öğütülmüş puzolan ilavesi yapılmış harçların 1 yılda kontrol numunelerinin basınç dayanımı değerlerini yakaladığı ve hatta geçtiği belirtilmiştir (Erdoğan vd.,2003).

İnceliğin artmasıyla çimento harçlarının basınç dayanımlarındaki artışın öğütülme süresine bağlı olarak yükseldiği yapılan diğer bir çalışmada belirtilmiştir (Shih-Cheng vd., 2003).

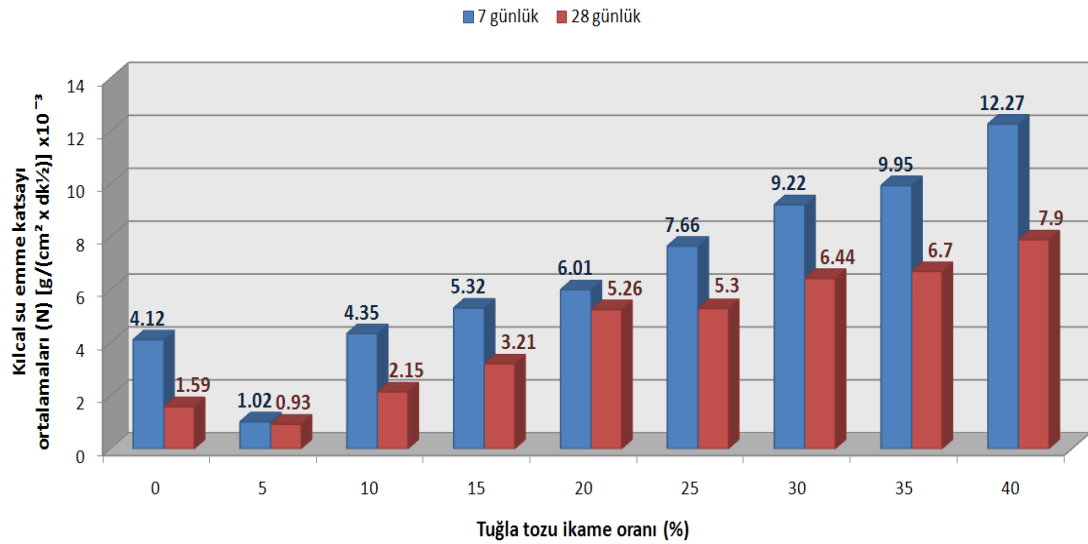
Yukarıdan da anlaşılacağı üzere tuğla tozunun, çimentoyla beraber oluşturdukları puzolanik özelliğinden, inceliğinden ve çevre koşullarından kaynaklandığını söyleyenebilir. Genel olarak, tuğla tozu kullanım oranı arttıkça, TTİ5 hariç, artan ikame oranına bağlı olarak eğilme ve basınç dayanımlarında bir düşüşün olduğu söylenebilir.

4.5.3. Tuğla Tozunun Kapiler Su Emmeye Etkisi

Bölüm 3.3.8’de anlatıldığı üzere, prizmatik numuneler üzerinde yapılan kapilarite deneyine ilişkin bulguların 7 ve 28 günlük yaşlar için ortalamaları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Şekil 4.4’de görüldüğü üzere, 7 günlük kapiler su emme katsayılarında ikameli çimento prizmalarını kendi içerisinde kıyasladığımızda, en düşük değeri TTİ5

numunesi, en yüksek değeri ise TTİ40 numunesi vermiştir. Tuğla tozunun artışına bağlı olarak, kılcal su emme katsayılarının artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Bu durum, tuğla tozunun kimyasal özelliklerinin verildiği Çizelge 3.2 incelendiğinde görülebileceği gibi malzemeye yüksek puzolanik özellik sağlayan SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 , bileşenlerinin sırasıyla %58.5 - %16.5 - %8 oranlarında bulunması nedeni ile harcın içerisinde oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyon yaparak daha kompakt bir mikroyapı elde edilmesine imkan veren CSH jellerinin oluşumuna neden olduğu düşünülebilir (Erdoğan, 2012). Ancak tuğla tozu ikame oranının artışına bağlı olarak kılcal su emme katsayılarının doğrusal olmasada bir artış eğilimine sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 4.4. Prizmatik numunelerin kapiler su emme katsayısı – tuğla tozu oranı ilişkisi

Şekil 4.4'deki 7 ve 28 günlük ikame katkılı numunelerin arasındaki farkta, 28 günlük numunelerin kapiler su emme katsayıları, 7 günlük numunelerden düşük çıkmıştır. 7 günlük numunelerin kapiler katsayılarının daha yüksek olduğu gözler önüne serilmektedir. Bunun nedeni; nemli ortamda, ince öğütülmüş puzolanın silikası ile kalsiyum hidroksit arasında oluşan kimyasal reaksiyon (denklem 2.1), CSH jellerini oluşturur. Burada meydana gelen reaksiyon, çok yavaş bir reaksiyondur. Tuğla tozu ikameli numunelerde ise, çimento + tuğla tozu ve su arasındaki reaksiyonların devam ediyor olması, CSH jellerinin daha yavaş bir hızda oluşmasına ve gözeneklerin azalması sonucunu doğurmasıdır (Ülger, 2006; Akçaözoğlu, 2007; Menekşe, 2008; Erdoğan, 2012). Numune yaşı arttıkça kapiler su emme katsayısının da düşüş yaşandığı gözlenmiştir.

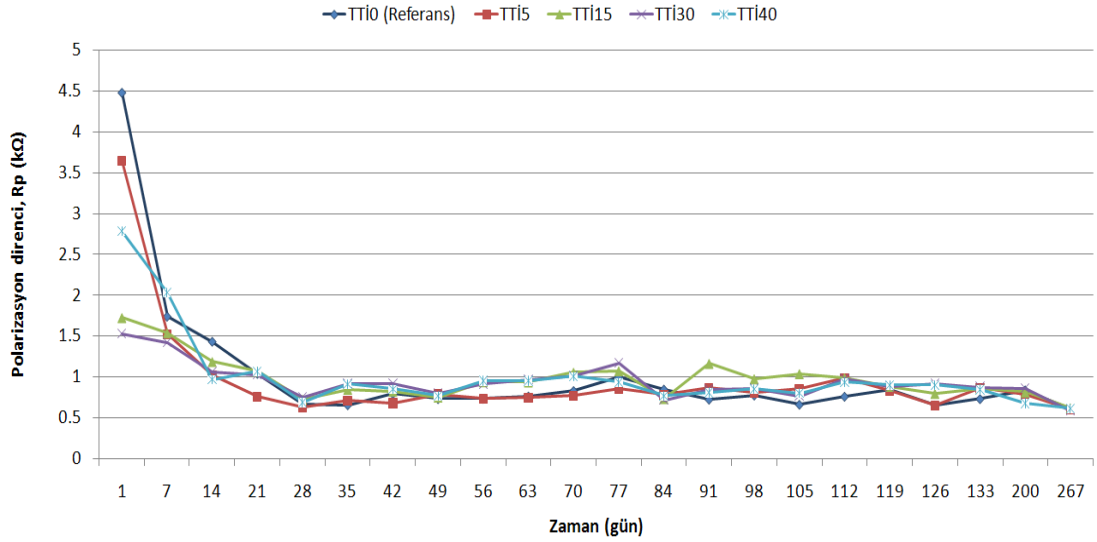
Genel olarak değerlendirilirse 7 ve 28 günlük kür şartında, tuğla tozu ikame oranı arttıkça, kapiler su emme katsayılarında bir artış eğilimi olduğu görülmektedir.

Öntürk (2011)'ün; borojipsin %0-3-5-10-15 oranlarında çimentoya ikame edilerek numuneler oluşturmuş ve bu numuneler üzerinde kapilarite deneyleri yapılmıştır. 28 günlük ve 1 yıllık olmak üzere yaptığı bu çalışmasında sırasıyla, 0.0094-0.006-0.011-0.016-0.0175 cm/dak^{1/2} ve 0.0069-0.0048-0.0066-0.0078-0.0095 cm/dak^{1/2} olarak kapilarite katsayılarını belirlenmiştir. Numune yaşı arttıkça kapilarite katsayılarının da düştüğünü göstermiştir.

4.6. Tuğla Tozunun Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkileri

Tuğla tozu atıklarının çimento ile yer değiştirerek kullanımı ile oluşturulan harçların betonarme donatısını koruma aktivitesini belirlemek üzere polarizasyon direnci (R_p), açık devre potansiyeli (E_{adp}), korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) ve korozyon hızı (mpy) değerleri belirlenmiş, sonuçları ve literatürdeki çalışmalarla karşılaştırmalı olarak bu bölümde incelenmiştir. Ancak çalışmanın bu bölümünde, dayanım tayinindeki gibi bütün tuğla tozu kullanım oranları için numuneler üretmek yerine, en düşük ve en yüksek tuğla tozu kullanım oranına sahip numunelerle, ara değerlerdeki seçilmiş ikame oranlarında numuneler üretilmiştir. Bunun nedeni ara değerlerdeki tuğla tozu atığı ikameli numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarına dikkate değer etkilerinin olmamasıdır.

Bölüm 3.3.9.3'te anlatıldığı gibi üretimleri yapılan silindirik donatılı korozyon numuneleri, bölüm 3.3.9.4'te anlatıldığı üzere korozyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler sonucu elde edilen verilerin ortalama değerleri Ekler bölümünde bulunan Çizelge A.1'de toplu olarak verilmiştir. Numunelerde tuğla tozu atığı ikamesinin polarizasyon direncine etkisi zamana bağlı olarak Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



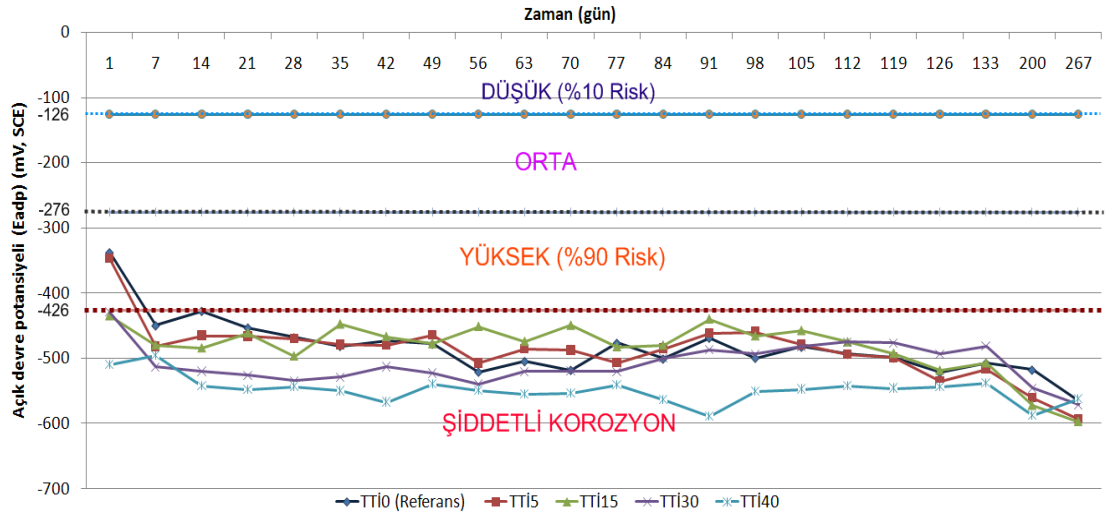
Şekil 4.5. Korozyon numunelerinde tuğla tozu atığı ikamesinin polarizasyon direncine etkisinin zamana bağlı olarak değişimi

Şekil 4.5, oksit filmi ve harcın çelik üzerindeki koruyucu etkisini beraberce değerlendirmek amacı ile düzenlenmiştir. Şekil 4.5'e göre ikame katkılı numuneleri değerlendirdiğimizde; başlangıçta en yüksek değeri TTİ5 numunesi (3.643 kΩ), en düşük değeri ise TTİ30 numunesi (1.53 kΩ) vermiştir. Genel olarak, tüm numunelerde iniş ve çıkışlar olmasına rağmen, TTİ5 numunesi daha düşük değer seyretmiş; TTİ15 ve TTİ40 numuneleri birbirine yakın, diğerlerine göre biraz daha yüksek Rp değerlerine sahiptirler. Buradan anlaşılabileceği üzere ikameli olmasına rağmen numunelerin harç üzerindeki koruyucu etkinliğini referansa göre arttırmış, fakat tuğla tozunun artışına bağlı net bir iyileşme görülmemiştir.

Değirmenci (2006)'nin çalışmasında; silis dumanını, PÇ 42.5 çimentosuna ağırlıkça %0, % 5, % 10 ve % 15'i yerine ikame edilerek kullanılmıştır. Korozyon akımının azalma, korozyon direncinin artış eğilimi gösterdiği tanık ve % 15 silis dumanı içeren örneklerin suda nispeten korozyona karşı daha dirençli olduğu görülmektedir. Bununla beraber bütün numunelerde ölçüm sonuçlarının geniş bir dağılım aralığında farklılıklar göstermesi, korozyon hızının her numune için değişken olduğunu göstermektedir. Bu durum lokalize korozyonun karakteristik özelliği şeklinde yorumlanmıştır. Ölçüm sonuçlarının geniş bir dağılım aralığında farklılıklar göstermesi bizim yaptığımız çalışmanın sonuçlarıyla örtüştüğünde belirtisidir.

NaCl çözeltisi içerisinde, referans numunesinin ikamelilere göre daha düşük R_p değerlerine sahip olması, tuğla tozunun harcın donatı korozyon koruyucu etkinliğini arttırmakta fayda sağlayacağı söylenebilir.

Açık devre potansiyellerinin zamana göre değişimi Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Korozyon numunelerine ait tuğla tozu atığı ikamesinin açık devre potansiyel değerlerine etkisinin zamana bağlı değişimi ve korozyon durumları

Çizelge 2.6'yı baz alarak oluşturulan Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, açık devre potansiyel değerlerinde tuğla tozu ikameli korozyon numuneleri referans numunelerle karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, bütün katkı oranları ve referans numune için -426 mV'tan daha negatif değerler sergilediğinden şiddetli korozyon bölgesinde yer almışlardır. Çizelge 2.5'e göre değerlendirdiğimizde ise, değerler -270 mV'dan daha negatif çıktığı için, %90'dan daha büyük olasılıkla aktif korozyon bölgesi içerisinde çıktığı görülmüştür. Deney sürecinin başlangıcında numunelerin potansiyel değerleri arasındaki fark net bir şekilde belirgin iken, son günlere doğru bu değerler birbirlerine yaklaşmıştır. Şekil 4.6'ya göre değerlendirirsek, tüm numunelerin -426 mV'dan daha negatif olduğu için, şiddetli korozyona sahip olduğu anlaşılabılır. Yine de referansa göre bir sıralama yapacak olursak, TTİ5 ve TTİ15 numunelerinin referansa göre daha az korozyona maruz kaldığı, TTİ30 ve TTİ40 numunelerinin ise referansa göre daha fazla korozyon sergileyeceği yani korozyona daha dayanıksız oldukları söylenebilir. Bu sıralamaya

rağmen en düşük ve en yüksek E_{adp} değerleri arasında 100 mV'luk bir fark gözlemlenmiştir.

Sancak (2005)'in yaptığı çalışmasında, bims agregası ile üretilen taşıyıcı bimsbetona (BB) ve normal yoğun agrega ile üretilen normal betonlara (NB), silis dumanı %0-5-10 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu numuneleri %7 NaCl çözeltisinde ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz bırakarak, 10 ve 17 çevrim sonundaki donatı korozyonuna karşı koruma etkinliğinin araştırılmasını yapılmıştır. 10 çevrim sonunda normal beton değerleri, -614.2, -578.4, -555.2 mV ve bimsbeton değerleri, -552.0, -537.4, -540.0 mV olarak bulunmuştur. 17 çevrim sonunda normal beton değerleri, -663.2, -629.2, -640.6 mV ve bimsbeton değerleri, -532.2, -525.0, -530.8 mV olarak bulunmuştur. Tüm numunelerin değerleri, -426 mV'un negatif yönünde daha fazla olması bakımından bu çalışmayla benzerlik taşır.

Yalçın (1996)'ın kolemanitin %0 - 1.0 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Oluşturulan beton bloklar %3.0 NaCl içeren tuzlu su içine daldırılmıştır. Tuzlu su içinde 180 gün süre ile statik potansiyel değerleri ölçülmüştür. Sonucunda, kolemanit katkılı da -46 ile -130 mV arasında ve katkısızlarda -60 ile -350 mV olarak bulmuştur. Her 10 günde yaptığı ölçümlerinin grafiği değişken aralıklarda çıkması yönüyle, bizim yaptığımız çalışmaya benzerlik taşıdığı söylenebilir.

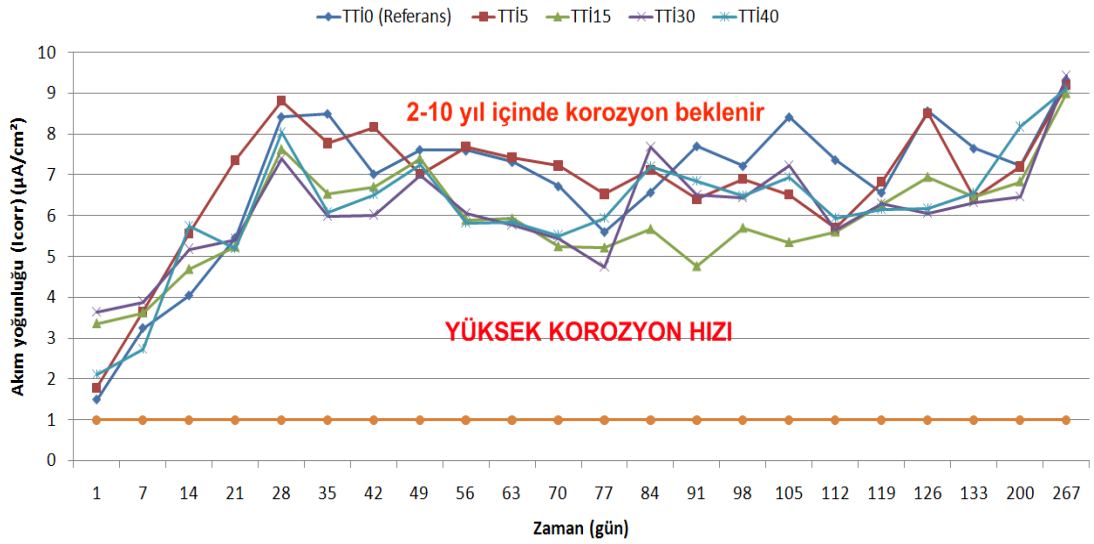
Asan ve Yalçın (2003)'nin uçucu külün %30 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek, çeşitli klorür konsantrasyonlardaki iki grup beton numunesi üzerinde kullanılmıştır. Korozyon hızı deneyleri klorür katılmış ve katılmamış beton numuneleri arasındaki korozyon potansiyellerinin ölçümlerini, 180 gün süre ile yapılmıştır. Sonuç olarak, buldukları grafik değerlerinin -100 ile -800 mV arasında çıkmıştır.

Keleştemur (2002)'un beş ayrı ildeki fabrikalardan alınan PKÇ/B 32.5 R türü çimentosunun, oksit kompozisyonundaki farklılıklardan dolayı korozyon hızı üzerine etkisini araştırmıştır. Bu çalışmasında, korozif bir ortam oluşturabilmek beton numunelerin karışım suyuna %3 oranında NaCl ilave edilerek beş grup halinde, 90

gün boyunca deneyler yapmıştır. Bulduğu sonuçlarda, -300 ile -700 mV arasında değerler çıkmıştır.

Değirmenci (2006)'nin silis dumanının %0-5-10-15 oranlarında ikameli örnekleri üzerinde yaptığı çalışmasında, 195 gün boyunca, %3.5'luk tuzlu suda beklemesi sonucu, açık devre potansiyellerinin zamana göre dağılım grafiği çıkarılmıştır. Grafik değerlerinin -400 mV ile -550 mV arasında çıkması ve değişken aralıklarda olması yönüyle, bizim yaptığımız çalışmaya benzerlik taşıdığını söylememiz mümkündür.

Korozyon akım yoğunluğunun zamana göre değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Korozyon numunelerinde tuğla tozu ikamesinin korozyon akım yoğunluğuna etkisinin zamana bağlı değişimi

Şekil 4.7 incelendiğinde değerler her ne kadar farklı da olsa, Şekil 4.5'deki silindirik korozyon numunelerine ait polarizasyon direnç değerlerinin zamanla değişimi grafiğiyle ters orantılı olduğu açık şekilde görülmektedir. Korozyon akım yoğunluğu ile polarizasyon direncinin bu şekilde ters orantılı olması, Bölüm 2.5.2.1.3'te anlatıldığı gibi ve Denklem 2.15'te gösterildiği üzere R_p (polarizasyon direncinin) kullanımından kaynaklanmaktadır. Bu durum grafiklerin birbiri ile karşılaştırılmasından da kolay bir şekilde görülebilir. Mesela, Şekil 4.5'te polarizasyon direnci grafiğindeki düşük değerlerin, Şekil 4.7'deki akım yoğunluğu grafiğinde en yüksek değerlere ulaştığı, ya da tam tersi yüksek olan değerlerin düşük değerlere indiğini görüyoruz. Şekil 4.5'deki grafikte numunelerin grafik

izgilerinin birbirlerine yaklaştığı yerde, Şekil 4.7 grafiğinde uzaklaştığı ya da tam tersi uzaklaştığı yerde, birbirine yaklaştığı gözlenmiştir.

Şekil 4.7’de ikameli numuneleri kendi aralarında değerlendirdiğimizde; birinci gün ölçümlerinde en yüksek değer TTİ30 numunesine, en düşük değer ise TTİ5 numunesine aittir. Genel olarak, tüm numunelerin I_{corr} (korozyon akım yoğunluğu) inişli ve çıkışlı değgerlere sahip olmasına rağmen, birbirlerinden çok farklı olmayan eğriler oluşturmuşlardır. Referans numunesine göre değerlendirirsek, başlangıçta tüm numuneler referanstan daha yüksek değer almış, ilerleyen zamanda referans numunesinin akım yoğunluğu değerleri, ikamelilere göre ve genel olarak, daha yüksek değerlerde çıkmıştır. Fakat tuğla tozunun artışına bağlı olarak, korozyon akım yoğunluğuunda net bir iyileşme gözlenememekle birlikte, 70. Günden sonra en düşük değerler %15 tuğla tozu ikameli numunelerde elde edilmiştir.

Şekil 4.7’deki değişimler zamana bağlı olarak incelendiğinde, genel olarak tüm tuğla tozu atığı ikame oranları için zamanla I_{corr} (Korozyon akım yoğunluğu) değerleri birbirlerine çok yakın seyretmiş, bu değerler 21. günden sonra $4-10 \mu A/cm^2$ değerleri arasında yer aldığı gibi, ölçüm sürecinin sonuna doğru tüm numunelerin eğrilerinin birbirlerine yaklaştığı gözlenmiştir. Değerlerin ilk 28 gün süresince artış gösterip daha sonra bir düşüş eğilimi sergilemesi ve 200 - 267. günler arasında yine artış eğilimi göstermesi, ilk 28 günlük süreçte harç içerisindeki elik donatının antipas boyasız bırakılan bölümde pasif tabakanın oluşması nedeni ile korozyona karşı direncin artması ile açıklanabilir.

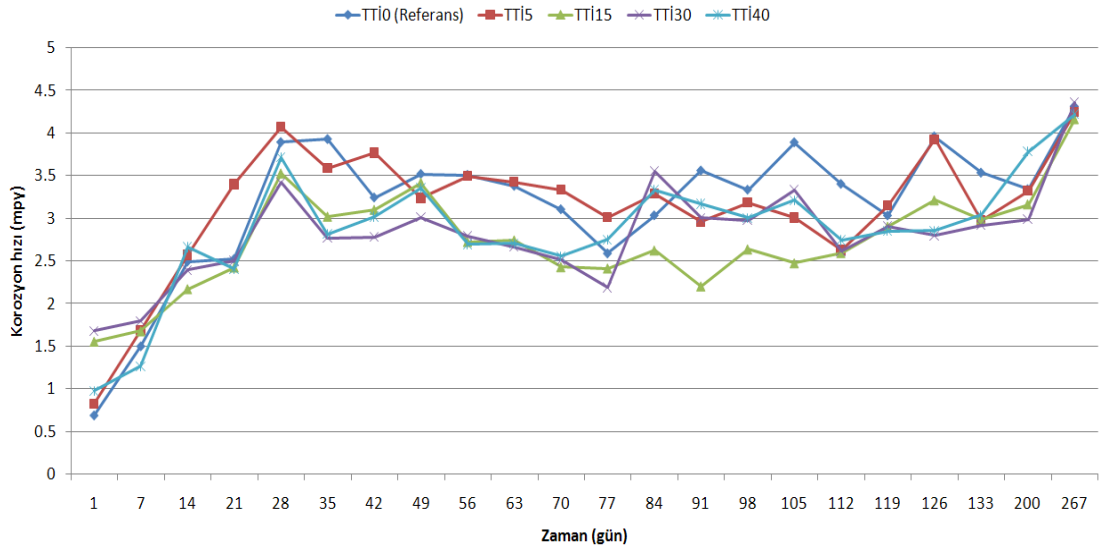
Çizelge 2.17 gözönünde bulundurularak bir değerlendirme yapıldığında, numunelerin korozyon akım yoğunluğu 1. günden itibaren $1 \mu A/cm^2$ ’in üzerinde seyretmesi yüksek korozyon hızının varlığına işaret olduğu öngörüldüğü gibi izelge 2.8’de birlikte değerlendirilirse, tüm numunelerin değerleri $1.0 - 10.0 \mu A/cm^2$ arasında olduğu için 2-10 yıl içinde korozyon beklenebilir (Erdoğdu, 2003; Yalçın ve Koç, 2004). TTİ15-30-40 numuneleri, uzun zaman aralıklarında (28 ile 200 günler), referansın altında değer verdikleri için referansa göre akım yoğunluğuunun düşük olduğuunu, TTİ5 numunesinin ise referansa benzer oranlarda hareket ettiği için referansla aynı korozyon akım yoğunluğuuna sahip olduğu söylenebilir.

Haberal (2010)'ın; uçucu külün %0-15-30-45 oranlarında ikame katkılı olarak ürettiği numuneleri üzerinde, 350 saat boyunca yaptığı çalışmada, 0 ile 0.60 amper arasında inişli-çıkışlı korozyon akımı değerleri belirlemiştir. İkame katkılı numunelerin korozyon akımı değeri, referans numunesinden genel olarak daha az değerlerde seyretmiştir.

Yiğiter (2008)'in uçucu külü ve yüksek fırın cürufunu %0-15-30-45-60 oranlarında ikame katkılı olarak ürettiği numuneleri üzerinde 400 çevrim yaparak oluşturduğu deneysel çalışmada, uçucu külün değerlerini, 0.050 ile 1.961 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında ve yüksek fırın cürufunun değerlerini ise, 0.039 ile 1.326 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında, inişli-çıkışlı korozyon akımı değerleri ile belirlemiştir. İkame katkılı numunelerin korozyon akımı değeri, referans numunesine göre değerlendirdiğimizde; bazı çevrimlerde düşük çıktığı gibi bazılarında ise yüksek çıkmıştır.

Yamaç (2010)'ın; silis dumanı ile ilgili yaptığı korozyon çalışmada, silis dumanı/toplam bağlayıcı oranlarına göre beton numunelerini oluşturmuştur. Bu oranları 0.0 - 0.03 - 0.075 - 0.012 - 0.015 olacak şekilde, silis dumanlarını ilave etmiş ve korozif bir ortam elde edebilmek için NaCl çözeltisi içerisinde bekletilerek 1400 gün boyuncaki ölçümleri yapılmıştır. Bulduğu değerler, 0.023 ile 0.224 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasında, inişli-çıkışlı olarak değişken aralıklarda korozyon hızını bulmuştur.

Korozyon hızının zamana göre değişimi ise Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Korozyon numunelerinde tuğla tozu atığı ikamesinin korozyon hızına etkisinin zamana bağlı değişimi

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, korozyon hızının değerleri her ne kadar farklı olsada korozyon akım yoğunluğundaki Şekil 4.7’de grafik eğim çizgileriyle birbirlerine eşit olması, bunların doğru orantılı olduğunu gösterdiği gibi ve devamında polarizasyon direnç ölçüleriyle de (Şekil 4.5) ters orantılı olduğu açık bir şekilde göstermiştir. Korozyon hızının bu şekilde doğru orantılı ve ters orantılı olması, Bölüm 2.5.2.1.3’te anlatıldığı üzere, Denklem 2.15’te gösterildiği gibi R_p (polarizasyon direncinin) kullanımından ve Denklem 2.16’da gösterildiği gibi I_{corr} (Korozyon akım yoğunluğu) kullanımından kaynaklanmaktadır. Çoğu kaynaklarda, korozyon hızı olarak; korozyon akım yoğunluğu şeklinde ifade etmişlerdir. Açık olarak ifade edilirse, korozyon akım yoğunluğu değerlerini bulmak suretiyle bu değerler üzerinden korozyon hızlarını tahmin etmişlerdir.

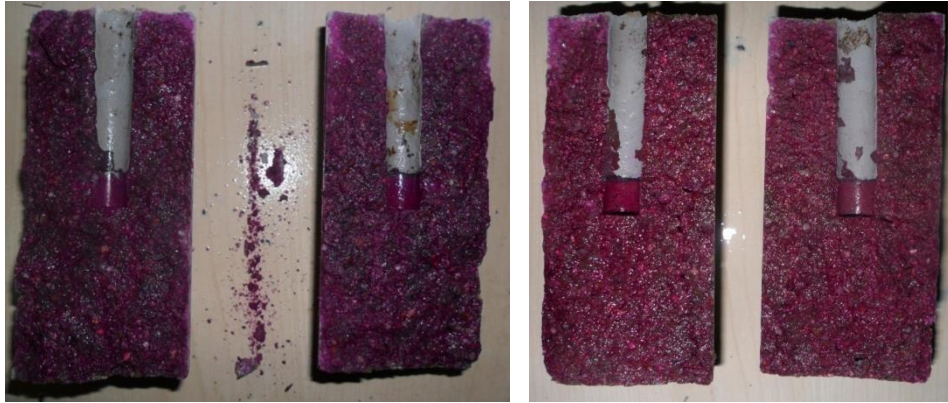
Şekil 4.8’de tuğla tozu atığı ikameli ve referans numuneleri değerlerinin, hem kendi aralarında hem de birbirleriyle yaptıkları iniş ve çıkışlar Şekil 4.7’ye benzer olduğundan ayrıca bahsedilmeye gerek duyulmamıştır.

Şekil 4.8’deki değişimler zamana bağlı olarak incelendiğinde, genel olarak tüm tuğla tozu atığı ikame oranları için zamanla korozyon hızı (mpy) değerleri birbirlerine çok yakın seyretmiş, bu değerler 21. günden sonra 2 - 4.5 mpy değerleri arasında kaldığı gibi, ölçüm sonunda tüm numuneler 4.16 - 4.38 mpy aralığında birbirine çok yakın dağılım göstermiştir.

TTİ15-30-40 numuneleri, uzun zaman aralıklarında (14.–77. ile 91.–267. arası günler), referansın altında değer verdikleri için referansa göre korozyon hızının mpy cinsinden düşük olduğunu, TTİ5 numunesinin ise referansa benzer oranlarda hareket ettiği için referansla aynı korozyon hızına sahip olabilir.

4.7. Karbonatlaşma Derinliğine Tuğla Tozu Atığı Kullanımının Etkisi

Silindirik numuneler üzerinde yarma deneyi yapılarak elde edilen parçalar üzerinde Bölüm 3.3.10’da anlatıldığı gibi karbonatlaşma deneyi yapılmıştır. NaCl çözeltisi ortamında 267 gün bekletilen numunelerden Şekil 4.9’daki gibi örnek numuneler ortaya çıkmıştır. Örnek şekillerden de anlaşılacağı üzere solüsyonun sıkıldığı tüm yerler pembe görünüm kazanmış, renksiz bölgeler kalmadığı görülmüştür. Tüm ikameli ve referans numuneleri hiçbirinde renksiz bölgeye rastlanmamıştır. Çizelge 3.11’den anlaşılacağı üzere silindirik numune harçlarının pH’ı 10’nun üstünde olduğu, bu renk değişimiyle, numunelerde karbonatlaşma olayının gerçekleşmediği sonucuna varılmıştır. Bunun nedeni, %5 NaCl içeren çözeltide bekletilen numunelere, CO₂ gazı ulaşamamış olmasından kaynaklanabilir. (Agar, 2009; Öntürk, 2011).



Şekil 4.9. Donatı çubukları çıkartılmış referans ve tuğla tozu ikameli numunelerin karbonatlaşma değerlendirmeleri

Sancak (2005)’ın yaptığı çalışmasında, bims agregası ile üretilen taşıyıcı bimsbetona (BB) ve normal yoğun agrega ile üretilen normal betonlara (NB), silis dumanı %0-5-10 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu numuneleri

%7 NaCl çözeltisinde ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz bırakarak, karbonatlaşma derinliklerinin araştırılması yapılmıştır. Normal beton değerleri, 2.48, 3.70 ve 6.26 mm ve bimsbeton değerleri, 2.79, 3.13 ve 3.24 mm olarak belirtilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tuğla tozu atığının ikame olarak kullanıldığı çimentoların donatı çeliği korozyonuna karşı koruma etkinliğinin araştırıldığı bu tez çalışmasında, Manisa ili Turgutlu ilçesinde yer alan tuğla fabrikalarından temin edilen tuğla tozları kullanılmıştır. Üretilen numunelerin fiziksel, mekanik ve elektrokimyasal özelliklerindeki değişimlerin belirlenebilmesi için yapılan deneyleri ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Referans ve tuğla tozlu çimento hamurlarının standart kıvam suyu ihtiyacı, TTİ5 numunesinde en az, TTİ40 numunesinde en fazla olduğu, sadece TTİ5 numunesi referanstan daha az standart kıvam suyu ihtiyacı sergilemiştir. Genel olarak, tuğla tozu ikame oranı arttıkça kıvam su ihtiyacının da artma eğilimi gösterdiği söylenebilir.

Tuğla tozlu ve referans çimento hamurlarının priz başlama ve priz sona erme süreleri, tüm numunelerin de TS EN 197-1 standartında verilen en az 1 saat ve en çok 10 saat sınır değerleri arasında yer aldığı görülmüştür. Priz başlangıç ve bitiş sürelerinde, TTİ5 numunesi başlangıçta referanstan yüksek (03:57) çıksa da priz sonu dikkate alındığında en düşük TTİ5 numunesi (04:47), en yüksek TTİ40 numunesi (07:45) olarak tespit edilmiştir. Genel olarak tuğla tozu artışına bağlı olarak, priz başlama ve bitiş sürelerinde bir artış görülmüştür.

Çimento hamurlarında tuğla tozu ikamesinin genleşmeye bir etki yapmadığı, TTİ5-10- 15 numunelerin referansla aynı değere sahip oldukları, diğerlerinin ise sadece 1 mm arttığı görülmüştür. Tüm numunelerin hacim genleşmeleri, TS EN 197-1’de verilen sınır değerinin (<10 mm.) çok altında bulunduğundan standarda uygun katkılı çimentolar elde edilmiştir. Bu sebeple çimento ikame maddesi olarak tuğla tozlarının kullanımı, hacim genleşmelerini olumsuz etkilememiştir.

Tuğla tozu ikameli ve ikamesiz taze çimento harçlarında kıvam suyu ihtiyacı bakımından, TTİ5 numunesi referansla aynı değerde iken en yüksek kıvam suyu ihtiyacı TTİ40 numunesinde gözlenmiştir. Genel olarak tuğla tozu ikame oranı arttıkça, taze harç kıvam su ihtiyacı da artmaktadır.

Oluşturulan prizmatik numunelerde; su emme ve porozite bakımından, TTİ5 numunesinin su emme ve porozite değeri referansın biraz üstünde çıktığı ve diğer numunelere göre daha düşük değerde kaldığı görülmüştür. En olumsuz değeri ise yine TTİ40 numunesi vermiştir. Tuğla tozu oranı arttıkça su emme oranının arttığı yani ikameli numunelerin referans numuneye göre daha geçirimli bir harç elde edilmesine neden olmuştur. Görüldüğü üzere, referans numunesinin diğer numunelere göre, geçirimlilik konusunda, daha üstün olduğu bununla birlikte TTİ5 numunesi referansa en yakın su emme ve porozite değerlerine sahiptir.

Tüm çimento prizmalarındaki üç yoğunluk değerleri içinde en düşük olanı TTİ40 numunesi, en yüksek olanı ise Yığın ve DKY yoğunluğunda TTİ5 numunesi iken, birim ağırlıkta ise TTİ25 numunesidir. Genel olarak ikame oranının artışına bağlı olarak DKY ve Yığın yoğunluk değerleri azalma eğilimindedir. Yığın ve DKY yoğunluklarına göre eğilimi bozan, TTİ5 numunesi referans dâhil tüm numunelerden daha yüksek, yoğunluk değerlerine sahiptir.

Elde edilen eğilme dayanımlarına göre, TTİ5 numunesi diğerlerine göre daha yüksek puzolanik özelliğinden dolayı 7. gün 6.22 N/mm^2 ve 28. gün 7.28 N/mm^2 'lik eğilme dayanımına sahip olarak, referans dâhil tüm numunelerden yüksek çıkmıştır. 7 ve 28. günlük en düşük değerler, TTİ40 numunesinde, sırasıyla 3.97 N/mm^2 ve 4.66 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı bakımından TTİ5 numunesi çimento ile gerçekleştirdiği, diğerlerine göre daha yüksek, puzolanik özelliğinden dolayı 7. gün 32 N/mm^2 ve 28. gün 50.22 N/mm^2 basınç dayanımı değerlerini almış ve 7. günlük dayanımı referanstan düşük kalmıştır. 28. Günlük numunelerde TTİ5 numunesi referans dâhil tüm numunelerden yüksek basınç dayanımı sergilemiştir. En düşük değer yine TTİ40 numunesinde 7 ve 28. günlerde sırasıyla 16.14 N/mm^2 ve 21.43 N/mm^2 olarak elde edilmiştir. Tuğla tozu ikame oranına bağlı olarak doğrusal bir düşüş izlenmemiş olsa da, bir azalma eğilimi gözlenmiştir. Dayanımlardaki bu düşüş ve yükselmeleri; harçlarda kullanılan karışım su miktarları, kütlece su emme yani porozite oranları ve yoğunluk değerlerinin de etkili olduğu söylenebilir. TTİ5 numunesinin eğilme ve basınç dayanımları bakımından en az referans ile benzer özellik taşıması nedeni ile, %5'lik tuğla tozu atığının çimento ile yer değiştirilerek kullanımında bir sakınca görülmemiştir.

Kapiler su emme değerlerine göre; TTİ5 numunesi puzolanik ve yoğunluk özelliklerinden dolayı 7. gün 1.02 ve 28. gün 0.93 kapiler su emme katsayısı değerleri sergilemiş, referans dâhil tüm numunelerden daha düşük değerler vermiştir. En yüksek değeri ise TTİ40 numunesi 7 ve 28. günlük olmak üzere sırasıyla 12.27 ve 7.6 değerleri ile göstermiştir. Her ne kadar tuğla tozu oranına bağlı olarak doğrusal bir yükseliş izlemese de, kapiler su emme katsayıları, tuğla tozu atığı ikame oranına bağlı olarak yükselme eğilimi sergilemiştir. TTİ5 numunesi basınç ve eğilme dayanımlarında olduğu gibi kapiler su emme katsayıları bakımından da yeterli niteliklere sahiptir.

Ø5x10 cm boyutlarındaki silindirik donatılı korozyon numunelerinin elektrokimyasal özellikleri için korozif bir ortam oluşturmak amacıyla, %5 oranındaki NaCl içeren çözeltide 267 gün bekletilmiş ve bu güne kadar haftada bir ölçümler yapılmıştır.

Açık devre potansiyel (E_{adp}) değerleri bakımında; TTİ15 numunesi daha uzun zaman sürecinde, en olumlu potansiyel değerleri sergilemiştir. En olumsuz potansiyel değerlerine sahip olan, %40 tuğla tozu ikame edilen, TTİ40 numunesidir. Genel olarak, referansa göre değerlendirilirse, TTİ5 ve TTİ15 numunelerinin nispeten daha olumlu E_{adp} değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Ancak tüm numunelerin ASTM C 876 (2004)'ya göre -270 mV'dan daha negatif E_{adp} değerlerine sahip olmaları nedeni ile % 90'dan daha büyük olasılıkla aktif korozyona uğradığı ve -426 mV'dan da daha küçük olduğu için şiddetli korozyona uğradığı kanısına varılmıştır.

267 gün süresince belirli zaman aralıklarında yapılan, korozyon akım yoğunluğu, polarizasyon direnci ve korozyon hızı ölçümleri sonucunda TTİ5 numunesinin genel olarak, uzun zaman aralığındaki korozyon akım yoğunluğu değerleri, $9 \mu A/cm^2$ - $5.5 \mu A/cm^2$ arasında değişerek, diğer numunelere göre daha yüksek değerler görülmüştür. TTİ15 numunesinin ise genel olarak, uzun zaman aralığındaki korozyon akım yoğunluğu değerleri, $7.5 \mu A/cm^2$ - $4.5 \mu A/cm^2$ arasında değişerek, diğerlerine göre daha düşük değerler sergilemiştir. Tüm numunelerin değerleri $1.0 - 10.0 \mu A/cm^2$ arasında olduğu için 2-10 yıl içinde korozyon beklenebilir. Ancak pasif film tabakası oluşana kadar yüksek akım yoğunluğu değerleri görülmesi normaldir. TTİ15- TTİ30- TTİ40 numunelerinin korozyon hızları referans numuneden düşük değerlerde seyrettiği ve TTİ15 numunesinde bu hızın, en düşük seviyede kaldığı

görülmüştür. Polarizasyon direnci ne kadar çok ise korozyona maruz kalma etkisi o kadar zayıfladığına göre, TTİ15 numunesinin polarizasyon direnci en yüksek, korozyon akım yoğunluğu ise en düşük değerlerdedir. Aynı zamanda TTİ15 numunesinin açık devre potansiyeli bakımından daha olumlu değerlere sahip korozyona olmasıyla örtüşmektedir. TTİ5 numunesinin referansla hemen hemen aynı hızda korozyona uğraması, bu numunenin korozyon dayanımı bakımından diğerlerine göre, istenen nitelikte olmadığı anlamına gelmektedir. TTİ15 numunesinin, TTİ5'e göre fiziksel ve mekanik değerleri düşük çıksada, korozyon değerleri bakımından olumlu davranış sergilediği söylenebilir.

Harç karışımı içerisinde CEM I 42.5 R Çimentosu yerine %5 oranında tuğla tozu atığının kullanımı ile hem korozyon dayanımı, hem de mekanik özelliklerle bakımından; tuğla tozu ikamesiz CEM I 42.5 R'ye göre üstün davranışı tuğla tozunun puzolanik oluşu nedeni ile mekanik özelliklere etkisinin, 60 ve 90 günlük kür uygulaması sonrasında daha belirgin olarak ortaya çıkacağı, 28 günden daha ileri yaşlar için yeni araştırmalar yapılmasında yarar vardır. Toz halde beton karışımına katılmasıyla harç karışımlarındaki sonucu yani yapı çeliğinin korozyonunu, kontrol altına alması beklenebilir.

Yarma deneyi düzeneği yardımı ile iki parçaya ayrılan numuneler üzerinde, karbonatlaşma deneyi yapılması sonucu; ikameli ve referans numuneleri hiçbirinde renksiz bölgeye rastlanmadığı görülmüştür. Silindirik numunelerin pH'ı 10'nun üstünde olduğu, bu renk değişimiyle, numunelerde karbonatlaşma olayının gerçekleşmediği sonucuna varılmıştır.

Tuğla fabrika atıklarının fabrika dışına taşınması hem çevre hem de ekonomik anlamda düşündürücüdür. Yapılan inceleme ve araştırmalarda atık miktarının toplam üretimin %10'u dolaylarında olduğu için tuğla tozunun çimento içerisinde değerlendirilmesiyle tüm bu atıkların önüne geçilmesi mümkün olabilecektir.

Çimento harcı üretiminde, tuğla tozunun katkı şeklinde kullanılması atıkların değerlendirilerek ekonomik katkı sağlaması ve pahalı bir malzeme olan çimento sarfiyatının belirli oranda azalması açısından uygun olacağı düşünülmektedir.

Farklı puzolanlarla birlikte tuğla tozu ikameli harçlar üzerinde ileri araştırmaların yapılmasında yarar vardır. Tuğla tozunun, beton içerisinde kullanılarak betonun özelliklerine etkisi ve sıva harcında kullanılabilirliğinin araştırılması yerinde olacaktır.

KAYNAKLAR

- Agar, S., 2009. Faklı Özellikte Puzolan Katkılı Harçların Duarbiliteye Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81s, İstanbul.
- Akçaözoğlu, K., 2007. Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı ve Birim Kısalma Üzerindeki Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 140s, Adana.
- Akman, M.S., 1990. Yapı Malzemeleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası, 1408, 162s, İstanbul.
- Akman, M. S., (1992), Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 236s, İstanbul.
- Aksin, E., 2007. Endüstriyel Atıklarının Tuğla ve Kiremit Üretiminde Değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 89s, İzmir.
- Aköz, F., Yüzer, N., Koral, S., 1996. “Betonarme Çeliğinin Korozyonuna Sodyum Klorür ve Magnezyum Klorürün Etkileri”, V. Korozyon Sempozyumu, Adana, 115.
- Aköz, F. Ve Yüzer, N.,1998. “Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Deneyler İle Araştırılması”, 6. Korozyon Sempozyumu, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 50.
- Andrade, C., 1993. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements, Cement Concrete Research, 23, 724-742.
- Arslan, M., Kırgız, M., S., 2004. “Mermer ve Tuğla Fabrikaları Atıklarının Mineralojik Katkı Olarak Kullanımının Araştırılması, beton özelliklerine etkilerinin belirlenmesi”, TÜBİTAK, 101I042 -3027, 31, 32.
- Asan, A., 2002. “Yumuşak Çelikler Üzerinde Polipirol Kaplama Koşullarının Araştırılması”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22-65.
- Asan, A. ve Yalçın, H., 2003. Uçucu Kül Katkısının Betonarme Demirlerinin Korozyonu Üzerine Etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi, Ankara, 16(1): 47-54.
- ASTM C 618, 1994. Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 5-11.
- ASTM C 876-91, 2004. Test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. Annual Book of ASTM Standards. 03.02, 11-16. American Society for Testing and Materials.

- ASTM C 1202, 1997. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, The American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- ASTM G 59,1991. Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, The American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- Atakay, O., 2006. Uçucu Küllerin Katkılı Çimento Üretiminde Kullanılması-Tane İnceliği ve Katkı Miktarının Etkisi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Ankara.
- Avcı, E., 1988. Betonarme Yapılardaki Çeliklerin Korozyonuna Puzolanların Etkisi. 1. Korozyon Sempozyumu Tebliğler Kitabı, 345-353, Ankara.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2002. Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite). Ecem Ofset Matbaacılık, 282s, İzmir.
- Baradan, B., 1996, Pişmiş Toprak Sanayi Atıklarının Değerlendirilmesi, Tuğla ve Kiremit Endüstrisi Dergisi, Temmuz-Ağustos 1996, 8-9, Manisa.
- Bäumel, A. 1959. The effect of additives on the corrosion behavior of steel in concrete. Zement-Kalk-Gips.
- Bıyık, M., 2007. BaCO₃ ve SrCO₃ Katkısıyla Tuğla Üretiminde Çiçeklenmenin Giderilmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü., Yüksek Lisans Tezi, 155s, Afyonkarahisar.
- Bilim, C., 2006. Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 206s, Adana.
- Boğa, A.R., 2005. Uçucu Küllü Betonarme Elemanlarda Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Yöntemlerle Araştırılması. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s, Eskişehir.
- Ceran, A., 2008. Polimer Esaslı Lateks Katkının Çimento Harç Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, İstanbul.
- Choi, Y., Kim, J. & Lee, K. (2006). Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete. Corrosion Science, 48, 1733-1745.
- Cilason N., Kocagil, F., Aksöz, B., 1998. Betonda korozyon, Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, XIII. Teknik Kongre, İstanbul, 124-127.
- Çakar, B., 2009. Esnek Üst Yapılarda Tuğla Kırığı Atıkları Kullanımının Deneysel Olarak İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.

- Çakır, A. F., 1996. “Yüzey İşlemleri ve Korozyon”, V. Korozyon Sempozyumu Bildirileri, 6-9 Kasım 1996, Çukurova Üniversitesi, Adana, 124-138.
- Çavuş, B.Ç., 2008. Çimento Harcında Yüksek Fırın Cürufunun Basınç Dayanımına Etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, Ankara.
- Çelik, K., 2005. Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu ve Traslı Çimentolarla Üretilen Aynı Mukavemet Sınıfındaki Harçların Dayanım ve Dayanıklılığının İncelenmesi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 62s, İstanbul.
- Çelik, Ö., Yurter, G., Kan, S. ve Yeprem, H.A., 2004. Farklı Puzolanik Katkıların Çimento Harçlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. Doğu Üniversitesi Dergisi, 5 (2), 147-154.
- Çiftci, M.M., 2004. Samsun-Kavak Tuğla Ununun Çimento Harcında Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 55s, Ankara.
- Dayı, M., 2006. Doğal ve yapay Puzolanların Kompoze Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, Ankara.
- Değirmenci, A., 2006. Silis Dumanı Katkısının Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 89s, Ankara.
- Dehghanian, C. and Locke, C.E., 1982. Electrochemical Behavior of Steel in Concrete as a Result of Chloride Diffusion into Concrete Part 2, Corrosion, Nace, 38, September.
- Demir, A., 2008. Kiremit Kırığı Agregalı Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 198s, Eskişehir.
- Dengiz, E., 2009. Değirmisaz Kömür Üstü Atıklarının Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliği, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 52s, Kütahya.
- Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), 1993. Sanayi ve Çevre. Altıncı Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisasa Komisyonu Raporu. ISBN. 975-19-0713-6, Ankara, 24-29.
- Devlet Planlama Teşkilatı (DPT), 2001. Toprak Sanayi Hammaddeleri. Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisasa Komisyonu Raporu, Ankara, 2615, 626, 85-90.

- Doğan, Ü.A., 2008. Beton Bileşim Parametrelerinin Geçirimsilik Özellikleri ve Gömülü Çelik Donatı Korozyonuna Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 135s, İstanbul.
- Doruk, M., 1996. “Korozyonun Temel İlkeleri Üzerine”, V. Korozyon Sempozyumu Bildirileri, 6-9 Kasım 1996, Çukurova Üniversitesi, Adana, 1-31.
- Dönmez, B., Çiçek, T., Palabıyık, S., 2004. Betonarme Yapılardaki Korozyonun Doğal Organik Maddelerle Engellenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Araştırma Projesi Tezi, 8-11, 17, 40,41s, Ankara.
- Elyiğit, A., 2011. Bor Kaplamalı Betonarme Çeliğinin Korozyonuna Etkisinin İncelemesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, Isparta.
- Emrullahoğlu, C. B., Karademir, H., Emrullahoğlu, Ö.F., 2004. Tuğla Kırıklarının Tuğla Üretiminde Kullanımı, 5 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon 13-14 Mayıs 2004, İzmir, Türkiye.
- Erbil, M., 1996. “Korozyonun Önlenmesi”, Çukurova Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, V. Korozyon Sempozyumu, Adana, 224-237.
- Erdoğan, T.Y., 2003. “Beton”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık ve İletişim Anonim Şirketi, Hazır Beton Birliği Yayınları, 741s, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 2012. “Beton”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık ve İletişim Anonim Şirketi, Hazır Beton Birliği Yayınları, 741s, Ankara.
- Erdoğan, Ş., 2003, Betonda Donatı Korozyonu-Ölçümü ve İrdelenmesinde Yaygın Olarak Kullanılan Yöntemler ve Teknikler, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, İstanbul, 247-259.
- Erdoğan, K., Tokyay, M., Türker, P., 2003. Traslar ve Traslı Çimentolar (Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu), ArGe Enstitüsü, Türkiye Çimento Mühtasilleri Birliği, Ankara.
- Erdoğan, Ş., Kondratova, I.L., Bremner, T.W., 2004. “Determination of Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Using Open-Circuit Potential Measurements”, Cement and Concrete Research 34: 603-609.
- Erdoğan, E., 2006. Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 335s, İstanbul.
- Eriç, M., 2002. Yapı Fiziği ve Malzemesi, Kazmaz Matbaası, İstanbul.

- Görçiz, G., 2000. "Ülkemizde Tuğla ve Kiremit Endüstrisi", 2000'li Yıllarda Sağlıklı ve Güvenli Konutlar için Tuğla-Kiremit Paneli, TUKDER, Ocak, Ankara.
- Görhan, G., 2006. Hafif Yapı Blokları Üretiminde Uçucu Külün Kireç ve Çimento ile Birlikte Kullanımının Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 108s, Afyon.
- Güneyisi, E., Özturan, T. ve Gesoğlu, M., 2003. Farklı Çimento Tipleri Kullanılarak Üretilen Beton İçindeki Donatının Korozyonunun Hızlandırılmış Deney ile İncelenmesi, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, İstanbul, 237-246.
- Haberal, Y., 2010. Uçucu Küllü Betonlarda Klor İyonu Geçirgenliğinin ve Donatı Korozyonunun İncelenmesi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Eskişehir.
- Hamalı, Y., 2007. Metakaolin ve Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 45s, İstanbul.
- Hearn N., Hooton, R. D. and Mills, R. H., 1994. "Pore Structure and Permeability", Concrete and Concrete Making Materials, Edited by: Klieger, P. and Lamond, J., ASTM STP 169C, 240-262.
- Hoşhan, P., 1994. "Beton İçindeki Çeliğin Korozyonunun Üç Elektrot Yöntemi İle İncelenmesi", Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 50, Ankara.
- İsmail, M., Ohtsu, M., 2006. Corrosion Rate Of Ordinary and High Performance Concrete Subjected To Chloride Attack By AC Impedance Spectroscopy, Constructi on And Building Meterials, 20, 458-469.
- Jang, J.W. and Iwasaki, I., 1991. Rebar Corrosion Under Simulated Concrete Conditions Using Galvanic Current Measurement, Nace, Corrosion, 47, 11, November.
- Kaesche, H. (1959). Testing corrosion danger of steel reinforcement due to admixtures in concrete. Zement-Kalk-Gips.
- Kahyaoğlu, H., 1998. Betonarme Korozyonu Önlemek Amacıyla Uygulanabilir Yöntemlerin Geliştirilmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 191s, Adana.
- Karaman, S., 2006. Yapı Tuğlalarında Renk Oluşumu. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 9(1), 125-129.
- Kaynak, H., 1999. "Tuğla ve Gazbetonun Mühendislik Özellikleri, Ülke, Ekonomisindeki Yeri, Hammaddeler, Potansiyelleri, Avantaj ve Dezavantajları". Osman Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 5-19s, Eskişehir.

- Keleştemur, O., 2002. Doğu ve Güneydoğu Anadolu Bölgelerinde Üretimi Yapılan PKÇ/B 32.5 R Çimentosunun Betonarme yapılarıdaki Donatı Korozyonuna Etkisinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 102s, Elazığ.
- Keleştemur O. ve Yıldız S., 2005. Normal ve Silis Dumanı Katılarak Üretilen Betonlarda Donatı Korozyonuna Sodyum Klorür Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi , 17 (2), 277-286.
- Kılınçkale, F.M. ve Uyan, M., 1996. Tras Çimentolu Harçların Dayanım ve Dayanıklılığına Sülfatlı Çözeltilerin Etkisi. İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, Yazı 92, 1231-1242.
- Kırgız, M.S., 2007. Mermer ve Tuğla Endüstrisi Atıklarının Çimento Üretiminde Mineralojik Katkı Olarak Kullanılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 228s, Ankara.
- Köseoğlu, K., Bayça, S.U., Çiçek, T., 2008. Tuğla Atığının Tuğla Üretiminde Değerlendirilmesi. Celal Bayar Üniversitesi, Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1, 9.
- Kurugöl, S., 2010. Tarihi Kütahya Kalesi Tuğlalarının Mekanik Özelliklerinin ve Puzolanik Aktivitelerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi. Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22 (1), 13-26.
- Liam, K.C., Ray, S.K. and Nortwood, D.O., 1992. Chloride Ingress Measurement and Corrosion of Potential Mapping Study of a 24 year old Reinforced Concrete Jetty Structure in a Tropical Marine Environment, Magazine of Concrete Research, 44(160), 205-215.
- Locke, C.E. and Simon, A., 1980. "Electrochemistry of reinforcing steel in salt contaminated concrete", A symposium corrosion of reinforcing steel in concrete, ASTM Special Technical Publications, Philadelphia, 713 ASTM 3, 11.
- Mamaş, S., 2003. Alüminyumun Polipirrol Filmlerle Kaplanması ve Korozyona Karşı Etkinliğinin Belirlenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 6-18s, Ankara.
- Menekşe, C, 2008. Klorürlü Ortamlarda Betonarme Çeliğinin Korozyonuna Asetat ve Yapı Kimyasalının Etkisinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Adana.
- Mindess, S., Young, J.F., 1981. Concrete . Prentice-Hall Inc., New Jersey, 41-94.
- Montemar, M. F., Cunha, M. P., Ferreira, M. G. & Simoes, A. M., 2002. Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbondioxide and chlorides. Cement and Concrete Composites, 24, 45-53.

- Morris W., Vico A. and Vazquez M., 2004. Chloride İnduced Corrosion Of Reinforcing Steel Evaluated By Concrete Resistivity Measurements Electrochimica Acta ,49, 4447-4453.
- Müdüroğlu, M., 1999. Tuğla yapımında Kullanılan Kil Hammaddelerinin Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 18-34s, İstanbul.
- Nel Elektronik, 2013. Genel elektrokimya, korozyon, enerji depolama, sensörler, biyomedikal araştırmalar ve eğitim alanında tüm ihtiyaçlarınıza cevap verecek ideal bir cihaz. Erişim Tarihi: 20.06.2013. <http://www.nel.com.tr/Resim/150,v3jpg.png?0>
- Neville, A.M., 1981. Properties of Concrete. Longman Scientific & Technical, İngiltere, 36-115.
- Okucu, A., 1998. Bigaç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitiktüflerin Puzolanik Özellikleri. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1-44s, Balıkesir.
- Öntürk, S., 2011. Borojipsin Betonda Kullanılabilirliğinin Harç Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler İle Araştırılması. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Hatay.
- Özcan, M., 2000. “Organik kaplamalı metalik malzemelerde kaplama etkinliği ve metal korozyonunun belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 25.
- Özdamar, Z., Yavuz, B., 2005. “Türk Yapı Sektörü Raporu”, Yapı-Endüstri Merkezi, İstanbul, 70-77, 100-102, 147-160.
- Özkan, Ö., 2008. Yüksek Fırın ve Çelikhane Cürufu Katkılı Çimentolarla Üretilen Harçların Sülfat Dayanımı. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23, 1, 1-8.
- Postacıoğlu, B., 1986. Beton (Bağlayıcı Maddeler). Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- Pourbaix, M. 1973. Lectures on electrochemical corrosion. New York: Plenum Press. 271p
- Sancak, E., 2005. Silis Dumanı Katkılı Bimsbetonların Özellikleri. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 164s, Ankara.
- Shih-Cheng, P., Dyi-Hwa, T., Chih-Chiang, L. ve Chau, L., 2003. Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. Cement and Concrete Research, 33, 1749–1754.

- Sivaslı, Y., 2000. “Çeliğin Beton İçinde Korozyonu”, Türkiye Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara Şubesi, Teknik Bülten, Mayıs, 10.
- Stern, M., Geary, A.L., 1957. Journal of Electrochemical Society, January, 54-57.
- Sungur, I., 2009. Çimento Bazlı Harçlarda Aderans Dayanımı ve Durabiliteye Ortam Koşullarının Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107s, İstanbul.
- Süleyman Demirel Üniversitesi (SDÜ), 2012. Süleyman Demirel Üniversitesi İçme ve Kullanma Suyu Kuyularından Alınan Örneklerin İn-Situ ve Hidrojeokimyasal Analizleri. Erişim Tarihi: 05.08.2012. <http://jeotermal.sdu.edu.tr/tr/s-d-u-su-analizleri/2012-analiz-sonuclari-2318s.html>
- Şahin, Ş.E., 2008. Ham ve Kalsine Kolemanit Atıklarının Tuğla Yapımında Kullanım Olanaklarının Araştırılması. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, Kütahya.
- Şen, L., 2005. PÇ 42.5 ve PKÇ 32.5 Çimentolarla Üretilen Harçların Durabilite Özellikleri. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Antakya.
- Şimşek, O., 2009. Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayınevi, 263s, Ankara.
- Tokay, M., Çetin, B., 1991. "Preslenmiş Buhar Kürü Uygulanmış Uçucu Kül-Kireç Tuğlaların Dayanım ve Su Emme Özellikleri", Teknik Dergi, TMMOB İnş. Müh. Odası Yayın, 2, 385-394, İstanbul, Turkey.
- Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B. ve Altun, İ.A., 2009. Portland Kalkerli Çimento Bölüm I - Çimentoların Hazırlanması. İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, Yazı 309, 4717-4736.
- Türkmen, İ., Gavgalı, M., 2003. Influence of Mineral Admixture on the Some Properties and Corrosion of Steel Embedded in Sodium Sulfate Solution of Concrete, Materials Letters, 57, 3222-3233.
- TS 25, 2011. Doğal Pozolan (Tras)-Çimento ve Betonda Kullanılan-Tarifler, Gereklere ve Uygunluk Kriterleri. TSE, Ankara.
- TS 3526, 1980. Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 197 – 1, 2005. “Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar– Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1-7.
- TS EN 196-1, 2009. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini. TSE, Ankara.

- TS EN 196-3, 2002. “Çimento – Deney Metodları- Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1-7.
- TS EN 450, 1998. Betonda Kullanılan Uçucu Kül, Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü”, TSE, Ankara.
- TS EN 772-11, 2002. Kagit Birimler – Deney Metotları – Bölüm 1: Agrega ve Doğal Taş Kullanarak İmal Edilmiş Kagit Birimler – Kılcal Su Emmeye Bağlı Olarak Su Emme Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 990, 1995. Gaz ve Köpük Beton ve Hafif Agregalı Gözenekli Beton-Teçhizatın Korozyondan Korunmasını Değerlendirme Deney Metodları. TSE, Ankara.
- TS EN 1015-3, 2000. Kagit Harcı-Deney Metotları Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle), TSE, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2010. Beton – Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 7: Sertleşmiş Beton Yoğunluğu Tayini. TSE, Ankara.
- Uğur, T., 2011. Perge Antik Kentine Ait Mozaik Harçlarının Karakterizasyonu. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 187s, İstanbul.
- Ulusoy, A., 2008. Uçucu Kül-Tekstil Fabrikası Atık Külü ve Bazaltik Pomzanın Tuğla Üretiminde Katkı Olarak Kullanılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 149s, Kahramanmaraş.
- Ülger, E., 2006. Glikozun Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, Adana.
- Ülger, E., Kılıççeker, G., 2006. Glikozun Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkisi, X. Uluslar arası Korozyon Sempozyumu, Adana p. 346-351.
- Üncü, S. E., 2006. Kolofonun Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkilerinin Tahribatsız Elektrokimyasal Yöntemlerle İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Ankara.
- Üneri, S., 2002. Korozyonda Temel İlkeler. VIII. Uluslar Arası Korozyon Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 9-12 Ekim 2002, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, İstanbul, 1-28.
- Wheat, H. G., Eliezer, Z., 1985. Some Electrochemical Aspects of Corrosion of Steel in Concrete. Corrosion, 41 (11): 640-645.
- Yalçın, S., 1996. Kolemanitli Çimentoların Betonarme Demirlerinin Korozyonu Üzerine İnhibitif Etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Ankara.

- Yalçın H., Koç T., 2004. Betonarme Demirlerinin Korozyonu ve Önlenmesi. Kongre Yönetim Sistemleri Uluslararası Organizasyon yayıncılık Bilişim Hizmetleri Limited Şirketi, 270s, Ankara.
- Yalçın, H., Gürü, M., 2002. “Metallerin Korozyonu”, Malzeme bilgisi, Palme yayıncılık, Ankara, 173-183, 225-228.
- Yamaç, S., 2010. Silis Dumanı Katkılı Betonlarda Klorür Etkisinde Korozyon Oluşumu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113s, İstanbul.
- Yazıcı, B., Erbil, M., Dehri, İ., Tatlı, G., Galip, H., 1996. The Effect of Acetate Ion on the Corrosion of Iron inWeakly Alkaline Solutions. Chimica Acta Turcica. 24, 129-138.
- Yeğinobalı, A., 2001. “Katkılı Beton mu, Katkılı Çimento mu?”, Çimento ve Beton Dünyası, 5 (30): 33-35.
- Yeğinobalı, A. ve Ertün, T., 2009. Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar. Türkiye Çimento Mühtasilleri Birliği, Ar-Ge Enstitüsü, Fersa Matbaacılık, 48s, Ankara.
- Yetgin, Ş. ve Çavdar A., 2005. Doğal Puzolan katkı Oranının Çimentunun Dayanım, İşlenebilirlik, Katılaşma ve Hacim Genleşmesi Özelliklerine Etkisi. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17 (4), 687-692.
- Yıldırım, E., 2001. Çorum’da Kullanılan Tuğla Atıklarının Tekrar Değerlendirilmesinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78-83s, Ankara.
- Yıldırım, S.F., 2007. Puzolanik Zeolitin Çimentoda Katkı Uygunluğunun Araştırılması. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s, Hatay.
- Yıldız, K., 2008a. Farklı Tuğla Fabrikası Atıklarının Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliği, Makale, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, (2) 31-41.
- Yıldız, S., 2008b. Emet Bor İşletmesi Hisarcık Konsatratör Atıklarının Portland Çimentosu Özelliklerine Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, Afyon.
- Yılmaz, B., 2006. Na-CMC Polielektrolit ilavesinin Puzolanlı Çimento Özelliklerine Etkisi. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11, 143-154.
- Yılmaz, A.B., Dehri, İ., Erbil, M., 2003. Karma Suyu Ph Değişiminin Beton Basınç Dayanımına Ve Betonarme Demirinin Korozyon Potansiyeline Etkisi IV. Elektrokimya Günleri, Çukurova Üniversitesi, Adana, 146.

- Yiğiter, H., 2008. Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 301s, İzmir.
- Yüksel, A.N., Şişman, C.B., 2003. Tarımsal İnşaat. Trakya Üniversitesi, Tekirdağ Ziraat Fakültesi, Ders Kitabı, 278, 36, Tekirdağ.
- Yüzer, N., 1998. “Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanların Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi İle Araştırılması”, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 3-13, İstanbul.
- Yüzer, N., Aköz, F., 2003. “Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Deney Yöntemi ile Araştırılması”, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-2-3 Ekim 2003, İstanbul, 227-236.
- Zhang, J. and Lounis, Z., 2006. Sensitivity Analysis of Simplified Diffusion-Based Corrosion Initiation Model of Concrete Structure Exposed to Chlorides, Cement and Concrete Research. 36, 1312 -1323.

EKLER

Ek A. Çizelgeler

EK A. Çizelgeler

Çizelge A.1. Silindirik numunelerin elektrokimyasal ölçümlerine ait ortalama değerleri

Sindirik numune kodları	Elektrokimyasal parametreler	Zaman (Gün) Soundex Elde Edilen Ortalama LPR Değerler																					
		1	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70	77	84	91	98	105	112	119	126	133	200	267
TT00 (Referans)	Korozyon hızı (mpy)	0,69	1,15	2,492	2,522	3,89	3,926	3,242	3,518	3,807	3,378	3,104	2,987	3,033	3,558	3,333	3,888	3,401	3,031	3,957	3,833	3,339	4,309
	Rp (KOhms) [Polarizasyon direnci]	4,475	1,798	1,429	1,038	0,866	0,862	0,79	0,727	0,73	0,759	0,825	0,993	0,844	0,72	0,771	0,858	0,758	0,846	0,849	0,727	0,834	0,801
	Icorr (µA/cm²) [Aktif yoğunluğu]	1,494	3,249	4,048	5,463	8,427	8,803	7,023	7,82	7,697	7,317	6,823	5,803	6,571	7,708	7,219	8,421	7,387	6,585	8,571	7,662	7,229	9,328
	Measured open circuit (Eocp)																						
	(Aptik devre potansiyelleri)	-337,43	-449,48	-427,3	-452,86	-467,88	-481	-473,49	-477,87	-520,58	-504,38	-517,82	-478,41	-530,54	-488,44	-499,34	-482,31	-493,28	-498,17	-521,58	-507,14	-517,51	-586,05
	(mV SCE)																						
	TT05	Korozyon hızı (mpy)	0,829	1,689	2,571	3,4	4,072	3,69	3,769	3,241	3,5	3,429	3,336	3,015	3,29	2,959	3,188	3,011	2,831	3,152	3,929	2,975	3,327
Rp (KOhms) [Polarizasyon direnci]		3,843	1,624	1,018	0,757	0,629	0,714	0,68	0,789	0,731	0,746	0,77	0,853	0,783	0,869	0,804	0,855	0,937	0,831	0,851	0,867	0,788	0,805
Icorr (µA/cm²) [Aktif yoğunluğu]		1,794	3,688	5,588	7,385	8,821	7,777	7,185	7,02	7,889	7,427	7,228	6,53	7,125	8,409	8,901	8,522	5,699	8,827	8,511	8,443	7,204	9,193
Measured open circuit (Eocp)																							
(Aptik devre potansiyelleri)		-347,09	-481,77	-464,98	-466,13	-469,44	-478,98	-479,4	-464,13	-507,14	-485,68	-487,33	-507,01	-484,69	-481,75	-469,31	-479,02	-493,33	-498,74	-535,18	-516,77	-560,6	-592,85
(mV SCE)																							
TT15		Korozyon hızı (mpy)	1,652	1,874	2,188	2,422	3,524	3,018	3,098	3,415	2,722	2,74	2,425	2,41	2,821	2,2	2,834	2,47	2,591	2,901	3,209	2,987	3,181
	Rp (KOhms) [Polarizasyon direnci]	1,723	1,938	1,188	1,069	0,726	0,948	0,827	0,751	0,94	0,938	1,055	1,073	0,738	1,164	0,976	1,038	0,988	0,884	0,798	0,857	0,816	0,82
	Icorr (µA/cm²) [Aktif yoğunluğu]	3,381	3,828	4,898	6,246	7,833	6,838	6,711	7,388	5,897	5,934	5,263	5,22	5,678	4,765	5,705	5,351	5,613	6,284	6,952	6,47	6,843	9,009
	Measured open circuit (Eocp)																						
	(Aptik devre potansiyelleri)	-434,5	-479,5	-483,98	-490,79	-498,31	-447,2	-468,52	-477,47	-451,03	-473,98	-449,12	-492,06	-479,6	-439,71	-465,49	-457,15	-474,57	-482,17	-518,18	-508,77	-572,1	-598,95
	(mV SCE)																						
	TT30	Korozyon hızı (mpy)	0,894	1,798	2,395	2,505	3,421	2,772	2,782	3,012	2,788	2,688	2,511	2,185	3,555	3,008	2,979	3,337	2,817	2,911	2,8	2,92	2,989
Rp (KOhms) [Polarizasyon direnci]		1,63	1,425	1,069	1,03	0,754	0,924	0,919	0,802	0,917	0,97	1,018	1,173	0,723	0,852	0,883	0,767	0,979	0,881	0,921	0,88	0,884	0,88
Icorr (µA/cm²) [Aktif yoğunluğu]		3,645	3,898	5,188	5,427	7,409	6,003	6,025	6,997	6,056	5,78	5,44	4,754	7,701	6,512	6,452	7,228	5,888	6,307	6,073	6,324	6,472	9,443
Measured open circuit (Eocp)																							
(Aptik devre potansiyelleri)		-428,83	-613,24	-520,11	-525,87	-534,89	-529,09	-512,86	-522,77	-539,78	-520,7	-519,35	-520,39	-499,57	-488,99	-493,4	-481,78	-475,11	-476,33	-493,28	-481,01	-545,88	-571,34
(mV SCE)																							
TT40		Korozyon hızı (mpy)	0,976	1,285	2,88	2,402	3,716	2,815	3,018	3,352	2,895	2,704	2,552	2,748	3,335	3,167	3,004	3,21	2,743	2,85	2,582	3,037	3,785
	Rp (KOhms) [Polarizasyon direnci]	2,777	2,025	0,965	1,055	0,69	0,912	0,849	0,785	0,952	0,95	1,005	0,934	0,767	0,909	0,852	0,788	0,933	0,898	0,938	0,843	0,677	0,613
	Icorr (µA/cm²) [Aktif yoğunluğu]	2,115	2,74	5,782	5,203	8,05	6,097	6,533	7,282	5,837	5,888	5,629	5,954	7,223	6,859	6,508	6,952	5,943	6,173	6,178	6,579	8,193	9,135
	Measured open circuit (Eocp)																						
	(Aptik devre potansiyelleri)	-509,49	-495,32	-541,78	-547,71	-542,8	-549,52	-586,72	-538,72	-548,73	-554,5	-553,16	-540,33	-562,9	-588,48	-550,2	-546,95	-541,98	-545,6	-542,9	-537,69	-587,89	-561,52
	(mV SCE)																						

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Süleyman DALKILIÇ
Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1984
Medeni Hali : Bekâr
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : suleyman32ileti@hotmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Gürkan Süper Lisesi (Isparta/Merkez), 1999-2003.
Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Tasarımı Öğretmenliği

Mesleki Deneyim

Süleyman Demirel Üniversitesi Şantiye Stajı 2006 Yazı
Girit Mühendislik İnşaat Ltd. Şti. Büro Stajı 2008 Yazı

Yayınları

Sancak E., Çoban Ö., Dalkılıç S., 2011. Developing a Model through Fuzzy Logic for Determining Freeze-Thaw Effect on Capillarity in Some Stone Masonry Units. International Symposium on Advances in Applied Mechanics and Modern Information Technology, 22-23 September 2011, Baku, Azerbaijan, 295-299.

Çoban Ö., Dalkılıç S., Sancak E., Taş H., 2012. "Searching The Effect Of Freeze-Thaw In Some Artificial Stone Masonry Units To Abrasion Loss, Resistance And Capillarity" International Construction Congress 2012 – Iconc2012, 11-13 Oct. 2012 Isparta/ TURKEY.