

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STANDART VE ÖLÇÜLMÜŞ k -DEĞERLERİNE GÖRE UÇUCU
KÜL İÇEREN BETONLARIN DONATI KOROZYONUNA KARŞI
EŞDEĞER DAYANIKLILIK PERFORMANSLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI**

ÖMER KARADAĞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STANDART VE ÖLÇÜLMÜŞ
***k*-DEĞERLERİNE GÖRE UÇUCU KÜL**
İÇEREN BETONLARIN DONATI
KOROZYONUNA KARŞI EŞDEĞER
DAYANIKLILIK PERFORMANSLARININ
KARŞILAŞTIRILMASI

ÖMER KARADAĞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. TAYFUN ALTUĞ SÖYLEV

GEBZE

2018

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**COMPARISON OF EQUIVALENT
DURABILITY PERFORMANCE OF
MEASURED AND PRESCRIBED k -VALUES
AGAINST REBAR CORROSION OF FLY
ASH CONCRETE**

ÖMER KARADAĞ
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. DR. TAYFUN ALTUĞ SÖYLEV

GEBZE

2018

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 27/06/2018 tarih ve 2018/33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 05/07/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ömer Karadağ'ın tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. T. Altuğ Söylev

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Cahide Aydın İpekçi

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi İsmail Kılıç

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

k -değeri mineral katkıların bağlayıcılık etkinliği olarak tanımlanır. TS EN 206-1’de uçucu külün k -değeri 0.4 olarak verilmiştir. Eşdeğer performans kavramı, k -değerinin ölçülmesine izin verir. Bunun için, sadece çimento içeren referans beton ile uçucu küllü beton arasında bir uygunluk tesis edilmelidir. Bu çalışmanın amacı farklı k -değerlerini dayanıklılık açısından karşılaştırmaktır. Dayanıklılık performansı korozyonla ölçülmüştür. Çalışmada üç ana seri vardır; kontrol (KONT), öntanımlı k -değeri kullanılarak hazırlanan uçucu küllü numuneler (UBEL) ve k -değeri ölçülmüş uçucu küllü numuneler (UHES). Bütün seriler için 0.60, 0.50 ve 0.40 efektif su/çimento oranları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan numuneler 2016 yılının Nisan&Mayıs aylarında tez danışmanı Doç. Dr. Tayfun Altuğ SÖYLEV tarafından BAP-2016-A-31 kapsamında üretilmiştir. Numune boyutları 100 mm x 200 mm’dir. Numuneler silindirik biçimindedir. Ölçümlerde toplam 26 numune kullanılmıştır. Bütün numuneler iki adet 14 mm çapında nervürlü donatı içermektedir. Numunelerin beton örtüsünün bir tarafında 0.3 mm genişliğinde çatlak bulunmaktadır. Numuneler 35 gr/l yoğunlukta NaCl çözeltisine yerleştirilmişler ve iki haftalık periyotlarla galvanostatik yöntemle korozyon potansiyelleri (E_{corr}) ve korozyon oranları (i_{corr}) ölçülmüştür. KONT ve UBEL numuneleri 15 kere, UHES numuneleri 16 kere ölçülmüştür. Çalışmanın sonucuna göre, UHES numuneleri, KONT numuneleri ve UBEL numunelerine göre daha üstün performans sergilemiştir. Çatlaklı beton örtüsünde UHES numuneleri özellikle 0.40 su/çimento oranında diğer serilerin çatlaksız beton örtülerine göre korozyona karşı daha başarılıdır. Standarttaki k -değeri korozyon tehlikesi bulunan bölgelerde gözden geçirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Donatı Korozyonu, Eşdeğer Dayanıklılık Performansı, k -değeri, Uçucu Kül.

SUMMARY

k-value describes cementing activity of mineral additions. *k*-value of fly ash given as 0.4 in TS EN 206-1. Equivalent performance concept permits to measure the *k*-value. For that, a suitability should be established between reference concrete which contains only cement and fly ash concrete. The aim of the study is comparing durability performance of different *k*-valued concrete mixes. Durability performance investigated in terms of corrosion. There are three main series in this study; control mix (KONT), prescribed *k*-valued fly ash concrete (UBEL) and measured *k*-valued concrete (UHES). 0.60, 0.50 and 0.40 effective water/cement ratio was used for all series. The specimens used in this study were prepared by thesis supervisor Assoc. Prof. Tayfun Altug SOYLEV within the BAP-2016-A-31 in April&May 2016. Specimen size is 100 mm x 200 mm. Specimens are cylinder shaped. All specimens contain two 14 mm diameter rebar. One side of specimens has 0.3 mm width crack at the concrete cover. 26 specimens were used in the measurements. Specimens were placed in 35 g/l NaCl solution and corrosion potentials (E_{corr}) and corrosion rates (i_{corr}) were measured by galvanostatic method at two weeks period. KONT and UBEL samples were measured 15 times, UHES samples were measured 16 times. According to the test results, UHES specimens are outperformed the KONT specimens and the UBEL specimens. Cracked side of UHES specimens performed better against corrosion (especially in 0.40 water/cement ratio) than uncracked side of other series' specimens. The prescribed *k*-value in TS may revised in areas has high corrosion potential.

Key Words: Rebar Corrosion, Equivalent Durability Performance, *k*-value, Fly Ash.

TEŞEKKÜR

Başta yüksek lisans eğitimimde ve tez aşamasında her konuda destek olan ve beni bu tez çalışması için BAP 2016-A-31 projesinin korozyonla ilgili aşamasına dahil eden saygıdeğer hocam Doç. Dr. Tayfun Altuğ SÖYLEV'e,

Laboratuvarlarını kullanma imkanını veren ve hiçbir konuda yardımlarını esirgemeyen İTÜ Marmaray laboratuvarı yetkilileri ve personellerine,

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan aileme ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili arkadaşlarım Bilge ÖZTÜRK, Bünyamin AYDIN, Emre DEVRİMCİ ve Metehan TURGUT'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1. Uçucu Kül Hakkında Genel Bilgiler	4
2.1.1. Uçucu Külün Elde Ediliş Süreci	5
2.1.2. Uçucu Külün Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri	6
2.2. Uçucu Külün Betonda Kullanımı ve Etkileri	8
2.2.1. TS’de Uçucu Kül Kullanımı	9
2.2.1.1. <i>k</i> -değeri Kavramı	9
2.2.1.2. Eşdeğer Beton Performansı Kavramı	15
2.2.2. Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkisi	15
2.2.2.1. İşlenebilirlik	16
2.2.2.2. Priz Süresi	18
2.2.2.3. Hidratasyon Isısı	19
2.2.2.4. Basınç Dayanımı	20
2.2.2.5. Geçirimsizlik	22
2.3. Donatı Korozyonu	24
2.3.1. Donatı Korozyonunun Yol Açtığı Hasarlar	28
2.3.2. Donatı Korozyonuna Etki Eden Faktörler	29
2.3.2.1. Çevresel Faktörler	29
2.3.2.1.1. Klorür Etkisi	29
2.3.2.1.2. Karbonatlaşma	31

2.3.2.2. Beton Özellikleri	32
2.3.2.2.1. Betonun Bileşimi ve İçinde Bulunduğu Ortam	32
2.3.2.2.2. Beton Örtüsü Kalınlığı	35
2.3.2.2.3. Islanma-Kuruma Etkisi	36
2.3.2.2.4. Nem	37
2.3.2.2.5. Betonda Bulunan Çatlaklar	37
2.3.2.2.6. Mineral Katkı Kullanımı	39
2.3.3. Betonarme Elemanlarda Korozyonun Tespiti	46
2.3.3.1. Yarı Hücre Potansiyeli Yöntemi	48
2.3.3.2. Lineer Polarizasyon Direnci	51
2.3.3.2.1. Galvanostatik Yöntem	53
2.3.3.2.2. Potensiostatik Yöntem	54
2.3.3.3. Direnç Ölçüm Yöntemi	55
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	58
3.1. Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	58
3.2. Korozyon Ölçümleri	60
4. DENEY SONUÇLARI	65
4.1. Kontrol Numunelerine (KONT) Ait Ölçüm Sonuçları	65
4.1.1. 0.60 Su/Çimento Oranındaki Kontrol Numunelerine (KONT60) Ait Ölçüm Sonuçları	65
4.1.2. 0.50 Su/Çimento Oranındaki Kontrol Numunelerine (KONT50) Ait Ölçüm Sonuçları	66
4.1.3. 0.40 Su/Çimento Oranındaki Kontrol Numunelerine (KONT40) Ait Ölçüm Sonuçları	67
4.1.4. Kontrol Numunelerinin Toplu Ölçüm Sonuçları	68
4.2. Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UBEL) Ait Ölçüm Sonuçları	70
4.2.1. 0.60 Efektif Su/Çimento Oranındaki Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UBEL60) Ait Ölçüm Sonuçları	70
4.2.2. 0.50 Efektif Su/Çimento Oranındaki Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UBEL50) Ait Ölçüm Sonuçları	71
4.2.3. 0.40 Efektif Su/Çimento Oranındaki Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UBEL40) Ait Ölçüm Sonuçları	72

4.2.4. Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelerin Toplu Sonuçları	74
4.3. Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UHES) Ait Ölçüm Sonuçları	75
4.3.1. 0.60 Efektif Su/Çimento Oranındaki Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UHES60) Ait Ölçüm Sonuçları	75
4.3.2. 0.50 Efektif Su/Çimento Oranındaki Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UHES50) Ait Ölçüm Sonuçları	77
4.3.3. 0.40 Efektif Su/Çimento Oranındaki Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UHES40) Ait Ölçüm Sonuçları	78
4.3.4. Ölçülmüş k -değerine Sahip Numunelerin Toplu Sonuçları	79
4.4. 0.60 Efektif Su/Çimento Oranındaki Numunelere Ait Ölçüm Sonuçları	81
4.5. 0.50 Efektif Su/Çimento Oranındaki Numunelere Ait Ölçüm Sonuçları	82
4.6. 0.40 Efektif Su/Çimento Oranındaki Numunelere Ait Ölçüm Sonuçları	83
5. BULGULAR	86
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	94
EKLER	95

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u>	<u>Açıklamalar</u>
<u>Kısaltmalar</u>	
ΔE	: Potansiyeldeki değişim
ΔI	: Akımdaki değişim
ρ	: Direnç
CE	: Karşıt elektrot
E_{corr}	: Korozyon potansiyeli
I	: Akım
i_{corr}	: Korozyon akım yoğunluğu
k	: Bağlayıcılık faktörü
R_p	: Polarizasyon direnci
ACI	: American Concrete Institute
ASTM:	American Society For Testing and Materials
CSH	: Kalsiyum-silikat-hidrat
ÇT	: Numunelerin çatlaklı tarafı
KONT:	Kontrol numuneleri
LPR	: Lineer Polarizasyon Direnci
PÇ	: Portland çimentosu
RE	: Referans elektrotu
TS:	Türk Standartları
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UBEL	: Ölçülmüş k -değeriyle üretilen numuneler
UHES	: Öntanımlı k -değeriyle üretilen numuneler
WE	: Çalışma elektrotu

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1:	Termik santralin şematik gösterimi. 5
2.2:	28 günlük dayanım ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki. 11
2.3:	28 günlük dayanım sonuçları ve k -değeri ilişkisi. 12
2.4:	90 günlük dayanım sonuçları ve k -değeri ilişkisi. 13
2.5:	k -değerinin belirlenmesindeki prensip. 14
2.6:	Örnek bir k -değeri – su/çimento oranı grafiği. 15
2.7:	28 günlük basınç dayanımları ve slump yayımları. 17
2.8:	Uçucu kül katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları. 21
2.9:	Uçucu kül katkılı beton karışımlarının basınç dayanımları. 21
2.10:	Porozite-geçirimsizlik arasındaki ilişki. 22
2.11:	Referans, %5 uçucu kül katkılı ve %10 uçucu kül katkılı numunelerin yüzey emme sonuçları [$\text{mm}/\text{min}^{1/2}$]. 23
2.12:	Referans, %5 uçucu kül katkılı ve %10 uçucu kül katkılı numunelerin yüzde klorür konsantrasyonları. 23
2.13:	Uçucu külün klor geçirimsizliğine etkisi. 24
2.14:	Metallerin işlenmesi ve korozyona uğraması süreçleri. 25
2.15:	Donatı korozyonunun şematik gösterimi. 27
2.16:	Mikrohücre korozyonunun şematik gösterimi. 27
2.17:	Makrohücre korozyonunun şematik gösterimi. 28
2.18:	Korozyon sonucu görülen hasarlar. 28
2.19:	Korozyon sonucu oluşan korozyon ürünlerine göre hacim artışları. 29
2.20:	Klorür iyonlarının pasif tabakayı kırması ve geri dönüşümü. 30
2.21:	Numune tipi – direnç ilişkisi. 33
2.22:	Kullanılan numune tipi. 35
2.23:	25 mm ve 45 mm beton örtüsü için korozyon oranı-zaman grafiği. 36
2.24:	Deniz yapılarının klorür taşınımına ilişkin şematik gösterim. 36
2.25:	Su seviyesine göre mesafeyle klorür nüfuzunun değişimi. 37
2.26:	0.35-0.50-0.70 su/çimento oranlarında çatlaklı numunelerin yarı hücre potansiyeli ölçüm sonuçları. 38

2.27:	Korozyon akımı – çatlak boyutu – süre ilişkisi.	39
2.28:	Numunelerin ortalama korozyon oranları.	40
2.29:	0-500 gün arası i_{corr} değerleri.	41
2.30:	1300-1460 gün arası i_{corr} değerleri.	41
2.31:	0.35, 0.40 ve 0.45 su/çimento oranlarındaki numunelerin korozyon hızları.	42
2.32:	Farklı tipte mineral katkılar ile korozyon hızı ilişkisi.	42
2.33:	Yarı hücre potansiyeli ölçümü sonuçları – zaman grafiği.	43
2.34:	Yapı servis ömrü ile korozyon arasındaki ilişki.	44
2.35:	Sahada dalga ve serpinti bölgelerindeki numuneler.	45
2.36:	0.40 su/bağlayıcı oranında sadece PÇ içeren 20 mm beton örtüsüne sahip numunelerin laboratuvar ve saha ortamındaki korozyon hızı ölçüm sonuçları.	45
2.37:	0.40 su/bağlayıcı oranında uçucu kül içeren 20 mm beton örtüsüne sahip numunelerin laboratuvar ve saha ortamındaki korozyon hızı ölçüm sonuçları.	45
2.38:	0.55 su/bağlayıcı oranında uçucu kül içeren 20 mm beton örtüsüne sahip numunelerin laboratuvar ve saha ortamındaki korozyon hızı ölçüm sonuçları.	46
2.39:	Betonarme elemanda korozyon hasarının tayini için örnek metot.	47
2.40:	Bakır/Bakır Sülfat referans elektrotunun enkesiti.	48
2.41:	Yarı hücre potansiyeli sistemi.	49
2.42:	Yarı hücre potansiyel haritası.	50
2.43:	Farklı elektrokimyasal yöntemlerle korozyon ölçümü.	51
2.44:	Yapının servis ömrü-korozyon ilişkisi.	51
2.45:	Üç elektrotlu elektrokimyasal hücre.	52
2.46:	Potensiostat ve üç elektrotlu elektrokimyasal hücrenin şematik gösterimi.	53
2.47:	Potensiostatik ölçümde sisteme verilen gerilim ve alınan tepki.	54
2.48:	Galvanostatik yöntemde sistemdeki akım değişimi.	54
2.49:	Galvanostatik dalgaya karşılık gelen potansiyel-zaman eğrisi örneği.	55
2.50:	Örnek galvanostatik dalga yöntemi düzeneği.	55
2.51:	Dört başlıklı direnç ölçer devresi şeması.	56

3.1:	Basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki ve lineer doğruların denklemleri.	60
3.2:	Numune tipinin şematik gösterimi.	61
3.3:	Kullanılan numuneler.	62
3.4:	Numunelerin bekletildiği ortam.	63
3.5:	Ölçüm için kullanılan cihazın ekranı.	64
3.6:	Deney düzeneği.	64
4.1:	KONT60 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	65
4.2:	KONT60 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	66
4.3:	KONT50 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	66
4.4:	KONT50 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	67
4.5:	KONT40 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	67
4.6:	KONT40 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	68
4.7:	KONT numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	69
4.8:	KONT numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	69
4.9:	UBEL60 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	70
4.10:	UBEL60 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	71
4.11:	UBEL50 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	71
4.12:	UBEL50 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	72
4.13:	UBEL40 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	73
4.14:	UBEL40 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	73
4.15:	UBEL numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	74
4.16:	UBEL numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	75
4.17:	UHES60 ($k = 0.495$) numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	76
4.18:	UHES60 ($k = 0.495$) numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	76
4.19:	UHES50 ($k = 0.338$) numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	77
4.20:	UHES50 ($k = 0.338$) numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	77
4.21:	UHES40 ($k = 0.103$) numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	78
4.22:	UHES40 ($k = 0.103$) numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	79
4.23:	UHES numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.	80
4.24:	UHES numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.	80
4.25:	0.60 su/çimento oranına sahip üç serinin ortalama i_{corr} değerleri.	81
4.26:	0.60 su/çimento oranına sahip üç serinin ortalama E_{corr} değerleri.	82

4.27:	0.50 su/imento oranına sahip üç serinin ortalama i_{corr} değerleri.	83
4.28:	0.50 su/imento oranına sahip üç serinin ortalama E_{corr} değerleri.	83
4.29:	0.40 su/imento oranına sahip üç serinin ortalama i_{corr} değerleri.	84
4.30:	0.40 su/imento oranına sahip üç serinin ortalama E_{corr} değerleri.	85

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: ASTM C618'e göre uçucu kül sınıflandırması.	7
2.2: Uçucu küllerin yüzdesel kimyasal birleşimleri.	7
2.3: Standartlar tarafından belirlenmiş incelikler.	8
2.4: TS EN 450-1'e göre uçucu kül sınıflandırması.	9
2.5: Uçucu kül içeriği – slump ilişkisi.	17
2.6: Priz süresi ile uçucu kül ikamesi ilişkisi.	18
2.7: Uçucu külün birleşiminin priz başlangıcı üzerindeki etkisi.	19
2.8: Farklı tip numuneler için hidrasyon ısıları [cal/g].	19
2.9: Çimento kütlesine göre klorür miktarının sınır değerleri.	30
2.10: Karbonatlaşma nedenli korozyonun etki sınıfının tanımlanması.	34
2.11: Deniz suyundan kaynaklanan klorürlerin neden olduğu korozyon.	34
2.12: Deniz suyu haricindeki klorürlerin neden olduğu korozyon.	34
2.13: XC etki sınıfı için sınırlamalar.	34
2.14: XS ve XD etki sınıfları için sınırlamalar.	34
2.15: Çatlak genişliği için sınır değerler.	38
2.16: 40 mm beton örtüsüne sahip numunelerin çatlak genişliği – bağlayıcı tipi – korozyon oranı ilişkisi.	40
2.17: 20 mm beton örtüsüne sahip numunelerin çatlak genişliği – bağlayıcı tipi – korozyon oranı ilişkisi.	40
2.18: Karışım – korozyon başlangıcı arasındaki ilişki.	43
2.19: Farklı tip referans elektrotlar için korozyon-potansiyel fark ilişkisi.	49
2.20: i_{corr} Değerleri ve korozyon seviyesi arasındaki ilişki.	53
2.21: Korozyon ihtimali ile direnç arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi.	57
3.1: Numune tipi ve kısaltmaları.	59
3.2: Beton karışımları.	59
3.3: Bolomey yöntemiyle hesaplanmış olan k -değerleri.	60
3.4: Su/çimento oranlarının kısaltmaları.	63

1. GİRİŞ

Beton; agrega, çimento ve sudan oluşan yüksek basınç dayanımına sahip bir yapı malzemesidir ve şeceresi Antik Roma'ya dek uzanmaktadır [1]. Kendi başına bağlayıcı özellik göstermeyen fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığı zaman su ve serbest kireç ile yaptığı reaksiyon sonucu bağlayıcı özellik kazanan silisli-alüminli maddeler puzolan olarak adlandırılır [2]. Kısmi bağlayıcılık özellikleri bilinen doğal malzemeler olan tras, volkanik tüf, volkanik cam gibi malzemelerin betonda çimento veya kireçle birlikte kullanılması da çok eskiden beri bilinmektedir [3]. Betonda yapısal olarak teknoloji ile birlikte bazı kaçınılmaz değişimler gerçekleşmiştir. Doğal puzolanların yerini, çoğunlukla atık olan yapay puzolanlar almıştır [3]. Uçucu kül bu yapay puzolanlardan biridir. Termik santrallerde pulverize kömürün yakılması sonrası oluşan küllerin çeşitli yöntemlerle toplanması yoluyla elde edilen uçucu kül, beton endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir [4]. Tane boyutu 1 µm ile 100 µm arasında değişir [5]. Betonda uçucu kül kullanımı işlenebilirliği artırır, hidrasyon ısısını düşürür, geçirimsizliği azaltır [3]. Uçucu kül kullanımının sınırları TS EN 206-1 ile çizilmiştir. Uçucu kül, çoğunlukla, betondaki çimento miktarının azaltılıp, azaltılan miktar yerine azaltılan miktardan daha fazla uçucu kül eklenmesi şeklinde kullanılır. Bunun nedeni, uçucu külün çimento ile aynı derecede bağlayıcılığa sahip olmamasıdır. Uçucu külün bağlayıcılık faktörü " k " ile gösterilir. k -değeri standart tarafından 0.4 olarak belirlenmiştir [6]. Ancak bu değer, eşdeğer performans ile gözden geçirilebilir. Eşdeğer beton performansı özellikleri bilinen mineral katkının ve çimentonun kullanılmasıyla üretilen betonun dayanım ve dayanıklılık açısından referans beton ile aynı performansı vermesini tarifler [7].

Beton düşük çekme mukavemeti nedeniyle, çekme kuvvetlerini taşıması için, çelik ile birlikte kullanılır. Beton ile çeliğin kenetlenmesi oldukça iyidir. Betonun içindeki çelik, geçirimsiz beton tarafından fiziksel ve kimyasal olarak korunur [8]. Fiziksel koruma zararlı maddelerin, iyonların, oksijenin ve suyun betona girişin engellenmesiyle gerçekleşir [9]. Betonun içindeki 12.6-13.5 civarlarındaki pH sayesinde, çeliğin üzerinde bir pasivasyon tabakası oluşur ve çeliği korozyona karşı korur [10]. Ancak bu koruma sürgit değildir. Zararlı iyonların donatıya ulaşması, karbonatlaşma, pH'ın düşmesi gibi nedenlerden ötürü çelik donatı korozyona uğrayabilir. Betonarme elemanlarda donatı korozyonu sonucu oluşan çatlaklar ve

aderans kayıpları yapı güvenliğine olumsuz yönde etkide bulunur [11]. Korozyon elektrokimyasal yöntemlerle izlenebilen bir fenomendir. Betonun içindeki korozyonu araştırmak adına yarı hücre potansiyeli, lineer polarizasyon tekniği, direnç ölçüm yöntemi gibi yöntemler geliştirilmiştir ve kullanılmaktadır [12].

Korozyon dünyadaki sınırlı kaynakların israfının başlıca nedenlerindendir [13]. Amerika Birleşik Devletleri'nde korozyon sonucu kullanılamaz hale gelen metalik malzemeler ve korozyona karşı koruma için yıllık gayrı safi milli hasılanın %3.1'i olan 276 milyar dolar kadar harcama yapılmaktadır. Bu sayı, Çin Halk Cumhuriyeti'nde gayrı safi milli hasılanın %3.34'ü olan 310 milyar dolara kadar çıkmaktadır [14].

Bu çalışma yapılarda servis ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden birisi olan donatı korozyonu ile mineral katkı kullanımı ve mineral katkı kullanımını düzenleyen standartlar ekseninde değerlendirme yapmayı hedeflemektedir. Bu amaç doğrultusunda farklı k -değerlerine sahip uçucu küller ve farklı su/çimento oranlarıyla üretilmiş numuneler kullanılmıştır. TS EN 206-1'de verilen $k=0.4$ değeri yerine, TS CEN/TR 16639 Teknik Raporunda tarif edilen şekilde hesaplanmış k -değeri kullanılarak karışım hesabı yapılması ile donatı korozyonunun nasıl değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca numunelerde suni çatlak oluşturularak, korozyon etkisinin çatlak varlığında nasıl değiştiği, uçucu kül kullanımının ve kullanılan uçucu külün k -değerinin çatlak varlığında korozyona karşı etkisinin ne boyutta olduğu araştırılmıştır.

Bu çalışma deneysel yöntemle yapılmıştır. Çalışma Doç. Dr. Tayfun Altuğ SÖYLEV tarafından yürütülen BAP-2016-A-31 kodlu bilimsel araştırma projesinin korozyon ölçümlerini içeren ikinci etabından oluşmaktadır. Çalışmada BAP-2016-A-31 kapsamında 2016 yılında üretilen 0.60, 0.50 ve 0.40 su/çimento oranlarında referans numuneleri (KONT), standart tarafından verilen $k=0.4$ değerine sahip numuneler (UBEL) ve k -değeri ölçülmüş numuneler (UHES) kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen KONT, UBEL ve UHES betonlarının tasarlanması, k -değerinin Bolomey yöntemi ile belirlenmesi, korozyon numunelerinin tasarımı ve hazırlanması BAP-2016-A-31 kapsamında, Doç. Dr. Tayfun Altuğ SÖYLEV tarafından gerçekleştirilmiştir. Ölçülmüş k -değerleri sırasıyla 0.60 su/çimento oranı için 0.495, 0.50 su/çimento oranı için 0.338 ve 0.40 su/çimento oranı için 0.103'tür [15]. Kullanılan numune 100 mm x 200 mm boyutlarında silindir numunedir. Toplam numune sayısı 26'dır. Numunelerde 20 mm beton örtüsüne sahip 2 adet $\phi 14$ nervürlü

standart donatı bulunmaktadır. Ölçümlerin yapılabilmesi için donatıların ucu kısmen dışarıda bırakılmıştır. Ölçülmek istenen alan donatının ortasındaki 100 mm'lik bölgedir. Bu amaçla donatıların numune içinde kalan kısımları alttan ve üstten 50'şer mm yalıtkan bantla bantlanmıştır. Numunenin şematik gösterimi Şekil 3.2'de görülebilir. Donatıların beton örtülerinin bir tarafında 0.3 mm genişliğinde çatlak oluşturulmuştur. Bu yolla çatlak varlığında betonarme elemanların dayanıklılığını da araştırmada değerlendirmek amaçlanmıştır. Numuneler 35 gr/l derişimli NaCl çözeltisinde bekletilmişlerdir ve iki haftada bir yapılan ölçümler haricinde çözeltiden çıkartılmamışlardır. Ortam koşullarının sabit olduğu ve sonuçları etkilemediği varsayılmıştır. Galvanostatik yöntemle korozyon potansiyelleri (E_{corr}) ve korozyon hızları (i_{corr}) ölçülmüştür. KONT ve UBEL numuneleri üzerinde toplam 15 ölçüm, UHES numuneleri üzerinde toplam 16 ölçüm yapılmıştır.

Tezin birinci bölümündeki girişten sonra, literatür taraması bölümü gelmektedir. Literatür taraması bölümünde uçucu kül hakkında genel bilgiler, uçucu külün betonda kullanımı ve taze beton-sertleşmiş beton özelliklerine etkisi, standart tarafından uçucu kül kullanımına getirilen sınırlamalar ve donatı korozyonu, korozyon kavramı, betonarme elemanlarda korozyona etki eden faktörler, betonarme elemanlarda korozyon nedeniyle oluşan hasarlar, betonarme elemanlarda korozyonun tespit edilmesi için kullanılan yöntemler hakkında literatürdeki genel bilgiler verilmektedir.

Üçüncü kısım olan deneysel çalışma bölümünde, tezde kullanılan numuneler, kullanılan deneysel yöntem ve deney düzeneği hakkındaki bilgiler açıklanmaktadır.

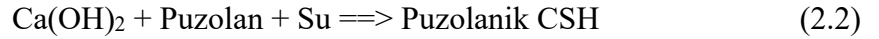
Dördüncü bölüm olan deney sonuçlarında, yapılan deney sonunda elde edilen veriler grafik şeklinde aktarılmıştır.

Beşinci bölüm olan tartışma kısmında çalışma sonunda elde edilen veriler yorumlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Uçucu Kül Hakkında Genel Bilgiler

Amerikan Beton Enstitüsü'nün ACI 116R "Cement and Concrete Terminology" isimli teknik raporunda puzolan; kendi başına çok az veya hiç bağlayıcılık özelliği olmayan, ince taneli haldeyken ve sulu ortamda Ca(OH)_2 (serbest kireç) ile kimyasal tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanan silisli veya silisli-alüminli malzemeler olarak tanımlanmıştır [2]. Çimentonun hidratasyonu (Eşitlik 2.1) sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 ile puzolandaki silikanın sulu ortamda tepkimeye girmesi sonucunda puzolanik kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) oluşmaktadır (Eşitlik 2.2) [16].

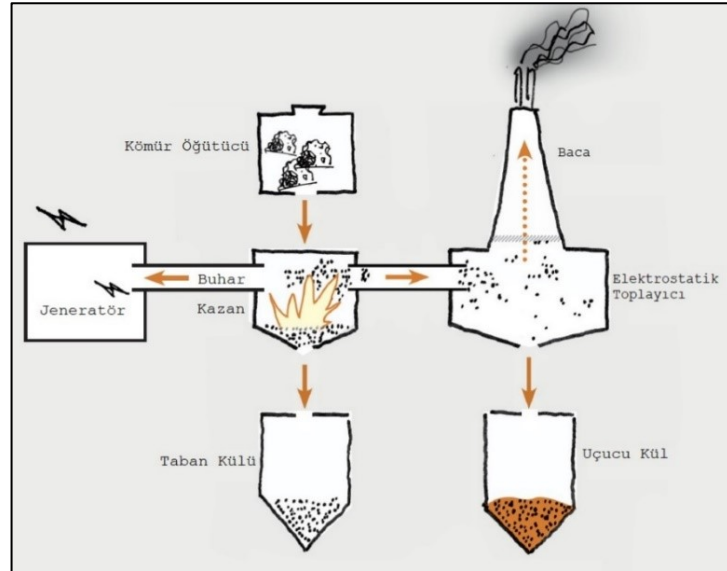


Puzolanlar yapay puzolanlar ve doğal puzolanlar olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal puzolanlar; volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, pişirilmiş kil ve şeyller, tras gibi doğada bulunan ve ince taneli hale getirilerek beton karışımında kullanılınca puzolanik özellik gösteren malzemelere verilen genel addır. Genelde tane boyutları $1 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ arasındır [5]. Doğal puzolanlar, çimento üretiminde ikame olarak kullanılabileceği gibi beton üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Doğal puzolanların kullanımı Antik Roma'ya dek uzanmaktadır [1]. Yapay puzolanlar ise silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu olarak sıralanabilir. Yapay puzolanlar aslen endüstri atığıdır. Uçucu kül termik santrallerden, silis dumanı silikon metali veya silikonlu metal alaşımı üreten fırınlardan, yüksek fırın cürufu ise demir cevherlerinin işlendiği yüksek fırınlardan elde edilir [3]. Yapay puzolanların ortak özellikleri, ince taneli olmaları veya öğütülerek çimento tanesi inceliğine getirilebilmeleri, yüksek miktarda SiO_2 (silikon dioksit) ve Al_2O_3 (alüminyum oksit) içermeleri ve amorf yapıda olmalarıdır [17]. Yapay puzolanlar betonun maliyetini düşürmek, taze betonun işlenebilirliğini arttırmak, hidratasyon ısınısını düşürmek, betonun dayanıklılığını ve doğru

reçetelendirilirse basınç dayanımını arttırmak ve daha sürdürülebilir, daha çevreci beton üretmek için çok elverişlidirler [18]. Bir sonraki bölümde yapay puzolanlardan uçucu kül daha detaylı bir şekilde incelenecektir.

2.1.1. Uçucu Külün Elde Ediliş Süreci

1920’li yıllardan beri elektrik üretmek amaçlı kullanılan, termik santrallerde, enerji üretimi amacıyla kömürün yakılması sonucunda, milyonlarca ton atık ortaya çıkagelmiştir. Termik santralde kömür önce pulverize hale getirilir. Pulverize haldeki kömürün 1100 °C - 1400 °C arası sıcaklıkta yakılmasıyla oluşan buhar, basınçlı bir şekilde türbinlere doğru ilerler ve türbinleri harekete geçirir (Şekil 2.1) [4].



Şekil 2.1. Termik santralin şematik gösterimi.

Yakma işlemi sonucu oluşan külün bir kısmı ağırlığından ve dane boyutunun büyüklüğünden ötürü tabana doğru iner. Bu tip atığa “taban külü” adı verilir. Taban külü, termik santrallerin kömüre bağlı atıklarının %10 kadar bir kısmını oluşturur ve genellikle dolgu malzemesi olarak kullanılır. Yakma işlemi sonucu açığa çıkan külün büyük kısmı ise bacaya doğru yönelir. Bu kadar büyük miktarlarda külün bacadan dışarı salınması büyük bir kirlilik ve canlı sağlığını tehdit edici unsur yaratacağından, bu küller elektrostatik veya elektromekanik toplayıcılar yardımıyla bacadan çıkmadan toplanır. Bu tip atığa “uçucu kül” adı verilir. Uçucu kül, termik santrallerin kömüre bağlı atıklarının %90 kadarlık kısmını oluşturur [19]. Türkiye’de, 2017

yılında elektrik santrallerinde üretilen toplam elektrik enerjisi miktarının %33.6'sı hidroelektrik santrallerden, %28.1'i yakıt olarak doğalgaz kullanan termik santrallerden, %21.5'i ise yakıt olarak kömür kullanan termik santrallerden elde edilmiştir [20]. Termik santral atıklarının bekleyen iki farklı son vardır: geri dönüşüm ya da yok edilme. Özellikle yapı sektörü için oldukça kullanışlı bir malzeme olan uçucu kül, üstel olarak artan bir oranla geri dönüşümde değerlendirilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde 1980 yılında ortaya çıkan uçucu külün %13.3'ü kullanılırken bu oran, sürdürülebilirliğe artan ilgi ile paralel olarak 2016 yılında %59.85'e kadar yükselmiştir. 2016 yılında kullanılan uçucu külün %84.8'i beton üretimi, çimento üretimi, dolgu malzemesi, set yapımı gibi yapı işlerinde kullanılmıştır [21].

2.1.2. Uçucu Külün Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal birleşimleri, uçucu küllerini sınıflandırmak adına önem taşır. Uçucu küller, taneciklerin doğasına ve reaktivitesine bakmaksızın, analitik bir şekilde kimyasal birleşimine göre inceleyen ASTM C618'de silisyum dioksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3), ferrik oksit (Fe_2O_3), kalsiyum oksit (CaO) ve yanmamış kömür (karbon, C) miktarları göz önünde bulundurularak sınıflandırma yapılır (Tablo 2.1) [22]. Bu tarz, sadece kimyasal birleşime odaklı inceleme aynı zamanda kalite-güvence mekanizması olarak da kullanılır. Uçucu küldeki temel bileşenler, oransal olarak geniş bir skalada bulunabilirler (Tablo 2.2) [23]. Bu ayrım, uçucu külün elde edildiği termik santralde kullanılan yakıt ile doğrudan ilişkilidir. ASTM C618'de antrasit ve bitümlü kömürlerden elde edilen ve SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içeriği toplamı %70'ten fazla olan uçucu küller F sınıfı, altbitümlü kömür ve linyitten elde edilen ve SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içeriği toplamı %50'den az olan uçucu küller C sınıfı olarak tanımlanmıştır. C sınıfı uçucu küller genelde %20'den fazla CaO içerir. Bu nedenle $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı F sınıfı uçucu kül için sınır değer olan %70'e nazaran daha azdır. F sınıfı uçucu külün puzolanik aktivitesi yeterli incelik ve karbon içeriği ile doğrudan ilintilidir. Bu ikisi birbiri ile zıttır, çünkü karbon tanecikleri yanmamış kömürden kaynaklanır ve uçucu kül danelerine göre daha iricedir. Karbon içeriği kızdırma kaybına eşit kabul edilir [24]. TS EN 450-1'de kızdırma kaybının alacağı en büyük değer %5, ASTM C618'de %6 olarak belirlenmiştir [25] [22].

Tablo 2.1. ASTM C618'e göre uçucu kül sınıflandırması.

İçerik/Sınıf	F Sınıfı	C Sınıfı
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	> %70	< %50
SO_3	< %5	< %5
CaO	< %10	> %10
Kızdırma Kaybı	< %6	< %6
Nem İçeriği	< %3	< %3

Tablo 2.2. Uçucu küllerin yüzdesel kimyasal birleşimleri.

Bileşik	Bulunma Miktarı
SiO_2	%35- %60
Al_2O_3	%10 - %30
Fe_2O_3	%4 - %20
CaO	%1 - %35

Uçucu küldeki SiO_2 içeriğinin ana kaynağı, kömürün içindeki kuartz ve killi minerallerdir. Antrasit ve bitümlü kömürler, yanmayan kısımlarında, altbitümlü ve linyit kömürlerine göre yüzdesel olarak daha fazla kil minerali barındırırlar. Bu nedenle antrasit ve bitümlü kömürler silika bakımından zengindir. Silisli cam uçucu külden betondaki pozolanik reaksiyona katılan birincil maddedir, amorf silika serbest kireç ve suyla birlikte kalsiyum-silikat-hidrat jelini (CSH) oluşturur [23].

Uçucu küldeki Al_2O_3 'ün uçucu küldeki ana kaynağı, kömürdeki kildir. Kömürde bulunan kil tipleri simektit ($(\text{Na}(\text{Al}_5, \text{Mg})\text{Si}_{12}\text{O}_{30}(\text{OH})_6 \cdot n\text{H}_2\text{O})$), illit ($\text{KAl}_5\text{Si}_7\text{O}_{20}(\text{OH})_4$) ve kaolinit ($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) olmak üzere üç tanedir [23].

Uçucu küldeki Fe_2O_3 'ün kaynağı kömürde bulunan demir içeren malzemelerdir. Demir bakımından zengin uçucu kül taneciklerinin en yoğun olduğu boyutlar 30 μm -60 μm arasındır. Demir içeriği en az olan tanecikler 15 μm 'den küçük olanlardır [23].

Uçucu küldeki CaO'nun kaynağı kömürdeki kalsiyum karbonatlar (CaCO_3) ve kalsiyum sülfatlardır (CaSO_4). Antrasit ve bitümlü kömürler gibi verimli kömür tipleri daha az yanmayan bileşen içerirler ve bunlardan elde edilen uçucu külde daha %5'ten daha az CaO içeriğine rastlanır. Altbitümlü, linyit kömürlerinden elde edilen uçucu küllerde CaO içeriği %35'lere kadar çıkabilir [23].

Uçucu külün tanecik morfolojisi ve granülometrisi, uçucu külün elde edildiği termik santralde kullanılan kömürün tipine, yanma sıcaklığına, pulverize kömürün tane boyutlarına ve uçucu külün nasıl toplandığına bağlıdır. Uçucu kül taneciklerinin

şekil, incelik, dane boyutu dağılımı (granülometri) ve yoğunluk gibi özellikleri, uçucu kül katkılı betonun mekanik özelliklerini ve dayanım gelişimini etkiler. Bu öncelikle taneciklerin su emme kapasitesi ile ilişkilidir.

Uçucu kül tanecikleri camsı küresel veya amorf yapıdadırlar. Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz küresel yapıda, boşluklu küreler halinde, yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplı yapılar gibi çeşitli şekillerde bulunabilirler [26]. Uçucu külün şekil dağılımı, CaO içeriği ile ilintilidir. F sınıfı uçucu küller genellikle farklı morfolojideki taneciklerin dağılımı açısından homojendirler. Taneciklerin şekli ve granülometrisi betonun su ihtiyacında ve işlenebilirliğinde önemli etkiye sahiptir.

Ek olarak, uçucu küller elde edildikleri termik santrallere ve hatta kullanılan kömür türüne göre farklı renkte olabilir. Uçucu külün rengi, tıpkı çimentoda ve iri agregada da olduğu gibi, uçucu külün kullanıldığı betonun rengini etkiler. Bu durum işin mühendislik kısmından ziyade görsel kısmını ilgilendirmektedir [23].

Uçucu külün tane boyutları 0.5 µm-150 µm arasında değişkenlik gösterir [5]. Bu değerler, uçucu külün termik santrallerden elde edildiği hali için geçerlidir. İstenilen granülometriye göre düzenleme yapılabilir. Betonda uçucu kül kullanımı için esaslardan en önemlisi olan ASTM C618'e göre 325 nolu elek (0.044 mm) üzerinde kalanlar %34'ten fazla olamaz [22]. TS EN 450-1'de bu değer %40 olarak belirtilmiştir (Tablo 2.3) [25]. Türkiye'de kullanılan uçucu küllerin tane yoğunlukları 2.93 ila 2.00 arasında değişmektedir [26].

Tablo 2.3. Standartlar tarafından belirlenmiş incelikler.

	TS EN 450-1	ASTM C618
0.044 mm eleğin üzerinde kalan miktar	% 40	% 34

2.2. Uçucu Külün Betonda Kullanımı ve Etkileri

ABD'de, uçucu kül kullanılarak yapılan ilk büyük proje, yapımına 1931 yılında başlanan Hoover Barajı projesidir [27]. Türkiye'de ise, 1967 yılında yapımına başlanan Gökçekaya Barajı, uçucu kül katkısı içeren beton kullanılan ilk büyük proje

sayılabilir [28]. Büyük projelerde kullanılmaya başlandığından beri, uçucu kül ile ilgili özellikleri standardize etmek bir gereksinim haline gelmiştir [29].

2.2.1. TS’de Uçucu Kül Kullanımı

Betonda kullanılan uçucu külün özelliklerinin çerçevesi Türkiye’de yürürlükte olan TS EN 450-1 “Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri” tarafından belirlenmiştir (Tablo 2.4) [25]. Uçucu külün betonda kullanımı konusunda ise TS EN 206-1 “Beton - Özellik, performans, imalat ve uygunluk” gerekli düzenlemeleri ve sınırlamaları tariflemektedir [6].

Tablo 2.4. TS EN 450-1’e göre uçucu kül sınıflandırması.

İçerik/Sınıf	Silissi (V)	Kalkersi (W)
Reaktif SiO ₂	> %25	> %25
SO ₃	< %3	< %3
CaO	< %10	> %10
Kızdırma Kaybı	< %5	< %5

Uçucu külün katkı olarak kullanımı, TS EN 206-1 standardı ile belirlenmiştir. Bu hususta, en can alıcı nokta, *k*-değeri kavramı ve eşdeğer beton performansı kavramıdır. Müteakip bölümlerde *k*-değeri, *k*-değeri ile ilgili yapılmış çalışmalar ve eşdeğer performans konsepti kavramı daha detaylı şekilde incelenecektir.

2.2.1.1. *k*-değeri Kavramı

Uçucu külün kullanımında “*k*-değeri”, betonda kullanılan uçucu külün çimentoya göre ne kadar bağlayıcı olduğunu tanımlamaktadır. *k*-değeri, etkinlik katsayısı, etkinlik faktörü, bağlayıcılık faktörü gibi isimlerle de anılır. Gürbüz, *k*-değeri konusunda yaptığı tez çalışmasında, *k*-değerini F ağırlıkça uçucu kül olmak üzere, F kadar uçucu kül toplam çimentonun içerisinden çıkartılan bir *k* x F kadar çimento miktarına eşit olmaktadır şeklinde açıklamıştır. Buradaki tanıma göre, *k*-değeri portland çimentosu için 1 değerini alır [30]. Uçucu kül kullanılan betonda, su/çimento oranı yerine su/(çimento + *k* x uçucu kül) oranı kullanılır. TS EN 206-1’de (çimento + *k* x uçucu kül) miktarının, en az çimento miktarından daha az

olamayacağı belirtilmiştir. CEM I tipi çimento için dikkate alınacak en fazla uçucu kül miktarı; kütlece (uçucu kül/çimento) ≤ 0.33 şeklinde belirtilmiştir. Kullanılan daha fazla uçucu külün, fazla kısmı su/(çimento + k x uçucu kül) oranında hesaba katılmaz. CEM II/A tipi çimentoda bu oran 0.25'den küçük olmalıdır. Daha fazla kullanılan uçucu külün fazla kısmı, aynı şekilde, su/(çimento + k x uçucu kül) oranında hesaba katılmaz [6].

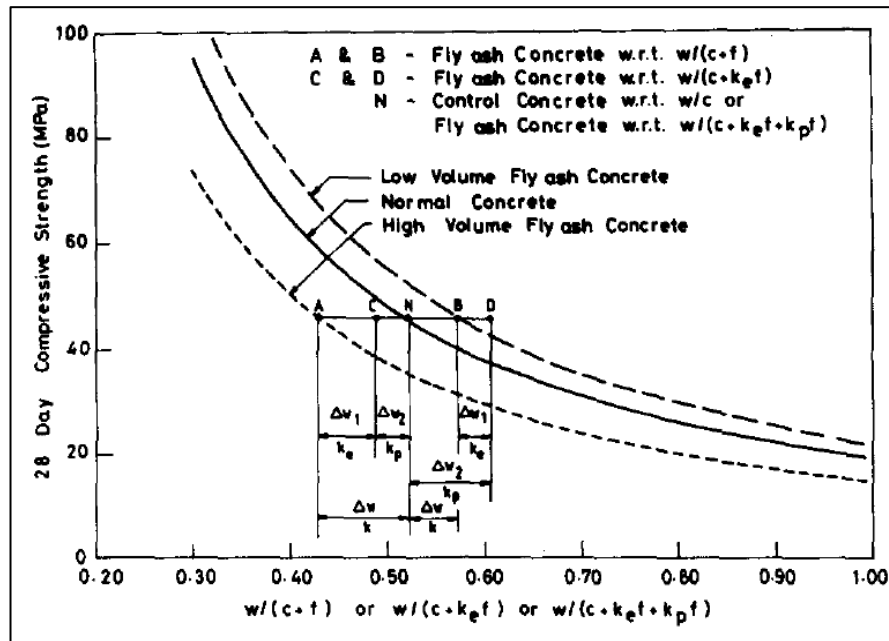
k -değeri kavramı, literatürde ilk kez Smith tarafından ortaya atılmıştır [31]. Smith, uçucu küllü betonların tasarımı üzerine yaptığı çalışmasında, uçucu küllü betonların erken dayanımının düşük olmasından yola çıkmıştır. Uçucu kül içeren betonların, erken dönemdeki dayanım kaybını tasarım aşamasında düzeltmek için araştırma yapan Smith, betonun basınç dayanımı üzerinde en önemli etkiye sahip parametre olan su/çimento oranı üzerinden gitmiştir. Uçucu kül içeren betonların tasarımının, eski tasarım perspektifiyle yapılamayacağını ve yeni bir tür beton olarak ele alınması gerektiğini dile getirmiştir. Her uçucu külün bir “bağlayıcılık tesiri” olduğunu ve “ k ” ile ifade edildiğini, su/çimento oranını hesaplarken bu k -değerini kullanmanın gerektiğini söylemiştir. Smith’in mevzubahis çalışmasında izlediği yol şu şekildedir; öncelikle uçucu kül içeren betonların tasarımı için su/çimento oranını esas alan bir paradigma oluşturmuştur. Dayanım ile efektif su/çimento oranı (sadece portland çimentosu içeren betonlarda su/çimento oranına eşittir) arasındaki ilişkiyi grafiğe dökerek bir kontrol eğrisi (kontrol betonlarının deney sonuçlarıyla) elde etmiştir. Uçucu küllü beton numunelerin efektif su/çimento oranı bulmak ve buradan k -değeri elde etmek amacıyla, uçucu küllü betonların dayanımlarının bu grafikte denk geldiği su/çimento oranlarını tespit etmiş ve buradan kullanılan uçucu küllerin k -değerlerini formülü (Eşitlik 2.3) kullanarak elde etmiştir [31].

$$W/C = \frac{W}{C+KF} = \frac{W}{C} \left[\frac{1}{1+\left(\frac{KF}{C}\right)} \right] \quad (2.3)$$

Smith, bu çalışmasının sonucunda k -değerinin ön tasarım aşamasında 0.25 olarak alınabileceğini söylemektedir [31].

Smith’ten sonra, Babu ve Rao, literatürde kendilerinden önceki çalışmaların belirli yüzdede uçucu kül ikamesi için geçerli k -değerleri bulunduğunu ve her yüzdede uçucu kül katkısı için geçerli olacak bir k -değeri bulma yönteminin eksikliğini görerek daha farklı bir yöntem ile k -değerini hesaplamak amacıyla hareket

etmişlerdir. k -değerini, genel etkinlik faktörü (k_e) ve kullanılan uçucu kül oranına bağlı olan yüzdesel etkinlik faktörü (k_p) olmak üzere iki ayrı parçaya ayırmışlardır. k -değeri, k_e ile k_p 'nin toplamına eşittir (Şekil 2.2). Bu çalışmada, az miktarda uçucu kül içeren (%20 kadar), yüksek miktarda uçucu kül içeren ve sadece portland çimentosu ile üretilmiş üç farklı tipte numuneler incelenmiştir. Numunelerin su/bağlayıcı oranına karşılık gelen 28 günlük basınç dayanımları grafikte görülmektedir. Belirli bir basınç dayanımında, karşılaştırma yapılacak eğrileri kesen düz bir doğru çizilir. Kontrol numunelerinin su/bağlayıcı oranı ile uçucu kül katkılı betonunki arasındaki fark Δw ile gösterilir. Δw üzerinden k -değeri hesaplanır (Eşitlik 2.4). Ancak bu hesaplanan k -değeri k_e ile k_p 'nin toplamıdır. Yazarlar, bu çalışmalarında k_e 'nin 0.5 alınmasını önermektedirler. Bu çalışmanın bir başka çıktısı, uçucu kül miktarının artışı ile etkinlik faktörünün azalması sonucudur. Yani fazla oranda uçucu kül kullanılan betonlarda, k -değeri düşmektedir [32].



Şekil 2.2. 28 günlük dayanım ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki.

$$\Delta w = \frac{w}{c} \left[\frac{1}{\left\{1+k\left(\frac{f}{c}\right)\right\}} - \frac{1}{\left\{1+\left(\frac{f}{c}\right)\right\}} \right] \quad (2.4)$$

Akman ve Yücel, yaptıkları çalışmada k -değerini uçucu külün bağlayıcılığının çimentonun bağlayıcılığına oranı olarak tanımlamışlar ve hesaplamak için Bolomey formülünü kullanmışlardır (Eşitlik 2.5) [33]. Formülde; f_c basınç dayanımını, C

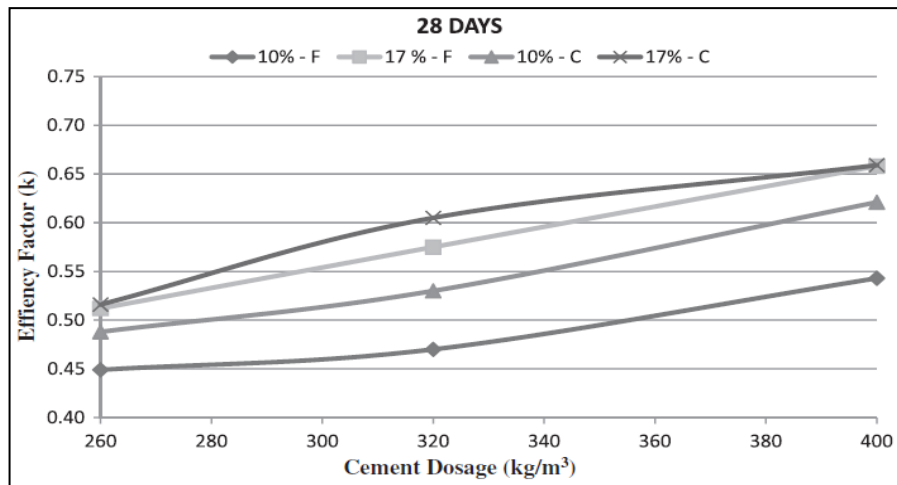
kg/m^3 cinsinden çimento içeriğini, $W \text{ kg/m}^3$ cinsinden su içeriğini, h hava içeriğini, K_B ise Bolomey sabitini temsil etmektedir.

$$f_c = K_B \left(\frac{C}{W+h} - 0.5 \right) \quad (2.5)$$

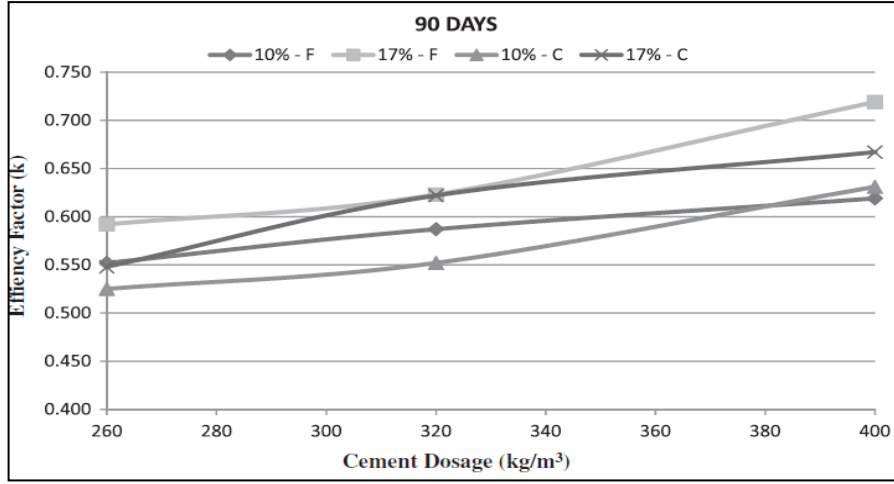
Bu denklemde tek bilinmeyen Bolomey sabitidir. Değerler yerine konarak istenilen karışım için geçerli K_B elde edilir. Elde edilen K_B aşağıda verilen eşitlikte yerine konarak formüldeki tek bilinmeyen olan k -değeri bulunur (Eşitlik 2.6). Bu formülde; k k -değerini, FA uçucu kül içeriğini temsil eder.

$$f_c = K_B \left(\frac{C+k.FA}{W+h} - 0.5 \right) \quad (2.6)$$

Yıldırım vd. F ve C sınıfı uçucu küllerin k -değerlerini karşılaştırdığı çalışmada %10 ve %17 değişim oranlarında k -değerlerini kıyaslamıştır. 260, 320 ve 400 kg/m^3 çimento içeriği, C sınıfı uçucu küller için %10, F sınıfı uçucu küller için %17 değişim oranı kullanılmıştır. 28 günlük ve 90 günlük dayanımlar üzerinden, C sınıfı ve F sınıfı uçucu küller için ayrı ayrı k -değerleri hesaplanmıştır. Çalışmanın sonucunda, 0.449 ile 0.719 arasında değişen değerler elde edilmiştir. Çimento içeriği arttıkça k -değerleri de artma eğilimi göstermiştir. F sınıfı uçucu küllerin 28 günlük dayanım sonucu hesaplanan k -değerleri, 90 güne göre daha düşüktür (Şekil 2.3). C sınıfı uçucu kül ile F sınıfı arasında 28 günlük dayanımda açık olan makas 90 günlük sonuçlarda daralmıştır (Şekil 2.4) [34].



Şekil 2.3. 28 günlük dayanım sonuçları ve k -değeri ilişkisi.



Şekil 2.4. 90 günlük dayanım sonuçları ve k -değeri ilişkisi.

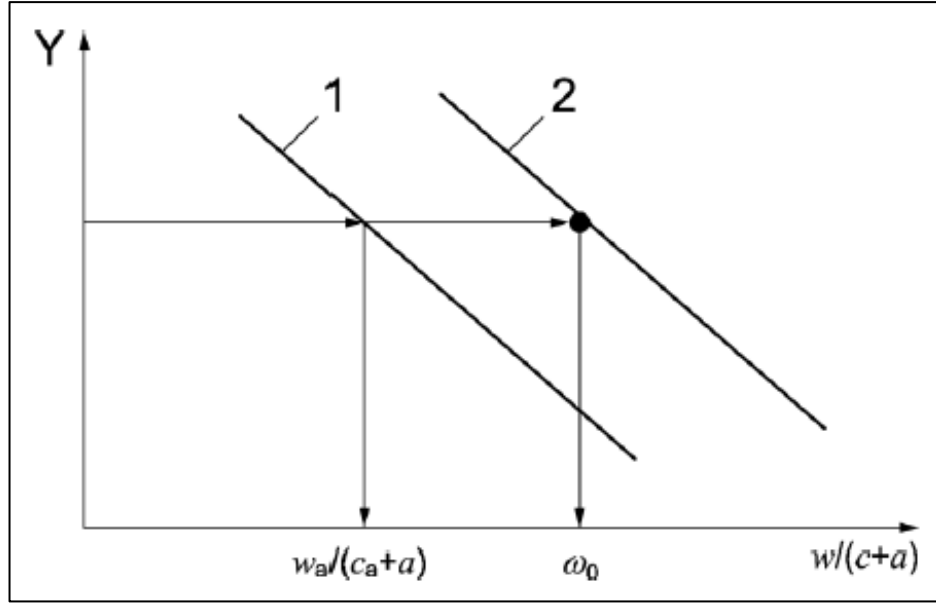
TS EN 206-1'in 5.2.5.2.2 bölümünde k -değeri 0.4 olarak belirlenmiştir [6]. Standart tarafından k -değeri belirlenmesinin nedeni uçucu kül için ayrı bir deney uygulaması yapmadan kullanım sağlamaktır. Bu k -değeri, *eğer uygunluk test edilmişse* değiştirilebilir [7]. TSE CEN/TR 16639 " k -değeri kavramı, eşdeğer beton performansı kavramı ve kombinasyonların eşdeğer performans kavramlarının kullanımı" teknik raporunda, k -değerinin nasıl hesaplanacağı anlatılmaktadır [7]. Basitçe, k -değeri mineral katkılı betonun şahit beton ile aynı dayanıma ulaşmasında mineral katkının etkisini belirtir. Yani mineral katkının etkinliğini gösteren k -değerinin hesaplanmasında katkılı beton ve şahit betondan elde edilen su/çimento oranı ile basınç dayanımı ilişkisi kıyaslanır (Eşitlik 2.7) (Eşitlik 2.8) [7]. Eğer eşit dayanım şartı kabul edilmişse özel bir k -değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Şekil 2.5) [7]. Bu grafikte 1 numaralı doğru a miktarında mineral katkı içeren betonu, 2 numaralı doğru kontrol betonunu, Y ise dayanımı temsil eder. Yani kontrol betonu ile a miktarında mineral katkı içeren betonun dayanım açısından ilişkisi irdelenir.

Kontrol betonunun dayanım-su/çimento ilişkisi;

$$f_o = A_o - B_o \times \omega_o \quad (2.7)$$

Mineral katkılı betonun dayanım-su/çimento ilişkisi;

$$f_a = A_a - B_a \times (w/(c+a)) \quad (2.8)$$



Şekil 2.5. k -değerinin belirlenmesindeki prensip.

TSE CEN/TR 16639'a göre, mineral katkı kullanılmadan üretilen kontrol betonu ile mineral katkı kullanılarak üretilen beton arasında su/çimento oranı ile basınç dayanımı arasında *deney sonuçlarına dayalı fonksiyonel bir ilişki belirlenmişse* f_o ve f_a birbirine eşitlenebilir (Eşitlik 2.9) [7].

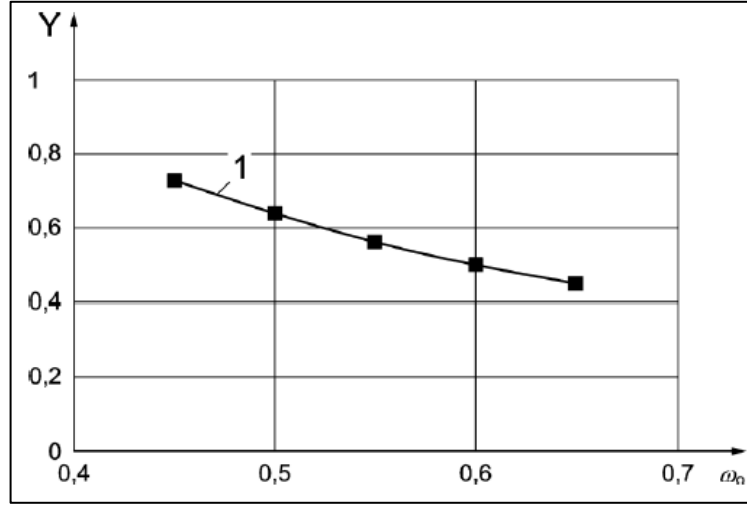
$$f_o (\text{kontrol}) = f_a (\text{mineral katkılı}) \quad (2.9)$$

Bu eşitlik düzenlenirse k -değeri;

$$k = \frac{(A_a - A_o)(1 + a/c)}{B_a \cdot a/c} * \frac{1}{\omega_o} + \left[\frac{B_o \cdot (1 + a/c)}{B_a} - 1 \right] \cdot \frac{1}{a/c} \quad (2.10)$$

- ω_o = katkısız referans betonun su/çimento oranını,
- w_a = katkılı betonda kullanılan su miktarını,
- c_a = katkılı betonda kullanılan çimento miktarını,
- a = uçucu kül miktarını,
- ω_a = katkılı betonun su/çimento oranını (w_a/c_a)
- f_o, f_a = betonların basınç dayanımları [mPa]
- A_o, A_a, B_o, B_a = su/çimento oranı ile kontrol betonu ve katkılı beton dayanımları arasındaki lineer ilişkiye ait ampirik katsayılar

Denklemden anlaşılacağı üzere, k -değeri TSE CEN/TR 16639’de tariflenen yöntemle su/çimento oranının bir fonksiyonu olarak elde edilir (Şekil 2.6) [7].



Şekil 2.6. Örnek bir k -değeri - su/çimento oranı grafiği.

2.2.1.2. Eşdeğer Beton Performansı Kavramı

TS EN 206-1’de eşdeğer performans konsepti tanımlanmıştır. Bu kavrama göre, mineral katkılı betonun dayanım ve dayanıklılık açısından referans beton ile kıyaslandığında eşdeğer performansı gösterdiğinin kanıtlanması gerekir [6]. Eşdeğer beton performansını değerlendirmek için üretilecek numunelerde kullanılan mineral katkının ve çimentonun özellikleri bilinmelidir. Dayanıklılık açısından deneye tabii tutulacak numunelerden elde edilen sonuçların referans betona eşit veya referans betondan daha iyi olması durumunda deneye tabii tutulan betonun performansının referans betonuna eşit olduğu kabul edilir [7]. Eşdeğer dayanıklılık performansının değerlendirilmesinde dikkate alınan çevresel etkilerden bazıları; karbonatlaşma etkisi, klorür penetrasyonu, donma-çözülme, deniz suyu etkisi ve sülfat etkisidir.

2.2.2. Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkisi

Uçucu külün pozolanik özelliğinin keşfedilmesi ve betonda kullanımı, neredeyse yüz yıl öncesine kadar uzanmaktadır [35]. Bu süre zarfında uçucu külün taze betonun ve sertleşmiş betonun üzerindeki etkileri araştırma konusu olmuştur. Bu

başlık altında, uçucu külün, işlenebilirlik, terleme, priz süresi, hidrasyon ısısı, basınç dayanımı ve geçirimsizlik üzerindeki etkileri incelenecektir.

2.2.2.1. İşlenebilirlik

Uçucu külün su ihtiyacına etkisi, uçucu külün inceliği, tanecik şekli, karbon içeriği (kızdırma kaybı) ve CaO içeriği ile değişkenlik gösterir. Betonun su ihtiyacının, çimentonun uçucu kül ile değişimi kanalıyla azalması, betona sabit bir su içeriğiyle daha akıcı bir kıvam kazandırır. Uçucu kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açması hasebiyle betonda daha az su ihtiyacına neden olur. Uçucu kül katkılı betonların su ihtiyacı, inceliğe göre değişmektedir [3].

Chindaprasirt vd. portland çimentosu, normal uçucu kül, 75 µm elekten geçen uçucu kül ve 45 µm elekten geçen, değişim oranı %40 olacak şekilde uçucu kül kullanarak harçlarla yaptığı çalışmada sabit yayılma için gereken su miktarının uçucu külün inceliğiyle azaldığını ortaya koymuşlardır. Normal uçucu kül referans numunelerine göre %8.4, 45 µm elekten geçen uçucu kül referans numunelerine göre %14, 75 µm elekten geçen uçucu kül referans numunelerine göre %19.6 daha az suya ihtiyaç duymaktadır [36].

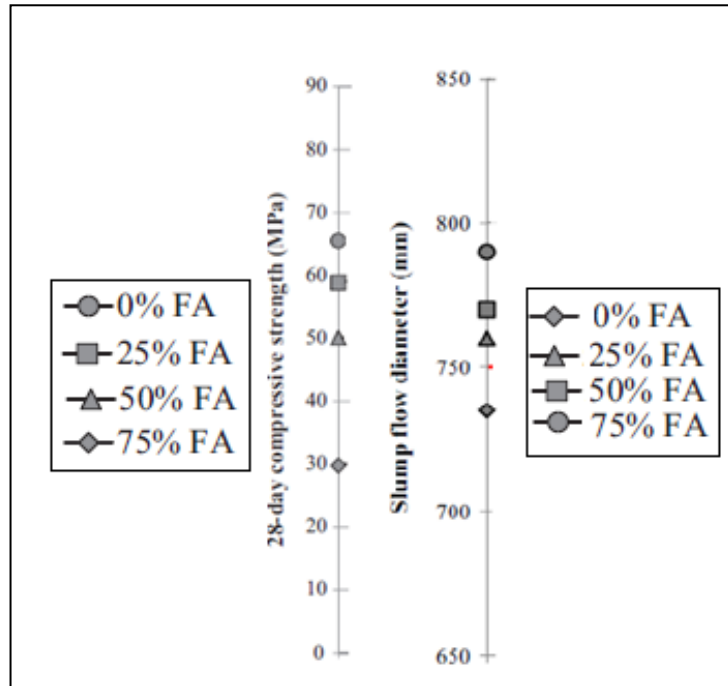
İyi incelikte, düşük karbon içerikli, uygun kimyasal birleşimli uçucu kül kullanımı, betonun su ihtiyacını azaltır. Karışımdaki miktarı düzgün belirlenmiş bir uçucu kül katkılı beton, aynı kıvam sınıfında, bağlayıcı olarak yalnızca çimento içeren betona göre daha kolay pompalanır, yerleştirilir ve işlenebilir. Kullanılan uçucu külün karbon içeriği, su ihtiyacını belirleyen faktörlerden birisi olduğu için önemlidir. Uçucu kül kullanımı, betonun birleşenlerinin birbirlerine bağlanmasını artırır ve ayrışmaya karşı daha iyi performans gösterir. Uçucu kül taneciklerinin küresel biçimi sayesinde karışım daha akıcı olur [26].

Duran-Herrera vd. tarafından yapılan çalışma, 0.50 su/bağlayıcı oranında %0, %15, %30, %45, %60 ve %75 uçucu kül ikameleriyle betonun slump değerlerini ve 20 dakika, 40 dakika, 1 saat, 1 saat 20 dakika, 1 saat 40 dakika ve 2 saat sonraki slump kayıplarını içermektedir. Çalışmanın sonucunda uçucu kül ikamesinin 10 – 40 mm arasında slump artışı sağladığı görülmektedir (Tablo 2.5) [37].

Tablo 2.5. Uçucu kül içeriği – slump ilişkisi.

Uçucu kül içeriği (%)	Slump (mm)
0	220
15	250
30	250
45	260
60	250
75	230

Güneyisi vd. 0.33 su/bağlayıcı oranında kendiliğinden yerleşen kontrol numuneleri (%0 FA), %25 uçucu kül ikameli numuneler (%25 FA), %50 uçucu kül ikameli numuneler (%50 FA) ve %75 uçucu kül ikameli numuneler (%75 FA) kullanarak yaptıkları çalışmada slump yayılmalarını karşılaştırmışlardır. Yüksek oranda uçucu kül ikameli betonlar reolojik olarak daha başarılıdır. Ancak aynı su/bağlayıcı oranında uçucu kül ikamesiyle birlikte 28 günlük basınç dayanımları düşmüştür (Şekil 2.7). Aynı su/bağlayıcı oranında uçucu kül ikamesi arttıkça basınç dayanımı düşmüştür ancak slump yayılımı ve işlenebilirlik artmıştır [38].



Şekil 2.7. 28 günlük basınç dayanımları ve slump yayılmaları.

2.2.2.2. Priz Süresi

Jawed ve Skalny'ye göre, F sınıfı uçucu kül, erken safhada C_3S 'in hidratasyonunu azaltır ve bundan ötürü, priz süresi uzar [39]. Uçucu külün priz üzerindeki etkisi, uçucu külün miktarı, inceliği, kimyasal birleşimi ile alakalıdır. Ancak unutulmamalıdır ki, uçucu küle bağlı etkiler, çimento inceliği, su içeriği ve ortam sıcaklığı kadar büyük değildir [40].

Duran-Herrera vd. tarafından yapılan çalışmada 0.50 su/bağlayıcı oranında %0, %15, %30, %45, %60 ve %75 F sınıfı uçucu kül ikameleriyle priz başlangıç-bitiş süreleri incelenmiştir (Tablo 2.6) [37].

Tablo 2.6. Priz süresi ile uçucu kül ikamesi ilişkisi.

Uçucu kül (%)	Priz başlangıcı (sa:dk)	Priz bitişi (sa:dk)	Priz süresi (dk)
0	4:45	6:13	88
15	4:53	6:24	91
30	5:02	7:08	126
45	5:35	7:41	126
60	6:30	8:25	115
75	7:05	9:30	145

C sınıfı uçucu küller, CaO içeriği nedeniyle, F sınıfı uçucu küllere göre priz süresi konusunda daha az olumsuz etkiye sahiptir. Bunun nedeni, hidrolik reaktivitenin kalsiyum içeriğiyle artmasıdır. Özellikle C sınıfı uçucu küller, karışımlarda kullanılmadan önce priz davranışını anlamak amacıyla test edilmelidirler [40].

Uçucu külün kimyasal birleşiminin priz üzerindeki etkisi Lane tarafından araştırılmıştır. Lane, 650 gram çimento kullanarak ürettiği kontrol numuneleri ile dört farklı yerden alınmış, farklı özelliklere sahip uçucu kül içeren, 406 gram çimento ve 244 gram uçucu kül kullanarak ürettiği harç numunelerin priz sürelerini karşılaştırmıştır. Lane'in kullandığı uçucu küller, farklı miktarda karbon içeriğine sahiptir. Çalışmasının sonucunda, kızdırma kaybı (karbon içeriği) arttıkça priz başlangıcının geciktiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, karbon içeriği fazla olan uçucu küle üretilen numunelerde daha fazla su kullanılmıştır (Tablo 2.7) [41].

Tablo 2.7. Uçucu külün birleşiminin priz başlangıcı üzerindeki etkisi.

				Priz Süresi (saat:dakika)
Çimento (g)	Uçucu Kül (g)	Su (ml)	Kızdırma Kaybı (%)	Başlangıç
650	0	165	0	2:10
406	244	169	2.35	3:25
406	244	169	3.16	4:00
406	244	186	10.45	4:20
406	244	243	15.68	6:25

2.2.2.3. Hidratasyon Isısı

Çimentonun suyla tepkimesi ısı üreten bir reaksiyondur. Bu ısı, çoğunlukla C_3S ve C_3A 'nın erken safhalarındaki hidratasyonu sırasında açığa çıkar. Hidratasyon seviyesi ve ısı üretimi, puzolanik katkı kullanıldığında daha farklı olur. Önce çimento hidrate olup $Ca(OH)_2$ oluşturur, uçucu kül ise bu $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girer. Hidratasyon ısısı betonun döküldüğü yerin büyüklüğüne göre artabilir. Uçucu kül kullanımı, hidratasyon ısısını düşürmek konusunda büyük avantajlar sağlar [42]. Büyük beton kütlelerinde özellikle uçucu kül katkı kullanımı yaygın görülmektedir.

Tokyay, Türkiye'den biri C sınıfı, diğer ikisi F sınıfı olmak üzere üç farklı uçucu kül kullanarak yaptığı çalışmada uçucu kül kullanımının hidratasyon ısısına etkisini incelemiştir ve bu çalışma kapsamında referans numuneleri, %10 değişimli uçucu küllü numuneler, %20 değişimli uçucu küllü numuneler ve %40 değişimli uçucu küllü numuneler kullanmıştır. Deneysel sonuçlar Tablo 2.8'de görülmektedir. Çalışmanın sonucunda uçucu kül değişim yüzdesi arttıkça hidratasyon sonucunda açığa çıkan ısı azaldığı görülmektedir [43].

Tablo 2.8. Farklı tip numuneler için hidratasyon ısıları [cal/g].

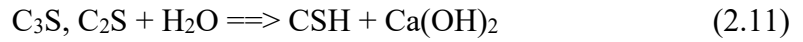
Gün	Referans	%10 Uçucu Kül		%20 Uçucu Kül		%40 Uçucu Kül	
7	72.4	69.3	68.8	61.4	59.8	42.9	40.3
28	83.1	73.3	72.4	70.8	69.2	60	58.7
90	102.7	97.6	98.5	94.3	92.4	89.8	88.6
180	106.8	100.8	101	96.9	97.3	93.2	91.9

Uçucu külün hidratasyon ısısına etkisi konusundaki araştırmalar F sınıfı uçucu küle yoğunlaşmıştır. C sınıfı, CaO içeriği yüksek uçucu küle kalsiyum içeriğinden ötürü hidratasyon ısısı F sınıfı uçucu küle göre daha yüksek olmaktadır [44].

2.2.2.4. Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı belirleyen ana etken, kullanılan çimento miktarı ve su/çimento oranıdır. İyi beton, taze haldeyken işlenebilir olan, sertleşmiş halde geçirimsiz, kalıcı ve yeterli basınç dayanımına sahip olan betondur. Uçucu külle bağlı olarak dayanım gelişimini etkileyen faktörler; uçucu külün özellikleri, uçucu külün kimyasal bileşimi, tane boyutları, reaktivite ve kür koşulları olarak sıralanabilir. Eskiden elde edilen uçucu küller daha iri taneliydiler, daha çok yanmamış kömür içeriyorlardı; yani puzolanik etkinlikleri düşüktü. Bu nedenle uçucu külün basınç dayanımını olumsuz etkilediğine dair genel bir kanı oluşmuştur. Ancak ilerleyen yıllardaki çalışmalarla, uçucu kül katkısının erken dönemde basınç dayanımı gelişiminde düşüşe sebep olmasına karşın, nihai dayanımda sadece çimento içeren betonlarla yakın dayanımlara ulaşabildiği teamül olarak kabul görmüştür.

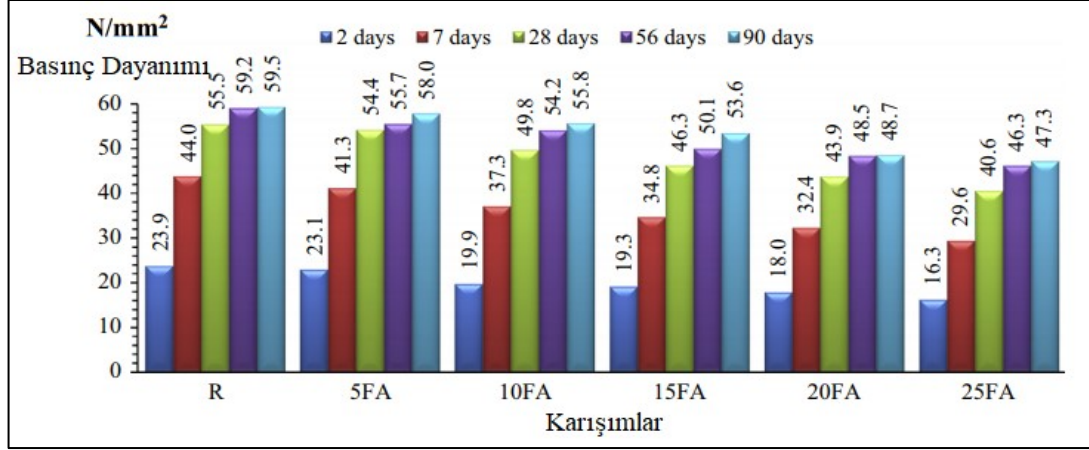
Çimentonun hidratasyonu (Eşitlik 2.11) sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 , puzolanik tepkime (Eşitlik 2.12) sonucunda daha fazla CSH jeli oluşturur [45].



Hidratasyon seviyesi ve olgunluk, betonun basınç dayanımını belirleyen en önemli faktörlerdir. Çimento yerine uçucu kül katılınca, çimento miktarı azaldığından ötürü başta reaksiyonlar azalır. Uçucu külün reaksiyona girmesi daha geç zamanlarda olur. Öte yandan, uzun vadede dayanım konusunda, boşlukları doldurması, daha üniform bir yapı ve uzun vadede daha fazla CSH jeli oluşturması sebebiyle uçucu kül kullanarak benzer seviyelere çıkılabilir [46].

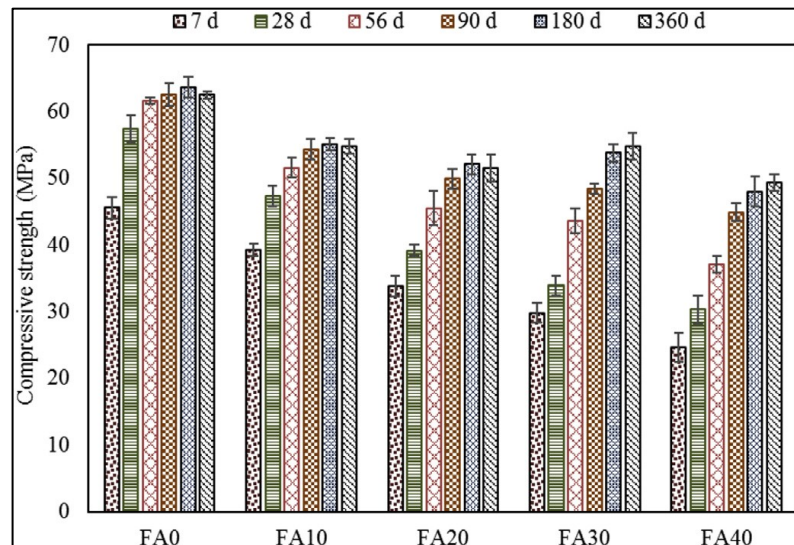
Uçucu kül kullanımının basınç dayanımına etkisi, Koçak ve Nas tarafından yapılan çalışmada konu edinilmiştir. Araştırmacılar, CEM I 42.5R çimento ile ürettikleri referans numuneleri ile %5 uçucu kül ikameli, %10 uçucu kül ikameli, %15 uçucu kül ikameli, %20 uçucu kül ikameli ve %25 uçucu kül ikameli karışımlar arasında basınç dayanımı açısından karşılaştırma yapmışlardır (Şekil 2.8). Ürettikleri numunelerin 2 gün, 7 gün, 28 gün, 56 gün ve 90 gün sonunda basınç dayanımlarını ölçen araştırmacılara göre, uçucu kül ikamesi arttıkça erken dayanım gelişimi zedelenmektedir. Ancak 90 günlük basınç dayanımlarında uçucu kül ikameli

numuneler referans betonun dayanımına %80 - %97 seviyelerinde yaklaşmıştır. Buna dayanarak uçucu kül kullanımının erken dayanımda negatif bir etki yarattığını ama bu etkiyi uzun vadede telafi edebileceğini söylemek mümkündür [47].



Şekil 2.8. Uçucu kül katkıli beton karışımlarının basınç dayanımları.

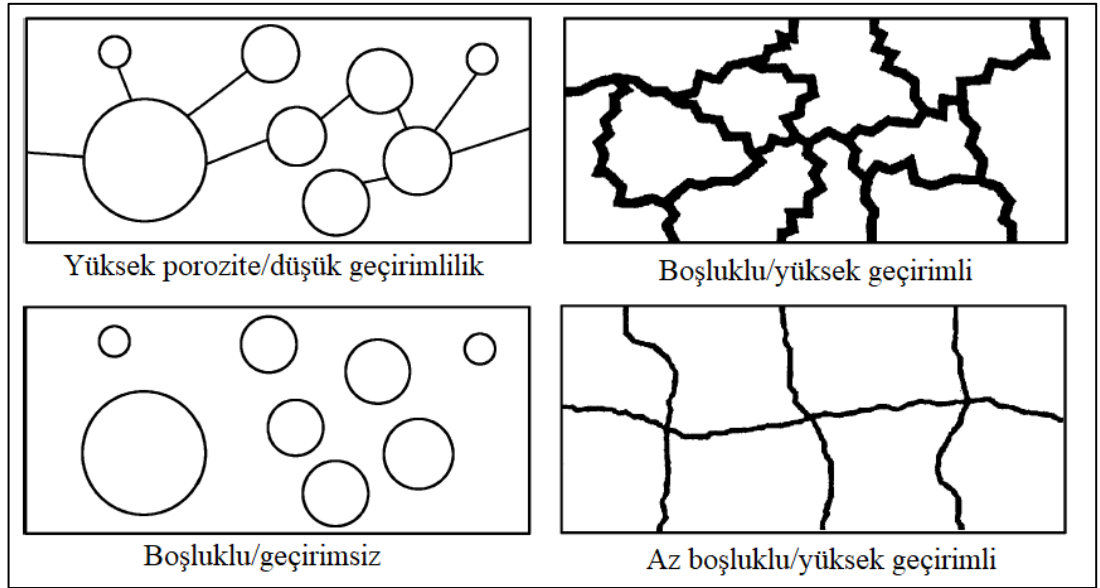
Saha tarafından yapılan çalışmada 0.35 su/bağlayıcı oranında kontrol numuneleri ile %10, %20, %30 ve %40 uçucu kül ikameli 100 mm x 200 mm silindir numuneler arasında 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük basınç dayanımı açısından kıyaslanmışlardır. Çalışmanın sonucunda, uçucu kül ikameli serilerde ikame oranı arttıkça erken dayanımın düştüğü görülmektedir. Uzun vadede ise uçucu kül içeren numunelerin dayanımlarının arttığı ancak kontrol numunelerine yetişemediği izlenebilir (Şekil 2.9) [48].



Şekil 2.9. Uçucu kül katkıli beton karışımlarının basınç dayanımları.

2.2.2.5. Geçirirnililik

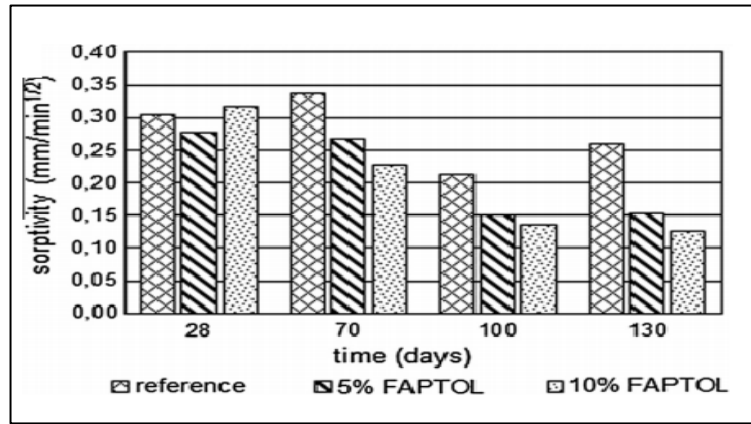
Beton boşluklu bir malzemedir ve su, diğler sıvılar veya gazlar belirli koşullarda betona nüfuz edebilirler. Betonun dışarıdan gelebilecek, su, agresif çözeltiler ve iyonlar, asit gibi zararlı olabilecek etkenlere karşı dayanıklılığı adına, geçirimsiz olması büyük önem arz etmektedir. Beton ne kadar geçirimsiz ise, suya ve diğler zararlı etkenlere karşı o kadar dayanıklıdır. Betonun geçirimsizliği, porozite ile direkt olarak değişime uğrayan bir özellik değildir. Betonun geçirimsizliğinde agrega granulometrisi, çimento içeriği, su içeriği, hava içeriği ve kür koşulları etkilidir. Betonun geçirimsizliği ile porozite arasındaki ilişkide, boşluk oranından çok boşlukların büyüklüğü, dağılımı ve birbiriyle sürekliliği önem arz eder. Betonun suya karşı geçirirnililiği, boşlukların birbiriyle bağlantısına bağlıdır (Şekil 2.10) [49]. Uçucu kül katılımıyla ve düşük su/çimento oranıyla geçirirnililik azaltılabilir. Puzolanik reaksiyon sonucunda CSH miktarı artar ve boşlukları doldurur. Bu nedenle geçirirnililik azalır.



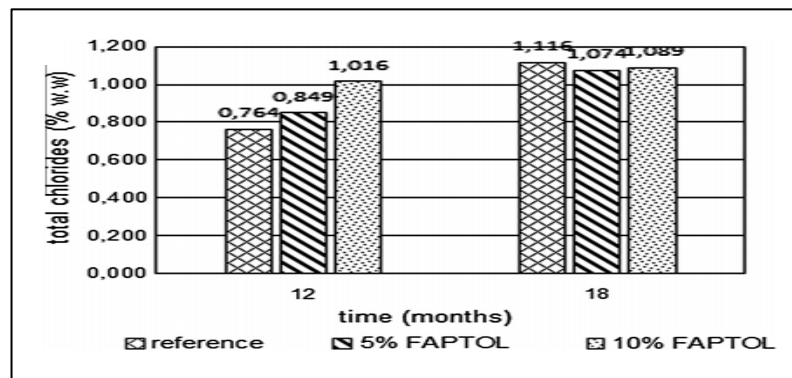
Şekil 2.10. Porozite-geçirirnililik arasındaki ilişki.

Chousidis vd. tarafından yapılan çalışmada uçucu küllü betonların geçirirnililikleri konu edilmiştir. Uçucu külü %5 (%5 FAPTOL) ve %10 (%10 FAPTOL) oranlarında değişimle kullanan araştırmacılar, kısmi şekilde %3.5 derişimli NaCl çözeltisine maruz kalan numunelerin yüzey emme ve klorür

konsantrasyonlarını teste tabi tutmuşlardır (Şekil 2.11) (Şekil 2.12). Klorür konsantrasyonunu tayin etmek için 100 mm x 50 mm silindir numuneler üreten araştırmacılar, yüzey emme testi için 100 mm boyutlu küp numuneler kullanmışlardır. Araştırmanın sonucunda, %5 ve %10 uçucu kül ikamesinin yüzey emmesini azalttığı görülmektedir. Bu azalma 70 günden sonra fark edilir seviyeye ulaşmıştır. %10 uçucu kül ikamesinde bu azalma oldukça belirgindir. Araştırmacılar bu sonucu uçucu külün çimentoya göre daha ince bir malzeme olmasına ve daha fazla yüzey alanına sahip olması, bunun da betonun boşluklarını doldurarak geçirimsizliği azalttığı varsayımına dayandırmaktadır. 18 ay sonundaki klorür konsantrasyonları benzer sonuçlar vermiştir [50].



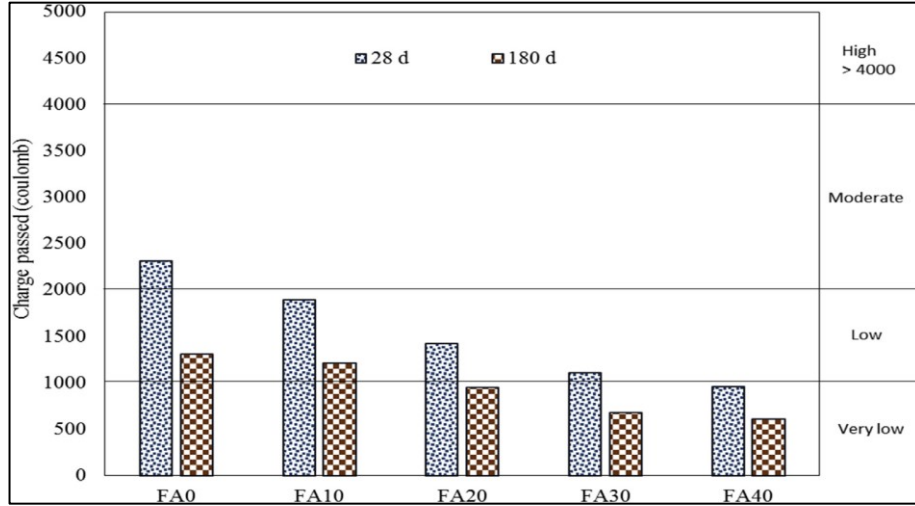
Şekil 2.11. Referans, %5 uçucu kül katkılı ve %10 uçucu kül katkılı numunelerin yüzey emme sonuçları [$\text{mm}/\text{min}^{1/2}$].



Şekil 2.12. Referans, %5 uçucu kül katkılı ve %10 uçucu kül katkılı numunelerin yüzdece klorür konsantrasyonları.

Saha tarafından yapılan araştırmada 0.35 su/bağlayıcı oranında kontrol numuneleri ile %10, %20, %30 ve %40 uçucu kül ikameli silindir numuneler klorür

geçirirmliliğine karşı incelenmiştir. 28 gün ve 180 günlük numuneler 50 mm boyutunda bloklar halinde kesilmiş bu örnekler 6 saat boyunca 60V akıma maruz bırakılmıştır. Örneklerin bir tarafı %3 derişimli NaCl çözeltisiyle, diğer tarafı ise NaOH solüsyonuyla temas etmektedir. Numunelerden geçen toplam akım irdelenmiştir (Şekil 2.13). Sonuçlara bakılırsa, uçucu kül ikame yüzdesi arttıkça klorür geçirirmliliği ciddi miktarda azalma gösterir [48].



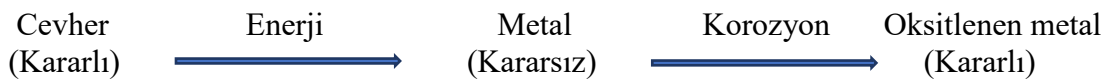
Şekil 2.13. Uçucu külün klorür geçirirmliliğine etkisi.

2.3. Donatı Korozyonu

Betonarme 1867 yılında Joseph Monier isimli bir bahçıvan tarafından bulunmuştur. Donatılandırılmış beton anlamına gelen betonarme, Fransızca kökenli *béton* ve *armer* sözcüklerinin birleşiminden oluşur [51]. Bulunuşundan itibaren yaklaşık 150 sene geçmesine ve bu süreçte üstel olarak artan teknolojiye rağmen, betonarme yapı sektörünün esas taşıyıcı malzemesi olmaya devam etmektedir. *Beton dağınık fazı mineral kökenli agregası, matris fazı çimento hamuru olan daneli kompozit bir yapı malzemesidir* [52]. Betonun yüksek basınç dayanımına karşın çekme dayanımı çok düşüktür. Bu nedenle, çelik ile donatılandırılır. Bu ikili yapıda, beton basınç kuvvetlerini, çelik çoğunlukla çekme kuvvetlerini taşır. Betona gömülü halde bulunan çelik, beton tarafından fiziksel ve kimyasal etkilere karşı korunur. Fiziksel koruma çeliğin sudan, suyun taşıdığı zararlı iyonlardan ve asitlerden korunmasıyla, kimyasal korumaysa bazik bir ortam yaratılmasıyla gerçekleşir. Hidratasyon sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 ve çimentodaki alkaliler betonun pH

seviyesini yükseltir. Mukavemetini kazanmış bir betonun pH değeri 12.6 ila 13.5 arasındadır [10]. Bu bazik ortam sayesinde, çelik donatının üzerinde bir pasif tabaka oluşur ve bu tabaka sayesinde donatı korozyondan korunur. Ancak pH seviyesinin düşmesi, zararlı iyonların donatıya kadar ulaşarak pasif tabakaya zarar vermesi gibi nedenlerden ötürü donatı korozyona karşı savunmasız hale gelebilir. Betonarme elemanların korozyona uğraması sonucu pas oluşur. Ortaya çıkan korozyon ürünü, 6 kata kadar daha fazla hacim kapladığı için içsel gerilmeyi artırır ve çatlaklara, beton örtüsünün tabakasının olduğu gibi sıyrılmasına, beton ile donatı arasında aderans kaybına yol açar. Betonarme yapıların servis ömürleri, elemanların hasarsız oldukları kabulüyle yapılır. Bu nedenle, korozyon, servis ömrü hususunda önemli bir etkidir. Ayrıca yapı sağlığı konusunda göz önünde bulundurulması gerekir.

Korozyon ile ilgili terminolojiye göre korozyon, metal ve alaşımların çevreleri ile girdikleri kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeler sonucu bozulmasıdır [53]. Korozyon sözcüğü, Latince kemirmek anlamına gelen “con rodere” sözcüğünden türemiştir [3]. Korozyon, dışarıdan enerji verilmeden metallerin içinde bulundukları ortamla reaksiyonları sonucu gerçekleşir. Metaller doğada oksit ve sülfür bileşikleri halinde bulunurlar. Bu durumda metallerin serbest enerjileri en düşük seviyededir. Mineraller metalürjik fırınlarda enerji verilerek metal haline getirilir. Bu metaller, sınai olarak kullanılabilmeleri için verilen enerjiyi geri vererek doğadaki düşük enerjili hallerine dönme eğilimindedir (Şekil 2.14). Korozyon sert bir mekanığe sahiptir ve metaller için kaçınılmazdır, ancak olayın gerçekleşme hızı inşaat mühendisliği için önemlidir.



Şekil 2.14. Metallerin işlenmesi ve korozyona uğraması süreçleri.

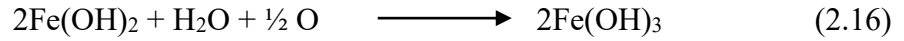
Korozyon olayında birisi anotta oksidasyon, diğeri katotta redüksiyon olmak üzere iki elektrokimyasal reaksiyon oluşur. Bu açıdan korozyon olayı kendiliğinden akım üreten bir galvanik pil olarak düşünülebilir. Bir metal, elektrolit içinde yalnız başına bulurken korozyona uğrayabilir. Metal yapısında veya yüzeyinde oluşan bazı farklılıklar nedeniyle iki bölge arasında bir potansiyel farkı oluşabilir. Bunun nedeni, betonun genellikle homojen olmayan yapısı sonucunda betonda farklı bölgelerdeki su, klor ve oksijen konsantrasyonunun aynı olmayışıdır [54]. Bunun sonucunda metal

yüzeyinin bazı bölgeleri anot bazı bölgeleri de katot olur. Böylece mikro ve/veya makro boyutta korozyon hücreleri oluşur. Anot ile katot olaylarının eşzamanlı gerçekleşmesi, korozyonun oluşması açısından zorunludur. Korozyonun sürekliliği için katot ve anodun elektriksel akım geçişini sağlayan bir iletkenle bağlı olması ve anotta açığa çıkan elektronların katoda iletilmesi gerekir [55].

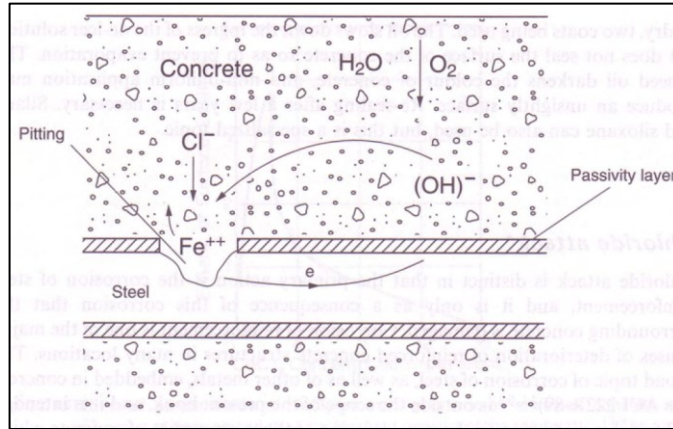
Beton oluşumun en önemli evresi olan C_3S ve C_2S 'in hidratasyonu sonucunda CSH jeli ve $Ca(OH)_2$ açığa çıkar. $Ca(OH)_2$ alkalinitesi yüksek bir ortam oluşmasına neden olur. Hidratasyonunu tamamlamış betonun pH seviyesi 12.6-13.5 arasındadır [10]. Bu bazik ortam sayesinde, donatı çeliğinin üzerinde yaklaşık 50 μm kalınlığında bir pasif film tabakası oluşur. Bu pasivasyon tabakası (Fe_2O_3), çelik donatıyı korozyona karşı koruyan esas unsurdur. Pasif film tabakası hemen oluşmaz. Bileşenlere karışım suyu eklendikten sonra pH, hidratasyon seviyesine ve açığa çıkan $Ca(OH)_2$ miktarına bağlı olarak gittikçe artar. Hidratasyon başladıktan sonra 160 saat içinde (yaklaşık bir hafta) pasivasyon tabakası donatıyı korozyondan koruyacak kadar stabilize hale gelir [56]. Pasifleşme etkisi sayesinde betonarme elemanlarda donatı korozyonu etkisi yok denecek kadar azdır. Ancak bu tabaka, betonun içinde bulunduğu ortam, ıslanma-kuruma etkisi, klor iyonlarının etkisi, betonda kullanılan malzemelerin içerebilecekleri yüksek klor miktarı ve karbonatlaşma olayı sonucu bölgesel veya bütün olarak zarar görüp işlevini yitirebilir. Bu, korozyon için uygun zemin hazırlar.

Betonarme elemanlarda korozyon fenomeni özetle şöyle açıklanır; öncelikle pasivasyon tabakası zarar görür ve donatı korozyona karşı savunmasız hale gelir. Betonun içindeki donatıda bir potansiyel fark olduğunda elektrokimyasal hücre oluşur. Elektrokimyasal hücre elektrolit, anodik bölge ve katodik bölgeden ibarettir. Betonarme elemanda anodik ve katodik bölgeler donatıda oluşur, beton ise anot ve katot bölgeler arasında elektron geçişinin olduğu elektrolit görevi görür. Korozyon için iki yarı hücre reaksiyonu da kesinlikle gerçekleşmelidir. Bu reaksiyonlardan birisi elektron üreten anodik reaksiyon, diğeri ise elektronu tüketen katodik reaksiyondur. Korozyon, metalin oksidasyonu ile anot bölgede başlar, demir elektron kaybederek iyon durumuna (Fe^{++}) geçer (Eşitlik 2.13). Oksidasyon sonucu açığa çıkan Fe^{++} iyonları elektrolitin içinde hareket etmektedir. Elektronlar (e^-) donatı boyunca hareket eder ve katodik bölge tarafından kazanılır. Anodik bölgede üretilen elektronların katodik bölgede oksijen ve su ile tepkimeye girmesiyle hidroksil iyonu (OH^-) oluşur (Eşitlik 2.14). Daha sonra OH^- iyonları ile Fe^{++} iyonları birleşerek ferro

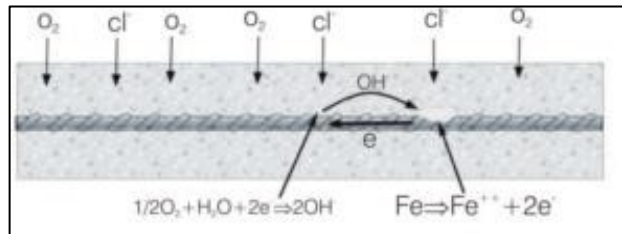
hidroksiti ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) oluşturur (Eşitlik 2.15). $\text{Fe}(\text{OH})_2$ su ve oksijenle tepkimeye girerek ferrik hidroksite ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) dönüşür (Eşitlik 2.16) (Şekil 2.15) [10].



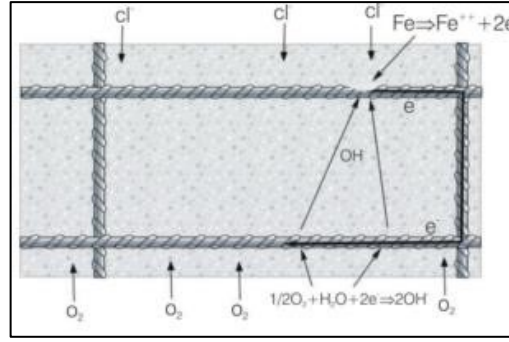
Anot ve katot bölgelerin birbirine mesafelerine göre mikrohücre veya makrohücre korozyonu adlandırmaları kullanılır. Anot ve katot bölgeleri birbirlerine çok yakınsa mikrohücre korozyonu (Şekil 2.16), birbirinden oldukça farklı noktalardalarsa makrohücre korozyonu görülür (Şekil 2.17) [57].



Şekil 2.15. Donatı korozyonunun şematik gösterimi.



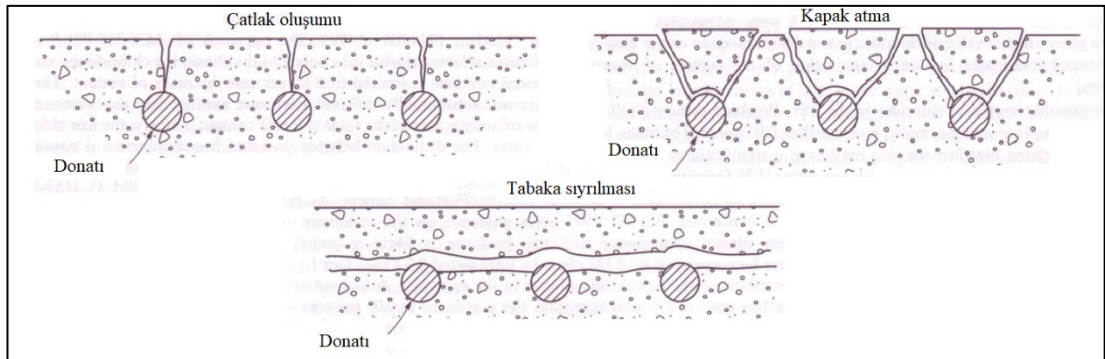
Şekil 2.16. Mikrohücre korozyonunun şematik gösterimi.



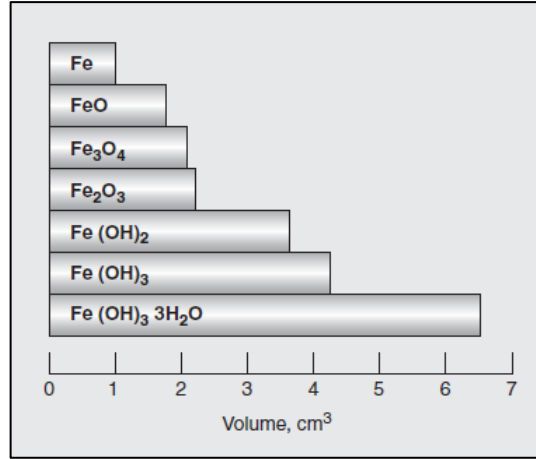
Şekil 2.17. Makrohücre korozyonunun şematik gösterimi.

2.3.1. Donatı Korozyonunun Yol Açtığı Hasarlar

Türkiye’de yapıların tasarımında kullanılan TS 500 ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik’e göre, seçilen malzemeler tam ve eksiksizdir. Yapıların güvenliği, servis ömürleri yapı elemanlarının hasarsız oldukları ön kabulüyle hesaplanır ancak donatı korozyonu sonucunda yapılarda çeşitli hasarlar görülebilir. Donatı korozyonunda, daha önce bahsedildiği gibi, donatı bir kısım kütle kaybeder ve korozyon ürünü olarak pas oluşur. Donatının kaybettiği kütle çoğunlukla yük taşıma kapasitesi açısından ihmal edilebilir seviyededir. Ancak korozyon ürünleri daha fazla hacim kaplar ve oluşan korozyon ürünü nedeniyle betonda çatlaklar meydana gelir, açılı bir şekilde kapak atma görülür ve hatta beton örtüsü tabaka olarak ayrılabilir (Şekil 2.18) [10]. Korozyon sonucu oluşan bileşiğe ve korozyonun seyrine de bağlı olarak 6 kata kadar daha fazla hacim artışı görülebilir (Şekil 2.19) [58].



Şekil 2.18. Korozyon sonucu görülen hasarlar.



Şekil 2.19. Korozyon sonucu oluşan korozyon ürünlerine göre hacim artışları.

Bunlara ek olarak, korozyon ayrıca beton ile donatı arasındaki aderansı da olumsuz etkiler. Fang vd. tarafından yapılan çalışmada beton ile donatı arasındaki aderansın korozyon ile arasındaki ilişki araştırılmıştır. Araştırmacılar, aderansın korozyon ile ters orantılı şekilde değiştiğini ortaya koymuşlardır. Aderans korozyon seviyesine göre dramatik değişiklikler göstermektedir [59].

2.3.2. Donatı Korozyonuna Etki Eden Faktörler

Betonarme elemanlarda gerçekleşen korozyon, çevresel etkenler ve beton özellikleri ile ilişkilidir. Bunlar, iki farklı başlık olarak inceleneceklerdir.

2.3.2.1. Çevresel Faktörler

Betonarme elemanlarda korozyonun en başat iki çevresel nedeni klorür etkisi ve karbonatlaşma olarak gösterilir [60].

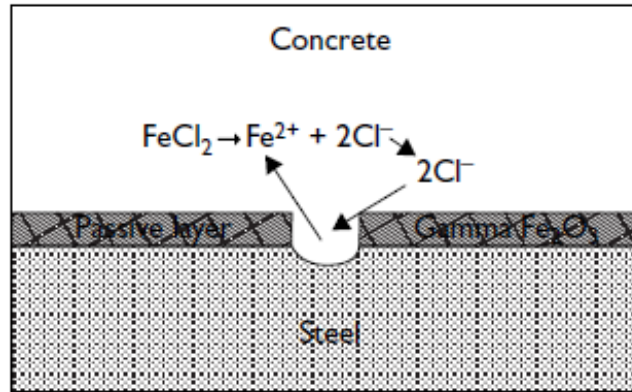
2.3.2.1.1. Klorür Etkisi

Verbeck'e göre, *klorür spesifik ve eşsiz bir yok edicidir* [10]. Klorür iyonları, betona farklı şekillerde giriş yapabilir. Betonun ana bileşenlerinden agregalar fazla klorür içerebilir, çimentodaki klorür içeriği yüksek olabilir, kalsiyum klorür (CaCl_2) içeren priz hızlandırıcı katkıları vasıtasıyla veya karışım suyu olarak deniz suyu

kullanılması nedeniyle betondaki klorür miktarı fazla olabilir. Ancak bu etkenler standartlar tarafından düzenlenmiştir, belli sınırların üzerinde klorür içeriğine izin verilmez (Tablo 2.9) [6]. Çoğunlukla korozyonu tetikleyen şey klorür iyonlarının betona taşınımıdır. Deniz suyu ile temas, buz çözücü tuzlar veya klor içeren maddelerin depolandığı yerler klorür difüzyonunun görüldüğü durumlardır. Korozyonun gerçekleşmesi için pasif oksit tabakasının zarar görmesi şarttır. Klorür iyonları pasif tabakaya hasar verir. Genel bir pH düşüşü gözlenmemesine rağmen hızlı bir seyrinde korozyon görülür. Klorür pasif tabakayı kırdıktan sonra girdiği tepkimeyle ortamda yeniden klorür iyonu bulunmasını sağlar (Şekil 2.20) [60]. Korozyon durumunda klorür iyonları katalizör görevi görür ve reaksiyonu hızlandırır [9].

Tablo 2.9. Çimento kütleline göre klorür miktarının sınır değerleri.

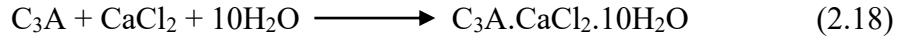
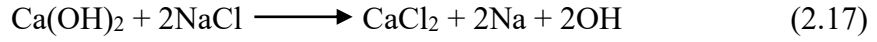
Kullanılan beton	Klorür içeriği sınıfı	Çimento kütleline göre en fazla Cl^-
Çelik donatı ihtiva eden	Cl 0,20	%0.20
	Cl 0,40	%0.40
Çelik öngerilme donatısı ihtiva eden	Cl 0,10	%0.10



Şekil 2.20. Klorür iyonlarının pasif tabakayı kırması ve geri dönüşümü.

Betondaki klorür iki şekilde değerlendirilmelidir; serbest klorür ve bağlı klorür. Korozyonu etkileyen serbest klorürdür. Bağlanmış klorürün bir kısmı hidrasyon ürünleri tarafından bağlanır. Bu tepkime klorür iyonları ile C_3A , C_4AF ve bunların hidrasyon ürünleri arasında gerçekleşir ve sonuçta Friedel tuzu olarak bilinen kalsiyumkloroalüminathidratı ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) oluşturur (Eşitlik 2.17) (Eşitlik

2.18) [61]. Friedel tuzu kısmen boşlukları azaltır ve betona klorür taşınımını yavaşlatır [62].



Tamamen kuru veya tamamen ıslak ortamlarda korozyon görülmez. Tamamen kuru betonda korozyonun gerçekleşmesi için gerekli olan su eksiktir. Tamamen suya gömülü betonlarda ise oksijen yetersizliği nedeniyle korozyon görülmemektedir [63].

2.3.2.1.2. Karbonatlaşma

Karbonatlaşma çimento hamurunun alkali bileşenleri ile atmosferdeki karbondioksit (CO_2) gazının betonun içine girerek özellikle bir hidratasyon ürünü olan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Reaksiyonun en önemli etkisi betonun pH derecesinin 8.5 civarına düşmesidir. Çoğu gaz gibi, CO_2 de suda çözünür ve asit haline gelir. Çoğu asidin aksine, karbonik asit (H_2CO_3) çimento hamuruna doğrudan zarar vermez. H_2CO_3 ile betonda alkaliniteyi sağlayan Ca(OH)_2 tepkimeye girer ve normalde bazik olan beton ortamı nötrlenir. Karbonatlaşma tepkimeleri aşağıda verilmiştir (Eşitlik 2.19, Eşitlik 2.20) [3]:



Karbonatlaşma hemen başlayıp biten bir olay değildir. Beton yüzeyinde başlar ve yüzeyden aşağıya doğru ilerler. Betondaki Ca(OH)_2 , uzunca bir süre pH seviyesinin yüksek kalmasını sağlayabilir. Karbonatlaşma normal koşullarda oldukça uzun sürer. Karbonatlaşmanın gerçekleşebilmesi için su ve devamlı CO_2 sirkülasyonu olması gerektiğinden, ortamın bağıl neminin en kritik olduğu seviye %50 civarlarıdır [3].

Karbonatlaşma olayının korozyon konusunda belirleyiciliği beton örtüsünün az veya çok olmasıyla alakalıdır. Ayrıca fazla beton örtüsü bırakılsa dahi betondaki boşlukların birbiriyle bağlantısı, düşük çimento içeriği, yüksek su/çimento oranı gibi faktörler nedeniyle karbonatlaşmaya dayalı korozyon görülebilir. Karbonatlaşma nedenli korozyonda, donatının belirli kısımları değil, karbonatlaşan taraftaki bütün yüzey korozyona uğrar. Düşük pH nedeniyle pasif oksit tabakası işlevini yitirir ve donatı savunmasız duruma gelir. Hasar, klorür nedenli korozyonun aksine bölgesel değil, bütünsel olur. Karbonatlaşmaya bağlı korozyon, klorürün yol açtığı korozyona göre daha seyrek görülmektedir [64].

2.3.2.2. Beton Özellikleri

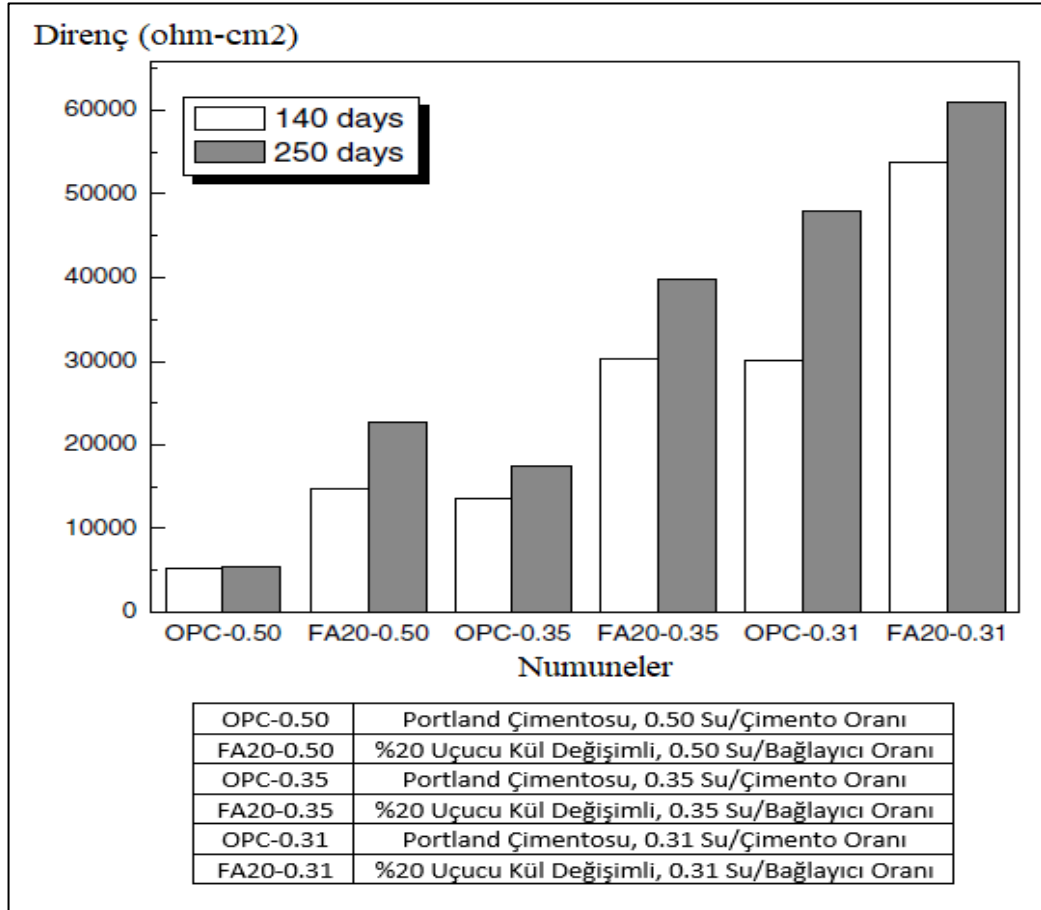
Su/çimento oranı, bulunduğu ortam, beton örtüsü kalınlığı, ıslanma-kuruma etkisi, nem, donma-çözülme etkisi, betonda bulunan çatlaklar da korozyonu dolaylı veya dolaysız etkileyen faktörlerdir.

2.3.2.2.1. Betonun Bileşimi ve İçinde Bulunduğu Ortam

Betonun birleşimi korozyon performansını etkileyen faktörlerden birisidir. Bu etki hem doğrudan hem de dolaylı yoldan olabilir. Örneğin, beton içerisindeki birleşenlerin klor iyonu içerikleri nedeniyle betonda korozyon görülebilir. Bu etki doğrudan olarak sınıflandırılabilir. Betonun geçirimsizliği, su/çimento oranı, puzolanik katkı kullanımı gibi etkenler de betonun korozyonuna dolaylı etki yapar. Geçirimsiz betona klor iyonu ve oksijen difüzyonu daha azdır. Bu nedenle korozyon daha geç başlar veya daha yavaş ilerler. Benzer şekilde, su/çimento oranı betonun bütün özelliklerine etki ettiği gibi korozyon performansına da etki eder. Düşük su/çimento oranlarında korozyon görülme ihtimali, yüksek su/çimento oranlarına göre daha düşüktür.

Farklı su/bağlayıcı oranları ve uçucu kül ikamesi ile donatı korozyonu arasındaki ilişki Choi vd. tarafından yapılan, 0.31, 0.35, 0.5 olmak üzere üç farklı su/bağlayıcı oranı ve %20 uçucu kül değişimi parametrelerine sahip araştırmada incelenmiştir. Numunelerde 55 mm x 240 mm silindirik numunenin içinde 12 mm çapında donatı bulunmaktadır. Numuneler %3.5 derişimli NaCl çözeltisinde plastik

tankın içinde bulunmaktadır. Araştırmanın sonucunda, uçucu küllü karışımların kontrol numunelerine göre daha yüksek elektriksel özdirenç değerlerine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2.21). Yüksek direnç daha düşük korozyon riskine delalettir. Ayrıca su/bağlayıcı oranının direnç değerlerini dramatik bir şekilde değiştirdiği de varılan bir diğer sonuçtur [65].



Şekil 2.21. Numune tipi – direnç ilişkisi.

Su/çimento, çimento içeriği (kg/m³) ve dayanım sınıfı konusunda, TS EN 206-1 belirli sınırlamalar getirmiştir. Karbonatlaşma nedenli korozyon, standartta etki sınıfı olarak tanımlanmış ve XC kısaltmasıyla gösterilmiştir (Tablo 2.10) (Tablo 2.13). Klorür nedenli korozyon ise deniz suyu etkisi (XS) ile deniz suyu dışındaki klorür etkisi (XD) olmak üzere ikiye ayrılmıştır (Tablo 2.11) (Tablo 2.12) (Tablo 2.14) [6].

Tablo 2.10. Karbonatlaşma nedenli korozyonun etki sınıfının tanımlanması.

XC1	Kuru veya sürekli ıslak	Tamamen suya gömülü betonlar, düşük nemli havaya sahip binaların iç kısımları
XC2	Islak, nadiren kuru	Uzun süreli su temasına maruz betonlar
XC3	Ortalama nem	Orta derecede veya yüksek nemli havaya sahip binaların iç kısımlarındaki betonlar, yağmurdan korunmuş açıkta bulunan betonlar
XC4	Döngüsel ıslanma kuruma	XC2 dışında su temasına maruz beton yüzeyler

Tablo 2.11. Deniz suyundan kaynaklanan klorürlerin neden olduğu korozyon.

XS1	Hava ile taşınan tuzlara maruz fakat deniz suyu ile doğrudan temas etmeyen	Sahil ve sahile yakın yerlerdeki yapılar
XS2	Sürekli olarak su içinde	Deniz yapıları
XS3	Gelgit, dalga ve serpinti bölgeleri	Deniz yapıları

Tablo 2.12. Deniz suyu haricindeki klorürlerin neden olduğu korozyon.

XD1	Orta derecede nem	Hava ile taşınan klorürlere maruz beton
XD2	Islak, ara sıra kuru	Yüzme havuzları, klorür içeren endüstriyel sulara maruz betonlar
XD3	Döngüsel ıslanma kuruma	Klorür içeren serpintilere maruz köprüler, döşemeler, araç park yeri döşemeleri

Tablo 2.13. XC etki sınıfı için sınırlamalar.

Etki Sınıfı	XC1	XC2	XC3	XC4
En düşük su/çimento oranı	0.65	0.60	0.55	0.50
Minimum çimento içeriği (kg/m ³)	260	280	280	300
Minimum beton dayanım sınıfı	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37

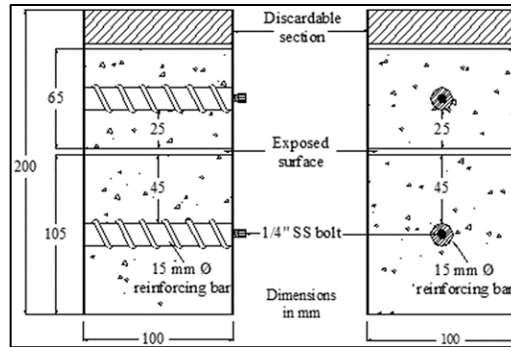
Tablo 2.14. XS ve XD etki sınıfları için sınırlamalar.

Etki Sınıfı	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3
En düşük su/çimento oranı	0.50	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45
Minimum çimento içeriği (kg/m ³)	300	320	340	300	300	320
Minimum beton dayanım sınıfı	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45

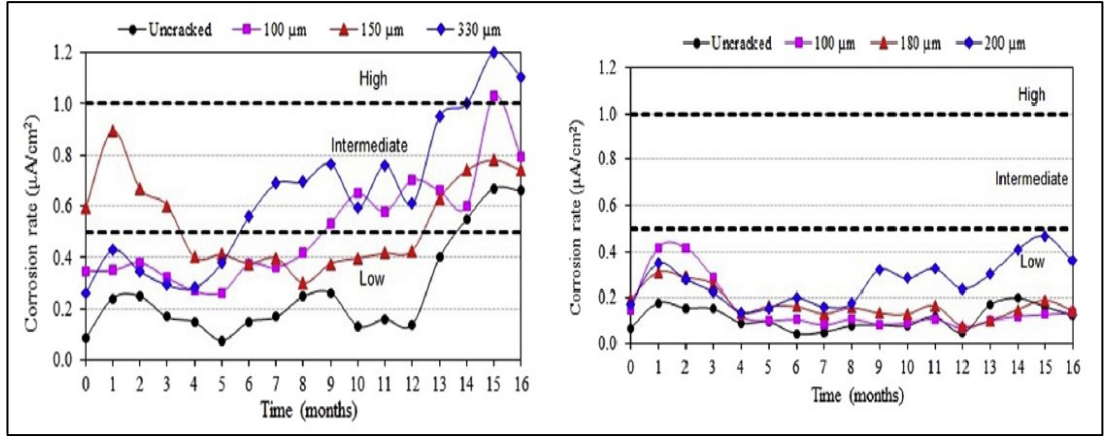
2.3.2.2.2. Beton Örtüsü Kalınlığı

Beton örtüsü; *donatıya gerekli aderansı sağlamak ve donatıyı dış etkilere korumak için gerekli net beton örtüsü* olarak tanımlanır [66]. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kurallarını belirleyen standarda göre beton örtüsü, hava koşullarına açık kolon ve kirişlerde en az 25 mm, yapı içindeki kolon ve kirişlerde en az 20 mm, perde duvar ve döşemelerde 15 mm'den daha düşük olamaz [66]. ACI 318'de sürekli zeminle temas halinde olan betonlarda 75 mm (3 inç), havayla temas eden betonlarda 50 mm (2 inç) ila 38 mm (1.5 inç) beton örtüsü önerilmektedir [67]. Yetersiz beton örtüsü yüzünden betona klor iyonlarının ve diğer zararlı etkenlerin (asit, sülfat vb.) girişi kolaylaşır. Aynı zamanda, bir yüzey olayı olan karbonatlaşma ile beton örtüsünün ilişkisini göz önünde bulundurmak gerekir. Karbonatlaşma yüzeyden başlayarak 25 mm - 30 mm aşağıya kadar etki gösterebilir [3]. Eğer donatı yeterince beton örtüsü ile korunmuyorsa beton örtüsü tamamen ayrılabilir ve donatı açığa çıkabilir. Betonun kullanılacağı yere göre tasarlanması ve gerekli riskler göz önüne alınarak beton örtüsünün artırılması korozyon açısından önerilebilir.

Lopez-Calvo vd. tarafından yapılan çalışmada, 25 mm ve 45 mm beton örtüsüne sahip, 0.40 su/çimento oranında, 100 mm x 200 mm boyutlarında silindir şeklinde ve 16 mm çapında nervürlü donatı içeren numuneler korozyon açısından kıyaslanmışlardır (Şekil 2.22). Numuneler 24 saatte 4 saat kuruma, 4 saat ıslanma, 8 saat kuruma, 4 saat ıslanma ve 4 saat kuruma çevrimine maruz bırakılmışlardır. Çalışma boyunca NaCl derişimi %3 - %4 arasında tutulmuştur. Numuneler çatlaksız, 100 µm, 150 µm, 180 µm, 200 µm ve 330 µm boyutunda çatlak içermektedir. Çalışmanın sonucunda, 45 mm beton örtüsüne sahip numuneler 25 mm beton örtüsüne sahip olanlara nazaran belirgin şekilde daha başarılıdır (Şekil 2.23) [68].



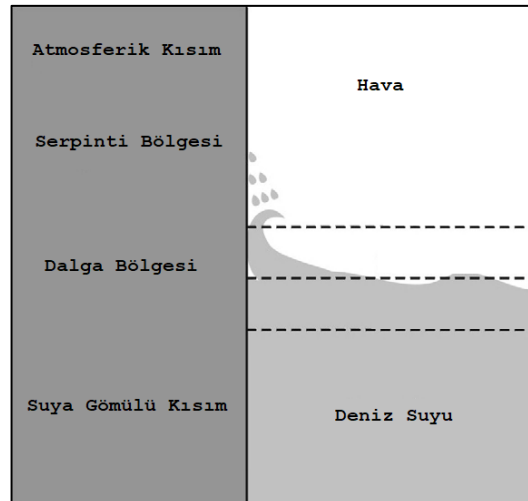
Şekil 2.22. Kullanılan numune tipi.



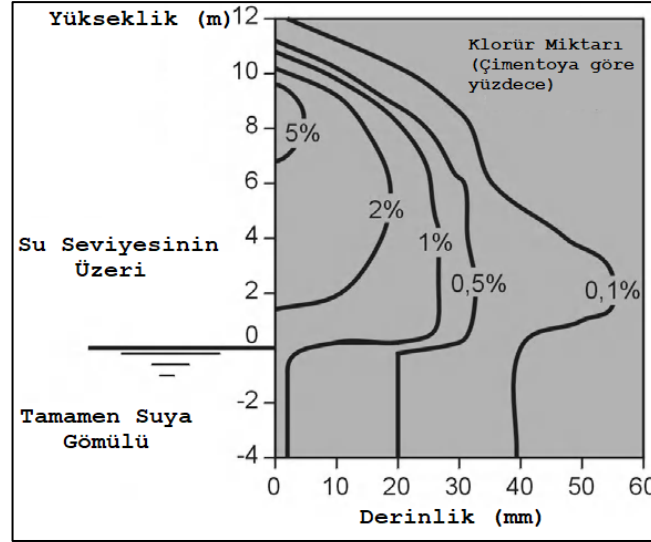
Şekil 2.23. 25 mm ve 45 mm beton örtüsü için korozyon oranı-zaman grafiği.

2.3.2.2.3. Islanma-Kuruma Etkisi

Islanma kuruma döngüsüne maruz deniz yapılarında betona, suda çözünmüş tuzlar taşınır [9]. Tekrarlı döngüler sonucunda kümülatif olarak artarak betonun içinde klorür birikir. Islanma kuruma etkisi, deniz yapılarının gelgite, dalgalara ve serpilmeye maruz kısımlarında görülür (Şekil 2.24) [63]. Betonun tamamen suya gömülü kısmında klorür yoğunluğu daha azdır (Şekil 2.25) [63]. Korozyon için gerekli oksijen difüzyonu tamamen suya gömülü kısımda olmadığından bu bölümde korozyon riski düşüktür.



Şekil 2.24. Deniz yapılarının klorür taşınımına ilişkin şematik gösterim.



Şekil 2.25. Su seviyesine göre mesafeyle klorür nüfuzunun değişimi.

2.3.2.2.4. Nem

Oksijen, katodik reaksiyonda tüketilir ve hidroksil iyonunu oluşturur. Korozyonun gerçekleşmesi için gereken oksijen ve su olmazsa olmazdır. Tamamen kuru ortamda beton korozyona uğramaz. Aynı şekilde, tamamen suya gömülüyken de korozyon görülmez. Korozyon için uygun nem oranı %70-%80 civarlarıdır [10]. Daha yüksek nemde oksijen difüzyonu ciddi derecede azaldığı için korozyon ihtimali düşer.

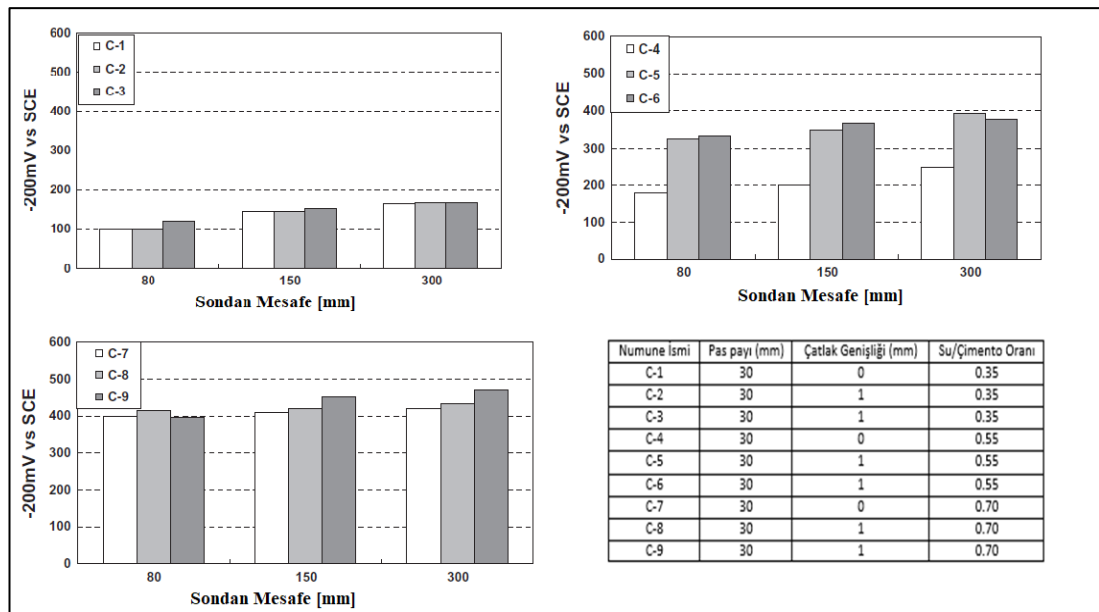
2.3.2.2.5. Betonda Bulunan Çatlaklar

Betonda rötre, oturma gibi nedenlerden dolayı oluşan çatlaklar korozyonu dolaylı ve dolaysız şekilde etkilemektedir. Çatlak bulunan betonlara zararlı madde girişi daha kolay olur. Ayrıca donatıya sağlanan fiziksel koruma çatlaklar nedeniyle bozulur. Çatlak genişliği ile korozyon arasındaki ilişki çatlak genişliği ile ilgilidir. TS 500 tarafından yapılardaki çatlak boyutları yapıların bulundukları ortama göre sınırlandırılmıştır (Tablo 2.15) [66]. Ayrıca çatlağın doğrultusu da büyük önem taşır. Donatıya dik doğrultuda çatlaklara nazaran donatıya paralel çatlaklar korozyon bakımından çok daha tehlikelidir [9]. Geçirimsizlik ile doğrudan ilintili bir fenomen olan korozyon, geçirimsizliği ciddi manada zedeleyen çatlakların varlığı ile artar.

Tablo 2.15. Çatlak genişliği için sınır değerler.

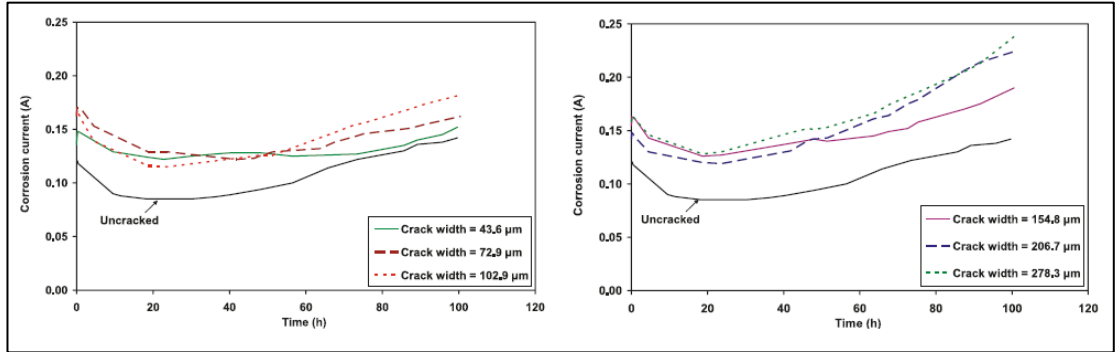
Yapı içi normal çevre koşulları	0,4 mm
Yapı içi nemli ve yapı dışı normal çevre koşulları	0,3 mm
Yapı dışı nemli çevre koşulları	0,2 mm
Yapı içi ve dışı agresif çevre koşulları	0,1 mm

Kim vd. yaptıkları çalışmada beton örtüsü, su/çimento oranı ve çatlak varlığı ve genişliğinin donatı korozyonuna etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar 30 mm ve 60 mm olmak üzere iki farklı beton örtüsü, 0.35, 0.55 ve 0.70 olmak üzere üç farklı su/çimento oranı, çatlaksız ve 1 mm'ye kadar çatlak bulunduran numuneler üzerinde çalışmışlardır. Döngüsel olarak klorüre maruz bırakılan numunelerde yarı hücre potansiyeli ölçümü yapılmıştır. Her döngü 5.5 saat boyunca %5 derişimli NaCl çözeltisi ile ıslanma ve 5.5 saat boyunca kurumadan oluşmaktadır. Numuneler 150 mm x 150 mm x 600 mm boyutundadır ve 19 mm çapında donatı içermektedir. Çalışmanın sonuçlarına bakılacak olunursa; düşük su/çimento oranında çatlağın varlığı donatı korozyonunu neredeyse etkilememektedir. Ancak su/çimento oranı 0.55'e çıktığında 1 mm genişliğindeki çatlağın sonuçları iki kata kadar etkilediği görülmektedir. Yüksek su/çimento oranlarında ise çatlağın varlığı korozyonu neredeyse etkilememektedir. Yüksek su/çimento oranlarında betonlar geçirimli olduklarından donatı korozyonuna karşı oldukça dayanıksızdırlar (Şekil 2.26) [69].



Şekil 2.26. 0.35-0.50-0.70 su/çimento oranlarında çatlaklı numunelerin yarı hücre potansiyeli ölçüm sonuçları.

Şahmaran ve Yaman tarafından yapılan araştırmada, 0.485 su/çimento oranında 43.6 μm – 278.3 μm boyutlarında çatlak bulunan 255 mm x 75 mm x 75 mm boyutlu, 13 mm çapında donatı içeren harç numuneler, %5 derişimli NaCl çözeltisinde 100 saat boyunca sabit 12V akımla beslenerek korozyon durumları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, çatlak boyutunun korozyonu etkilediği görülmüştür (Şekil 2.27) [70].



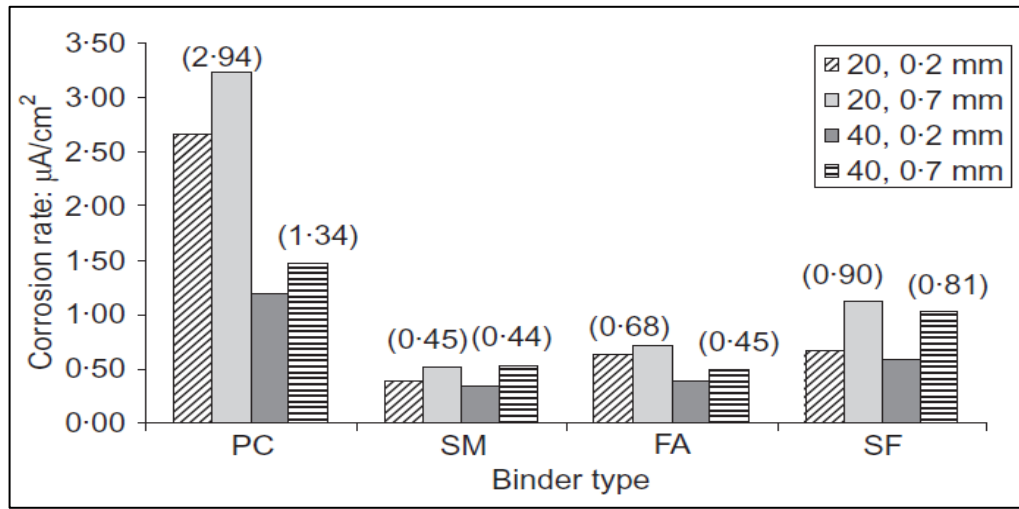
Şekil 2.27. Korozyon akımı – çatlak boyutu – süre ilişkisi.

2.3.2.2.6. Mineral Katkı Kullanımı

Boşluk oranı, boşlukların yapısı ve sürekliliği korozyon konusunda belirleyici etmenlerde başı çekmektedir. Belirli bir su/çimento oranında çimento tipi, inceliği ve puzolanik katkıları poroziteyi ve boşluk dağılımını etkiler. Genellikle uçucu kül, cüruf ve silis dumanı boşluk oranını azaltır ve betonun matris fazını düzenli hale getirir [64].

Scott ve Alexander, 0.2 mm ve 0.7 mm çatlaklı, 20 mm ve 40 mm olmak üzere iki farklı beton örtüsüne sahip, 0.58 su/çimento oranında 375 mm x 120 mm x 120 mm boyutlarında ve içinde 16 mm çapında donatı bulunduran prizmatik numuneler kullanarak yaptıkları çalışmada, portland çimentosu (PC) ile %25 (SL), %50 (SM), %75 (SH) cüruf ikamesi, %30 uçucu kül ikamesi (FA), %7 silis dumanı ikamesi (SF) ve %50 portland çimentosu, %43 cüruf, %7 silis dumanı içeren kompozit çimentonun (TR) donatı korozyonuna karşı performanslarını karşılaştırmışlardır. Numunelerin maruz bırakıldıkları haftalık döngü 3 gün %5 derişimli NaCl çözeltisinde ıslanma ve 4 gün 30°C’de kurumadır. Çalışmanın sonucunda portland çimentosuna göre, uçucu kül ve cüruf kullanımı korozyon oranını ciddi seviyede düşürmektedir (Şekil 2.28). 40 mm beton örtüsü için i_{corr} değerleri 0.2 mm ve 0.7 mm

çatlak boyutuna göre %17'den %75'e kadar artış göstermiştir (Tablo 2.16). 20 mm beton örtüsü için bu artışlar %11 ila %67 arasındadır (Tablo 2.17) [71].



Şekil 2.28. Numunelerin ortalama korozyon oranları.

Tablo 2.16. 40 mm beton örtüsüne sahip numunelerin çatlak genişliği – bağlayıcı tipi – korozyon oranı ilişkisi.

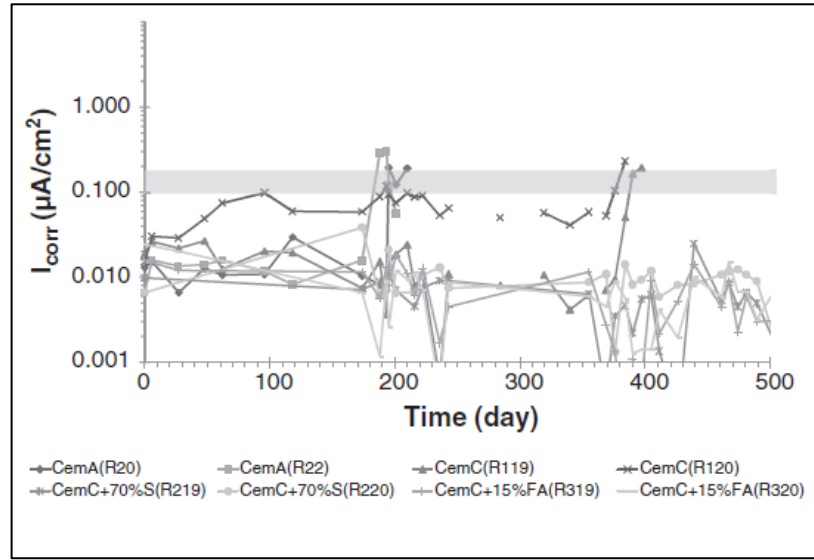
	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)		Yüzdece değişim
	0.2 mm	0.7 mm	
PC	1.20	1.48	+23
SL	0.47	0.55	+17
SM	0.35	0.53	+51
SH	0.24	0.34	+42
FA	0.39	0.50	+28
SF	0.59	1.03	+75
TR	0.28	0.42	+50

Tablo 2.17. 20 mm beton örtüsüne sahip numunelerin çatlak genişliği – bağlayıcı tipi – korozyon oranı ilişkisi.

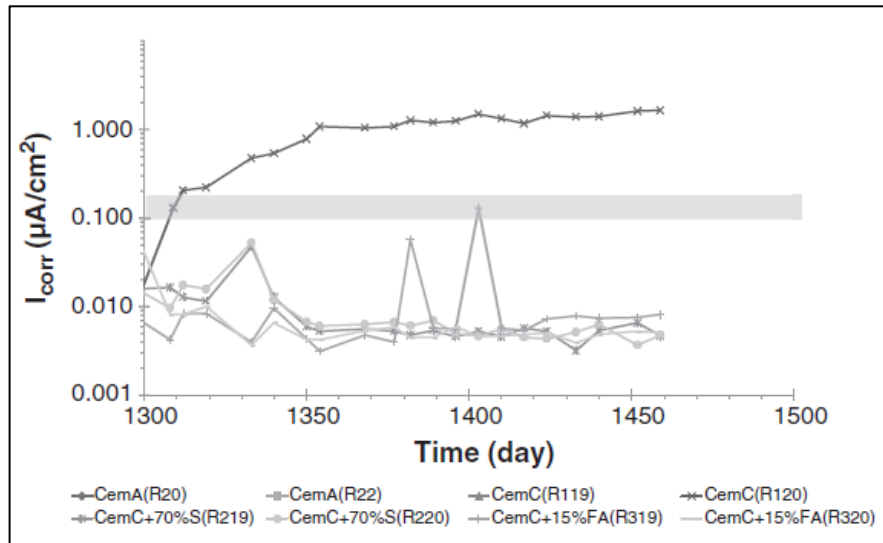
	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)		Yüzdece değişim
	0.2 mm	0.7 mm	
PC	2.65	3.23	+22
SM	0.39	0.51	+31
FA	0.64	0.71	+11
SF	0.67	1.12	+67

Andrade ve Bujak 0.5 su/çimento oranında beyaz çimento (CemA), normal portland çimentosu (CemC), %70 cüruf ikameli (CemC+%70S), %15 uçucu kül ikameli (CemC+%15F) olmak üzere dört farklı bağlayıcıyla, 70 mm x 70 mm x 70

mm boyutlu ve merkezinde 100 mm uzunluğunda donatı bulunan küp harç numuneler üzerinde yaptıkları çalışmada farklı tipte katkıların donatı korozyonuna etkisini izlemiştir. Numuneler 1 mol/L (58.44276 gr/l) derişimli NaCl çözeltisinde saklanmış ve korozyon başlayana kadar üç gün ıslanma – dört gün kuruma şeklinde çevrime maruz kalmıştır. İki hafta arayla i_{corr} değerleri ölçülmüştür. Araştırmacılar korozyon başlangıcı olarak $0.2 \mu A/cm^2$ değerini seçmişlerdir. Mineral katkı içermeyen numuneler bu eşiği 195 gün sonra aşmaya başlarken mineral katkıli numunelerde toplam 1460 gün süren çalışma boyunca aktif korozyon görülmemiştir (Şekil 2.29, Şekil 2.30) [72].

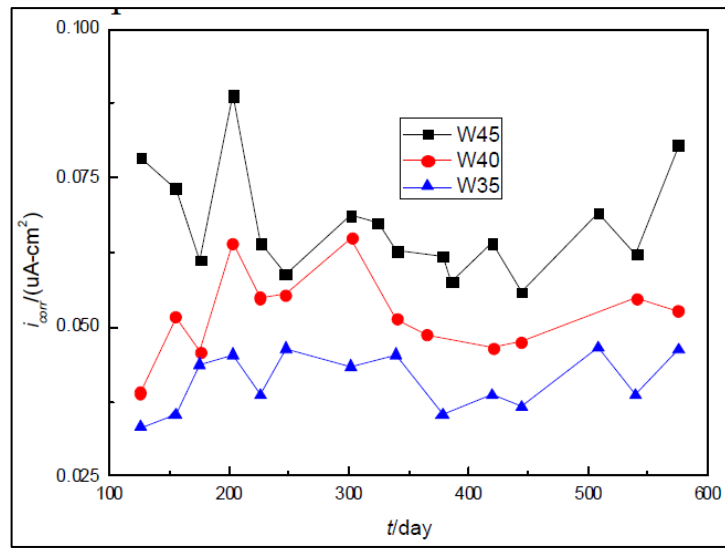


Şekil 2.29. 0-500 gün arası i_{corr} değerleri.

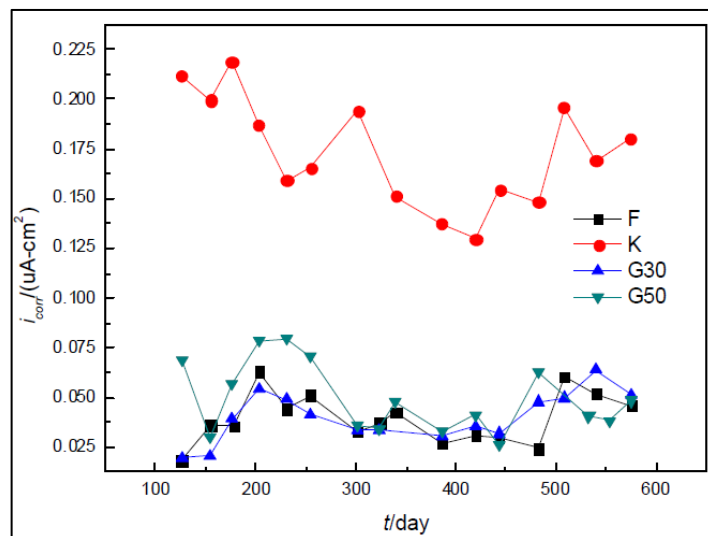


Şekil 2.30. 1300-1460 gün arası i_{corr} değerleri.

Li vd. tarafından yapılan çalışmada, 30 mm beton örtüsüne sahip, 0.35 (W35), 0.40 (W40) ve 0.45 (W45) su/çimento oranlarında kontrol numuneler, 0.35 su/çimento oranında %30 uçucu kül ikameli (F), %70 cüruf ikameli (K), %3 ve %5 silis dumanı (S30, S50) katkılı numuneler %1.5 klorür derişiminde suyla 4 saatte 6 kere ıslatılarak ıslanma kuruma etkisine maruz bırakılarak korozyon performansları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, su/çimento oranı düştükçe korozyon hızının azaldığı görülmektedir (Şekil 2.31). Mineral katkılardan uçucu kül ve silis dumanı iyi sonuçlar vermiştir (Şekil 2.32) [73].



Şekil 2.31. 0.35, 0.40 ve 0.45 su/çimento oranlarındaki numunelerin korozyon hızları.

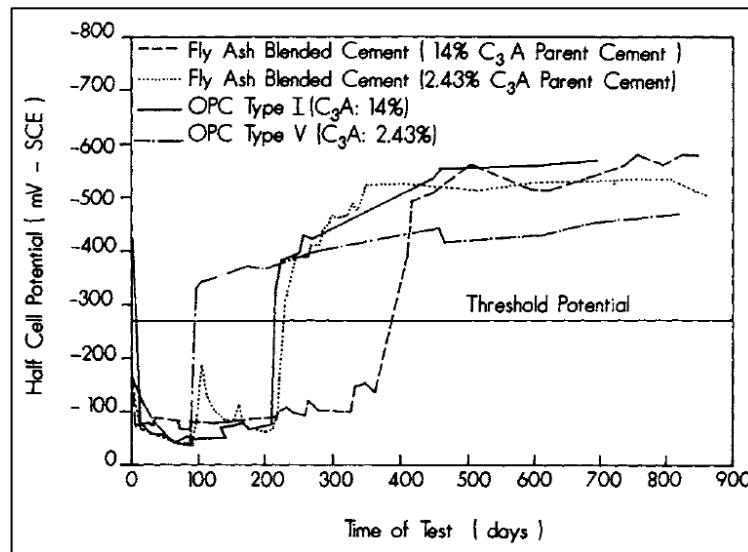


Şekil 2.32. Farklı tipte mineral katkıları ile korozyon hızı ilişkisi.

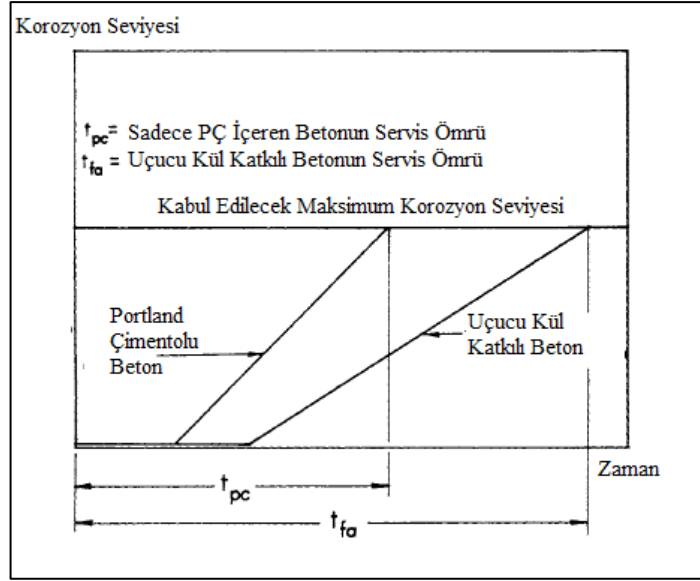
Ehtesham ve Rasheeduzzafar yaptıkları çalışmada sadece portland çimentosuyla ve uçucu kül ikamesiyle üretilmiş numuneleri hızlandırılmış korozyona tabii tutmuşlardır. Uçucu kül değişim oranı %30 olarak seçilmiştir. Toplamda Tip V (düşük C_3A , %2.43), Tip I (%14 C_3A) ve bunlara %30 uçucu kül ilavesiyle elde edilen iki tane daha olmak üzere dört farklı karışım vardır. 100 mm x 62.5 mm x 300 mm boyutlarında prizmatik numunelerin merkezinde 12 mm çapında donatı bulunmaktadır. Numuneler plastik haznenin içinde, yarısı (150 mm'si) %5 derişimli NaCl çözeltisi içinde kalacak şekilde saklanmıştır. Numuneler üzerinde kalomel elektrot kullanılarak yarı hücre potansiyeli ölçümü yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda araştırmacılar korozyon başlangıcında uçucu kül ikamesinin portland çimentosuna göre iki kata kadar daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 2.33) (Tablo 2.18) [74]. Bu sonuçları uçucu kül ikamesinin betonun matris fazını geliştirmesi ile su ve klorür iyonu geçirimliliğini azaltmasına bağlamışlardır. Araştırmadan elde edilen verilere dayanarak ortaya yapı servis ömrü hakkında bir model koymuşlardır (Şekil 2.34) [74].

Tablo 2.18. Karışım – korozyon başlangıcı arasındaki ilişki.

Karışım	Korozyon Başlangıcı (gün)
Tip I Portland Çimentosu	214
Tip V Portland Çimentosu	93
Tip I Portland Çimentosu + %30 Uçucu Kül	400
Tip V Portland Çimentosu + %30 Uçucu Kül	228

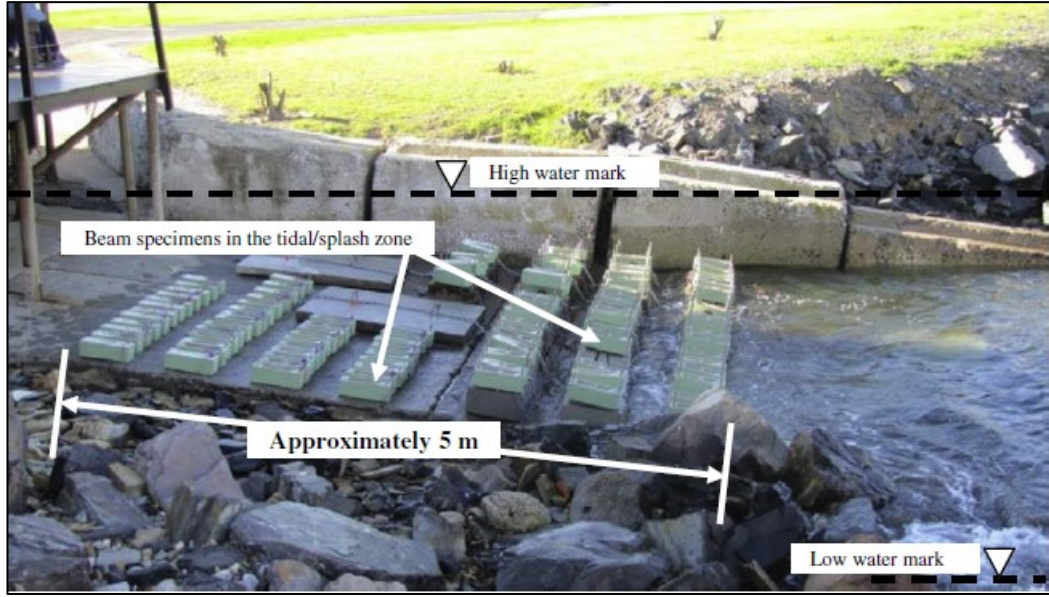


Şekil 2.33. Yarı hücre potansiyeli ölçümü sonuçları – zaman grafiği.

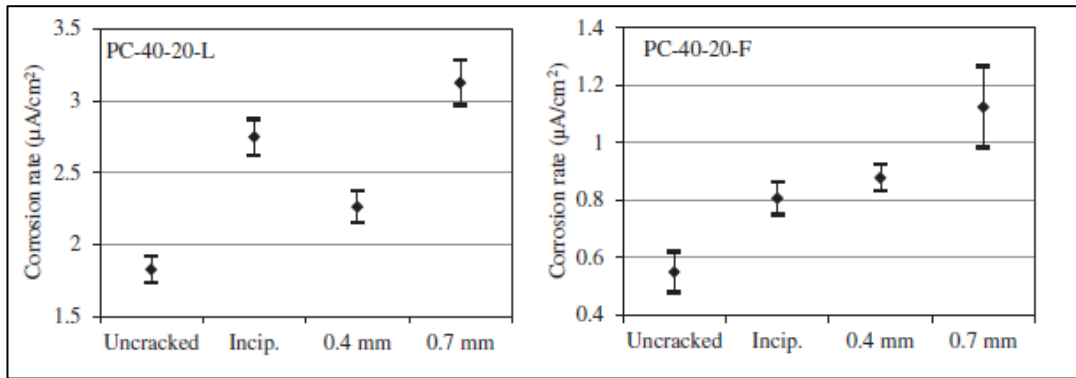


Şekil 2.34. Yapı servis ömrü ile korozyon arasındaki ilişki.

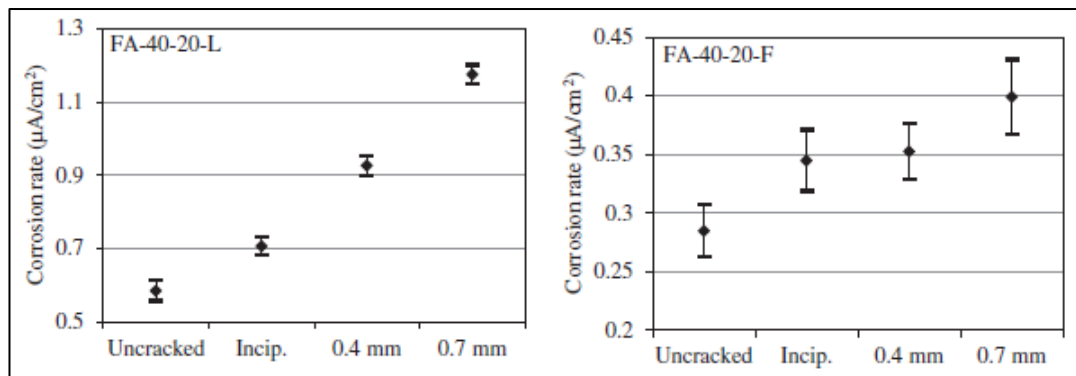
Otieno, Beushausen & Alexander tarafından yapılan çalışmada farklı bağlayıcılar içeren, farklı su/çimento oranlarında, farklı beton örtülerine sahip ve farklı boyutlarda çatlak bulunan 210 adet 120 mm x 130 mm x 375 mm boyutlarında numune 2.5 yıl boyunca yarısı laboratuvar, yarısı ise sahada olmak üzere korozyon açısından incelenmiştir. Kullanılan bağlayıcılar sadece CEM I 42.5 N çimento, %50 portland çimentosu - %50 cüruf ve %70 portland çimentosu - %30 uçucu küldür. Kullanılan su/bağlayıcı oranları 0.40 ve 0.55'tir. Kullanılan beton örtüleri 20 mm ve 40 mm'dir. Kullanılan çatlak boyutları 0, boyutu belirsiz ancak 0.3 mm'den küçük, 0.4 mm ve 0.7 mm'dir. Laboratuvar numuneler 3 gün boyunca %5 derişimli NaCl çözeltisiyle ıslanma ve 4 gün boyunca kuruma şeklinde ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılmıştır. Sahada ise limana yerleştirilen numuneler dalga ve serpinti bölgelerinde bekletilmiştir (Şekil 2.35). Korozyon ile ilgili ölçümlerde LPR yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda görülmektedir ki, aynı su/çimento oranında, aynı bağlayıcı kullanılan, aynı beton örtüsüne sahip betonlarda çatlak genişliği ile korozyon arasında direkt bir korelasyon bulunmaktadır (Şekil 2.36, Şekil 2.37, Şekil 2.38). Korozyon hızı ve oranı aynı bağlayıcı türü, aynı çatlak genişliği ve aynı beton örtüsü için su/bağlayıcı oranıyla birlikte doğru orantılı olarak artmaktadır. Hem laboratuvar hem de sahadaki numunelerin sonuçları örtüşmektedir. Belirli su/bağlayıcı oranı, beton örtüsü ve çatlak genişliğinde %30 uçucu kül ikamesi korozyon oranını azaltmaktadır [75].



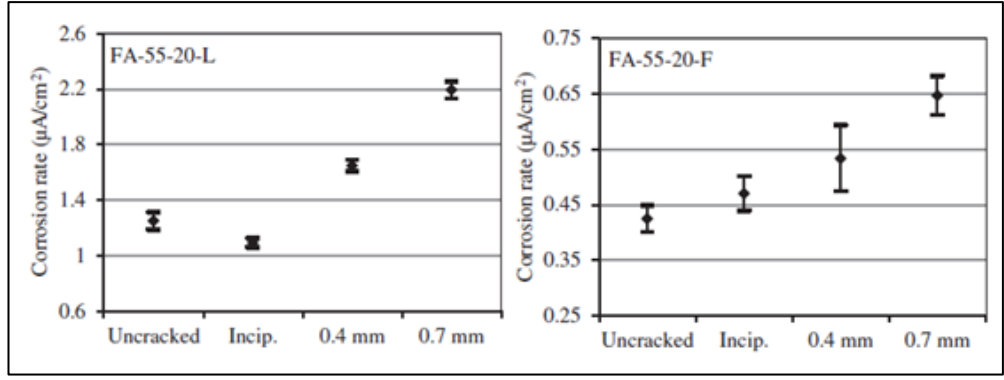
Şekil 2.35. Sahada dalga ve serpinti bölgelerindeki numuneler.



Şekil 2.36. 0.40 su/bağlayıcı oranında sadece PÇ içeren 20 mm beton örtüsüne sahip numunelerin laboratuvar ve saha ortamındaki korozyon hızı ölçüm sonuçları.



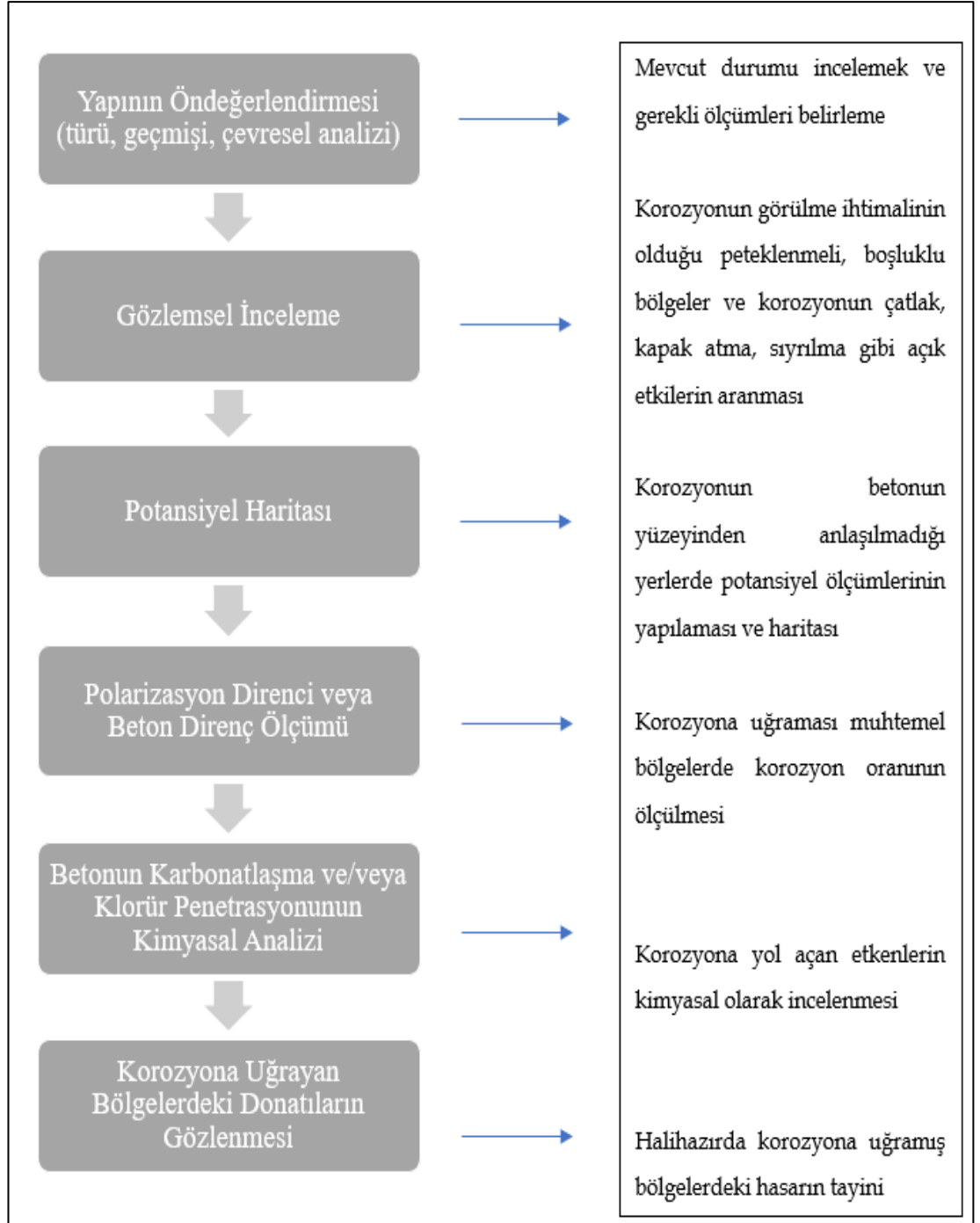
Şekil 2.37. 0.40 su/bağlayıcı oranında uçucu kül içeren 20 mm beton örtüsüne sahip numunelerin laboratuvar ve saha ortamındaki korozyon hızı ölçüm sonuçları.



Şekil 2.38. 0.55 su/bağlayıcı oranında uçucu kül içeren 20 mm beton örtüsüne sahip numunelerin laboratuvar ve saha ortamındaki korozyon hızı ölçüm sonuçları.

2.3.3. Betonarme Elemanlarda Korozyonun Tespiti

Betonarme elemanların durumları riskli bina değerlendirmesi, ekspertiz raporları, yapıdaki hasar ihtimalleri, yapının sahibinin değişmesi gibi birçok farklı nedenden ötürü incelemeye tabi tutulabilir. Genellikle bu incelemelerde gözle görülen bir hasar aranır, daha detaylı tetkikler yapılmaz. Ancak hasar gözle görülen boyutlara ulaştığında muhtemelen geri döndürülemeyecek kadar ilerlemiştir. Yapıdaki korozyonun tespiti için Pedferri vd. tarafından bir izlek önerilmektedir (Şekil 2.39) [63].

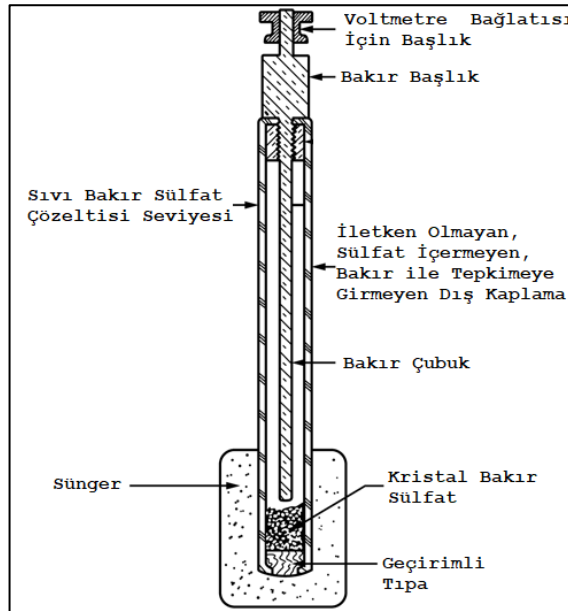


Şekil 2.39. Betonarme elemanda korozyon hasarının tayini için örnek metod.

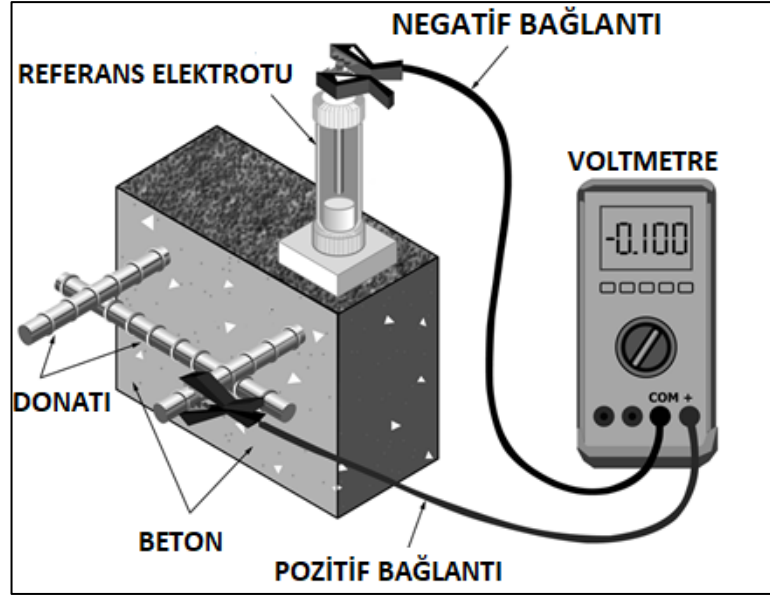
Betonarme elemanlarda korozyonun incelenmesi için birçok farklı yöntem vardır. Bu yöntemler korozyonun elektrokimyasal özüne uygun şekilde geliştirilmiş yöntemlerdir. En yaygın olarak kullanılanlar yöntemler; yarı hücre potansiyeli yöntemi, lineer polarizasyon direnci ve direnç ölçüm yöntemidir. Bu yöntemler ilerleyen bölümlerde daha detaylı inceleneceklerdir.

2.3.3.1. Yarı Hücre Potansiyeli Yöntemi

Yarı hücre potansiyeli ölçümü betonarme elemanlarda korozyona uğrama ihtimalini değerlendirmek amacıyla geniş çapta kullanılan bir muayene yöntemidir. Yöntem, ASTM tarafından ilk kez 1980 yılında C876 koduyla standartlaştırılmıştır. Potansiyel ölçümü için gerekli ekipmanlar basittir. Bir adet sabit derişimde iyon içeren referans elektrotu ve bir adet yüksek empedanslı (10 megaohm) voltmetre ölçüm için yeterlidir. Referans elektrotu olarak Cu/CuSO₄ (bakır/bakır sülfat), Ag/AgCl (gümüş/gümüş klorür) veya Hg/Hg₂Cl₂ (kalomel) kullanılır (Şekil 2.40) [76]. Referans elektrotunun ucunda iletkenliği sağlamak için bir sünger bulunur. Betonun yüksek direnci nedeniyle ölçüm bölgesine temas eden sünger ıslak olmalıdır. Voltmetrenin artı ucu donatıya, eksi ucu referans elektrotuna bağlanır ve referans elektrotu betonun üzerine yerleştirilir (Şekil 2.41). Voltmetredeki değer referans elektrotu göre donatının potansiyel farkıdır. Yarı hücre potansiyeli yöntemi genellikle potansiyel haritası çıkartmakta kullanılır. Büyük alanlar 0.6 metre ile 1.5 metre civarı aralıklarda, küçük alanlar ise 15 santimetre ile 30 santimetre civarı aralıklarda ölçülür [64].



Şekil 2.40. Bakır/Bakır Sülfat referans elektrotunun enkesiti.



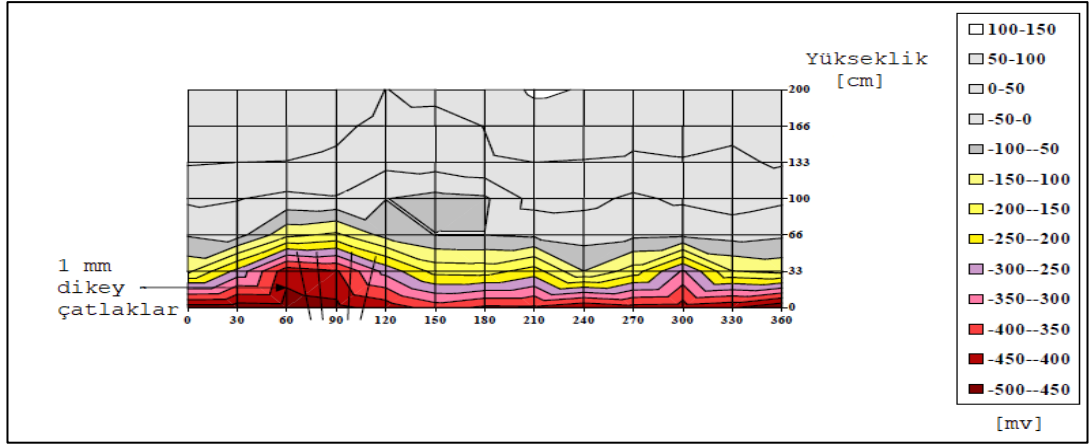
Şekil 2.41. Yarı hücre potansiyeli sistemi.

Yarı hücre potansiyeli testinin sonuçları nitel olarak görülmelidir. ASTM, yarı hücre potansiyeli ölçümü sonuçlarının korozyon ile ilişkisi hakkında farklı elektrot tipleri için öneri mahiyetinde sayısal değerler vermektedir (Tablo 2.19) [60].

Tablo 2.19. Farklı tip referans elektrotlar için korozyon-potansiyel fark ilişkisi.

Cu/CuSO₄	Ag/AgCl	Hg/Hg₂Cl₂	Korozyon Durumu
> -200 mV	> -100 mV	> -80 mV	Düşük (%10 korozyon riski)
> -350 mV	> -250 mV	> -230 mV	Ortalama korozyon riski
< -200 mV	< -100 mV	< -80 mV	%90 ihtimalle korozyon var
< -350 mV	< -250 mV	< -230 mV	%90 ihtimalle korozyon var
< -500 mV	< -400 mV	< -380 mV	Korozyon var

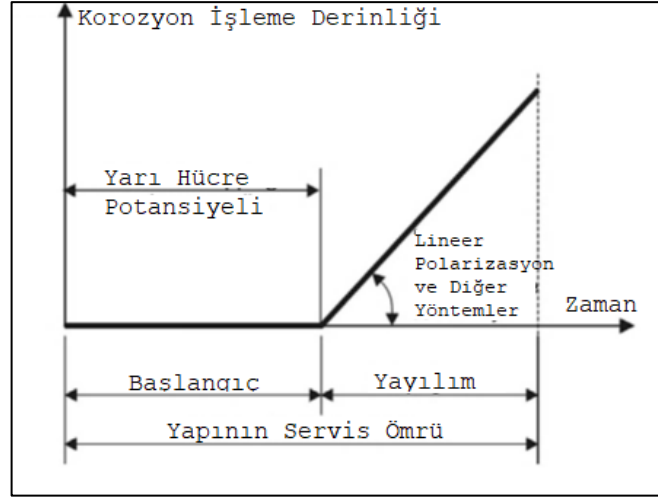
Bu yöntemi kullanarak potansiyel haritası çıkartılabilir. Frølund vd. yaptıkları çalışmada Danimarka'nın Kopenhag şehrindeki köprü ayağındaki klorür içeriğini ve yarı hücre potansiyeli haritasını çıkartmışlardır (Şekil 2.42). 0.3 metre ile 1 metredeki yüzde klorür içeriğini inceleyen araştırmacılar, 0.3 metre seviyesinde klorür seviyesinin %10 seviyelerinde olduğunu ve korozyon riskinin çok yüksek olduğunu söylemektedir. Yarı hücre potansiyeli ölçümlerinde, yatay doğrultuda 30 santimetrede bir, düşey doğrultuda 33 santimetrede bir ölçüm yapmışlardır. Ölçümlerde Cu/CuSO₄ elektrot kullanılmıştır. Bu çalışmada, yarı hücre potansiyeli yönteminin iyi sonuçlar verdiği söylenebilir [77].



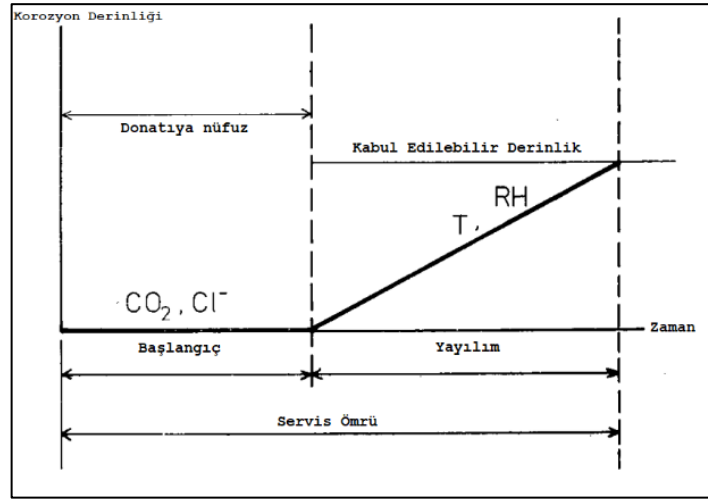
Şekil 2.42. Yarı hücre potansiyel haritası.

Haque ve Kawamura uçucu küllü ve normal ve bağlayıcı malzemenin yüzdece %0, %0.5, %2'si kadar Cl^- içeren numunelerle yaptıkları çalışmada, 4 yıllık bir süreçte numunelerin dayanım gelişimlerini, karbonatlaşma seviyelerini ve yarı hücre potansiyellerini ölçmüşlerdir. Bu çalışmada, korozyon nedeniyle çatlaklar oluşan numunelerde bile -232 mV ila -228 mV gibi değerler görülmektedir. Bu sonuçlara dayanarak, yazarlar, $Cu/CuSO_4$ referans elektrotu kullanarak gerçekleştirdikleri yarı hücre potansiyeli ölçümü yönteminin güvenilir olmadığını söylemektedirler [78].

Yarı hücre potansiyeli yöntemi oldukça pratiktir ve kullanımı için gerekli ekipmanlar bulunabilir ve ucuzdur. Bunlar yarı hücre potansiyeli tekniğini kullanmak için geçerli nedenlerdir. Ancak yöntemin bazı zayıflıklarından da bahsetmek gerekir. Öncelikle, bu yöntemin sonuçları yeterince nicel olarak görülmemelidir. Daha ziyade, trend olarak değerlendirilmeli ve başka parametrelerle birleştirilerek yorumlanmalıdır. Yarı hücre potansiyeli ölçümünü etkileyen birçok etken bulunmaktadır. Bu yöntem betonun karbonatlaşmaya uğradığı, betonun tamamen suya doymun olduğu, kaçak akımın var olduğu, donatının epoksi ile kaplandığı, oksijenin olmadığı durumlarda iyi sonuçlar vermez [64]. Pedferri vd. yarı hücre potansiyeli ile diğer yöntemlerin hangi aşamalarda kullanılacağına dair bir öneride bulunmuşlardır (Şekil 2.43) [63]. Bu öneriyi yaparlarken, Tuutti'nin yapının servis ömrü-korozyon arasında kurduğu ilişkiden ilham almışlardır (Şekil 2.44) [79].



Şekil 2.43. Farklı elektrokimyasal yöntemlerle korozyon ölçümü.



Şekil 2.44. Yapının servis ömrü-korozyon ilişkisi.

2.3.3.2. Lineer Polarizasyon Direnci

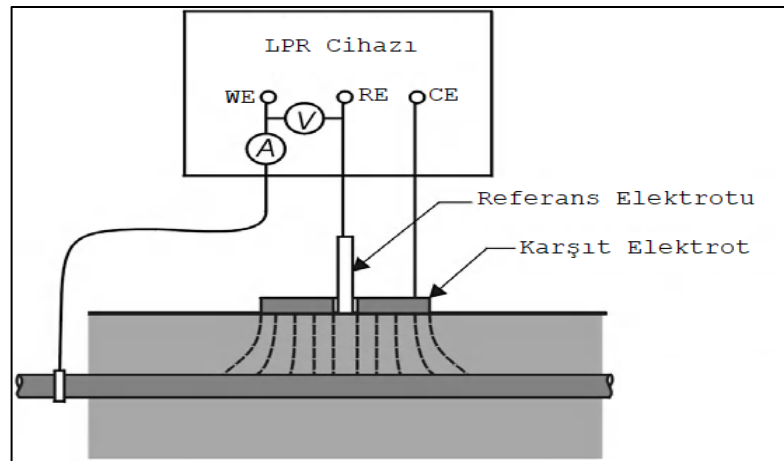
Yarı hücre potansiyeli yönteminde referans elektrotu ile donatı arasındaki potansiyel fark ölçülür ve sonuçlar yorumlanarak korozyon ihtimali değerlendirilir. Ancak yarı hücre potansiyeli yöntemi korozyon hızı ile ilgili bir sonuç sağlamaz. Korozyon hızının tayini için lineer polarizasyon direncine (LPR) dayanan deneyler daha uygundur. Lineer polarizasyon direnci, bir metale uygulanan küçük dış akım yoğunluğunda, potansiyel ile akım arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu varsayımına dayanır. Lineer polarizasyon direncine dayanan korozyon ölçüm yönteminde üç elektrot sistemi kullanılır. Bu sistemde üç elektrotun aynı çözeltide olduğu kabul edilir. Sistem bir adet çalışma elektrotu (WE), bir adet karşıt elektrot (CE) ve bir adet

referans elektrotundan (RE) oluşur (Şekil 2.45). CE aracılığıyla WE'ye küçük bir akım gönderilir, bu akımın yarattığı değişim LPR için kullanılan cihaz tarafından izlenir. Bu yöntemdeki en önemli kavramlardan birisi polarizasyon direncidir. Potansiyeldeki değişimin (ΔE) uygulanan akıma (ΔI) oranı polarizasyon direnci (R_p) olarak adlandırılır (Eşitlik 2.21). Polarizasyon direnci ile korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) arasında bir ilişki vardır. Tafel sabitlerine bağlı değer (B) ile R_p 'nin birbirine oranı, i_{corr} 'a eşittir. Bu ilişki Stern - Geary denklemi olarak bilinir (Eşitlik 2.22) [12].

$$R_p = \frac{\Delta I}{\Delta E} \quad (2.21)$$

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2.22)$$

Polarizasyon direncine dayanarak betonarme elemandaki donatının korozyonunu ölçmek için kilometre taşı denilebilecek olan çalışma, Andrade & Gonzalez tarafından 1978 yılında yapılmıştır. Araştırmacılar gravimetrik yöntem ile elektrokimyasal yöntem arasında lineer denilebilecek bir ilişkiyi gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada, B değerinin aktif durumdaki (korozyon hâlindeki) çelik için 26 mV, pasif durumdaki çelik için 52 mV alınması önerilmiştir [80]. Bu öneri, hâlen, belit olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.45. Üç elektrotlu elektrokimyasal hücre.

Andrade vd. tarafından donatı korozyon oranının LPR yöntemine dayanan ölçüm yöntemleri üzerine yayınlanan teknik raporda korozyon oranı ve i_{corr} değerleri

arasındaki ilişki hakkında öneri mahiyetinde belli aralıklar verilmiştir (Tablo 2.20) [81].

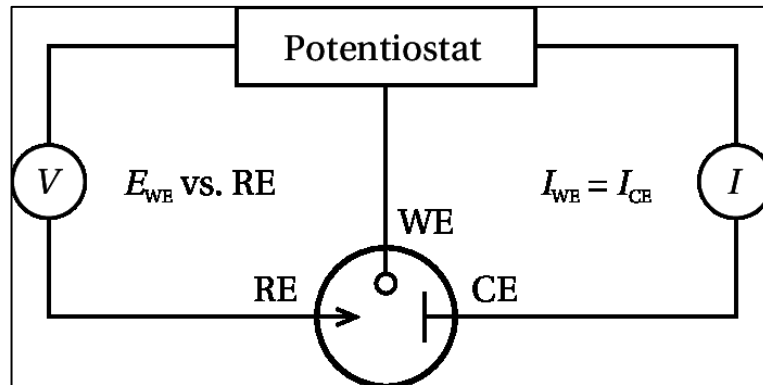
Tablo 2.20. i_{corr} Değerleri ve korozyon seviyesi arasındaki ilişki.

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Korozyon Seviyesi
≤ 0.1	İhmal edilebilir
- 0.5	Düşük
0.5 – 1	Ortalama
> 1	Yüksek

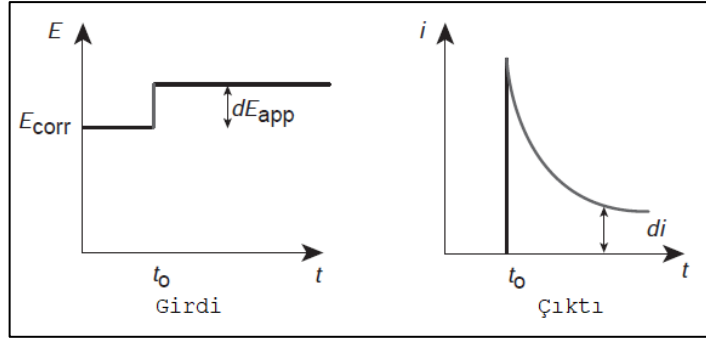
LPR'a dayanan ölçümler potensiyostatik veya galvanostatik olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. İki yöntemin arasındaki fark metodolojiktir, bunun haricinde aynı prensibe dayanmaktadırlar.

2.3.3.2.1. Potensiyostatik Yöntem

Potensiyostatik ölçümde potensiyostat yardımıyla sabit bir potansiyel artışına karşılık gelen akım yoğunlukları incelenir. Ölçülen akım ile uygulanan potansiyel arasında deneysel polarizasyon eğrileri çizilir [61]. Çizilen polarizasyon eğrisinin eğimi polarizasyon direncini vermektedir. Potensiyostatik ölçümde üç elektrotlu elektrokimyasal hücre kullanılır (Şekil 2.46). Potensiyostat tarafından uygulanan gerilim ve buna karşılık gelen tepkiler örnek olarak gösterilmiştir (Şekil 2.47) [58].



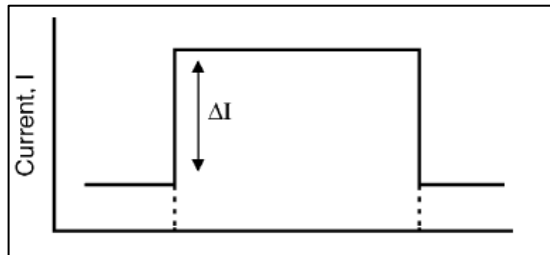
Şekil 2.46. Potensiyostat ve üç elektrotlu elektrokimyasal hücrenin şematik gösterimi.



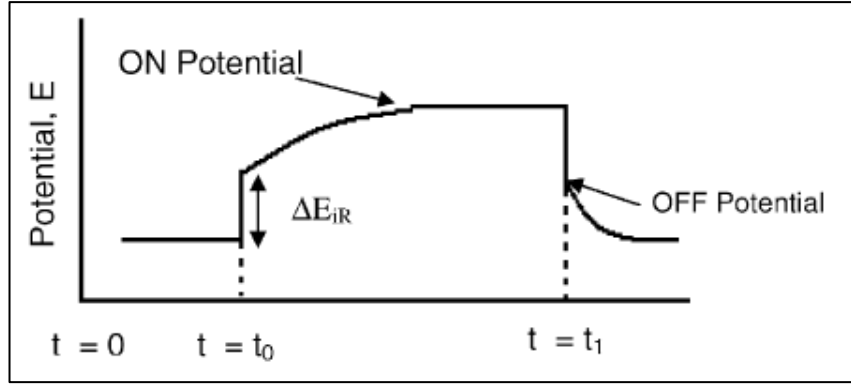
Şekil 2.47. Potensiostatik ölçümde sisteme verilen gerilim ve alınan tepki.

2.3.3.2.2. Galvanostatik Yöntem

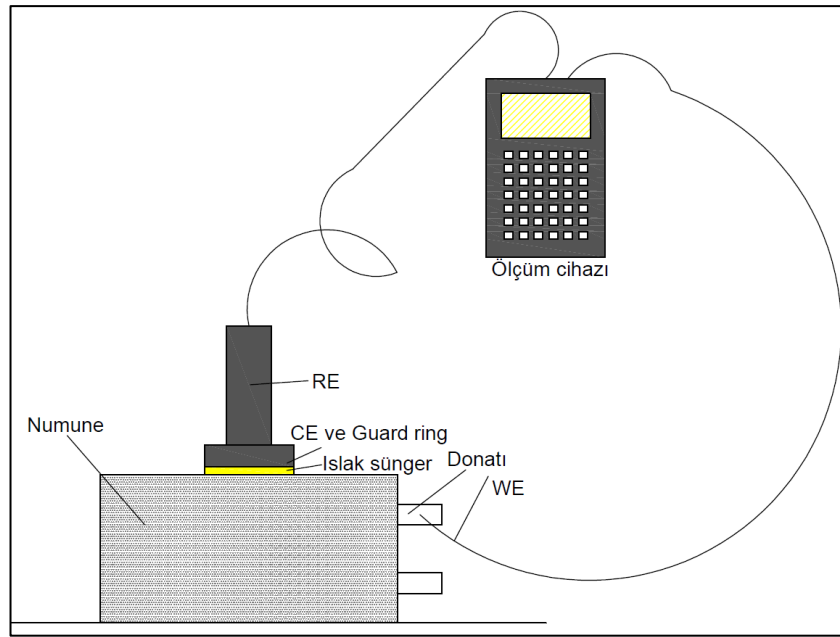
Galvanostatik ölçüm donatıya beton yüzeyine yerleştirilmiş CE tarafından kısa süreli (10 saniye civarı) akım dalgası (10-100 μ A mertebesinde) uygulanması prensibine dayanır [12]. Donatı anodik doğrultuda serbest korozyon potansiyeline karşı polarize edilir. Sabit akım uygulanan donatıdaki potansiyelin RE'ye göre değişimi zamana karşı izlenir. Galvanostatik yöntemde sistemdeki akım Şekil 2.48'de görülmektedir [58]. Galvanostatik dalgaya karşı örnek bir potansiyel-zaman eğrisi şekilde görülmektedir (Şekil 2.49) [58]. Sistem çalışma elektrotu, karşı elektrot ve referans elektrotu, betonun üzerine yerleştirilecek karşı elektrot ile yüzey arasında iletkenliği sağlayan sünger, verilerin işleneceği cihaz ve guard ring'den oluşur (Şekil 2.50). Tarama yapılan alanın bilinmesi, korozyon oranının ölçümü için önemlidir. Sistem tarafından polarizasyon işlemi gerçekleştirilirken elektrik sinyalleri üniform olmayan bir davranış sergiler, bu hem sonuçları etkiler hem de hangi bölgenin tarandığı hususunda bir belirsizliğe neden olur. Bu sorunu çözmek amacıyla guard ring adı verilen bir aparat, korozyon ölçümü yapan cihazlarda kullanılmaktadır. Karşı elektrot tarafından uygulanan potansiyeli belirli bir alanda kısıtlamak için, karşı elektrotun etrafı guard ring ile kısıtlanır.



Şekil 2.48. Galvanostatik yöntemde sistemdeki akım değişimi.



Şekil 2.49. Galvanostatik dalgaya karşılık gelen potansiyel-zaman eğrisi örneği.



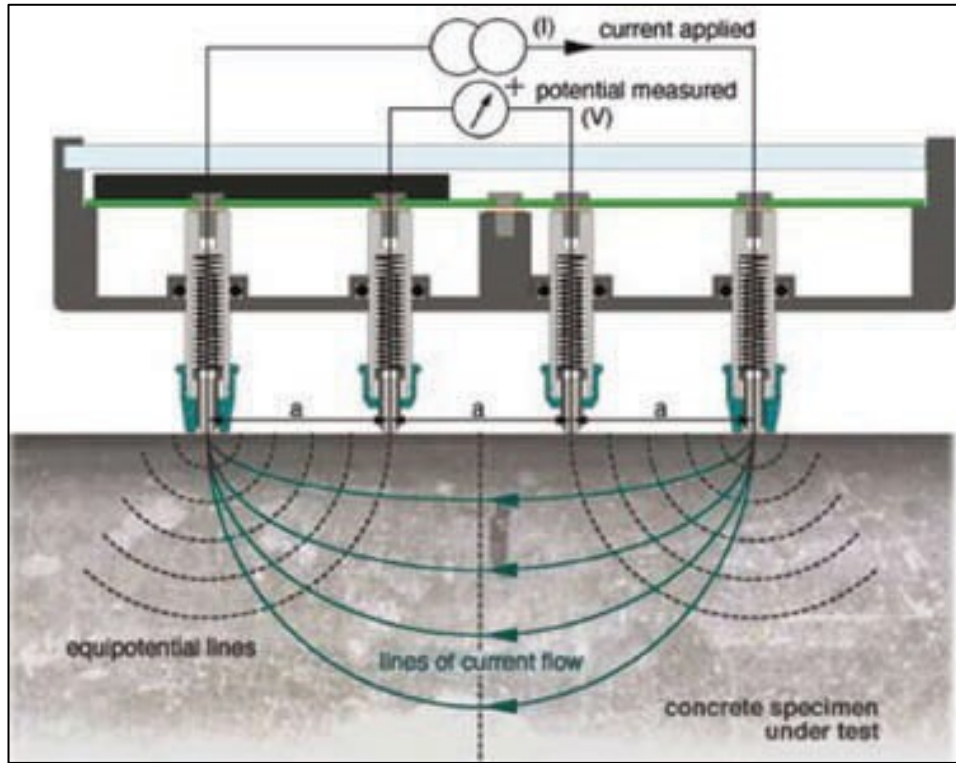
Şekil 2.50. Örnek galvanostatik dalga yöntemi düzeneği.

2.3.3.3. Direnç Ölçüm Yöntemi

Betonun elektriksel direnci hâlihazırda devam eden korozyon sürecinin yoğunluğunu anlamak için önemli bir parametredir. Bir maddenin elektriksel direnci elektriksel yük taşınımına karşı koyma yeteneğine denir. Betonda elektrik akımı boşluk suyunda çözünen iyonlar tarafından taşınır. Buradan yola çıkarak, daha fazla boşluk suyu içeren (boşluklu ve suya doygun), fazla boşluklu yapıda, birbiriyle bağlantılı boşluklara sahip, yüksek su/çimento oranıyla üretilmiş betonların daha düşük dirence sahip olduğu söylenebilir. Betonun direnci, beton kurudukça ve karbonatlaşma durumunda artma eğilimi gösterir. Beton için yüksek dirençte

korozyon, düşük dirence sahip betona nazaran daha yavaş ilerler. Yani direnç ile korozyon arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Çünkü düşük dirençte anot ve katot bölgeleri arasındaki transferler daha kolay gerçekleşir. Betonda direnç ölçmek için en yaygın kullanılan sistem dört başlıklı direnç ölçerdir (Şekil 2.51). Dört başlıklı direnç ölçerin çalışma prensibi şu şekildedir; dıştaki iki başlıktan şiddeti bilinen bir akım (I) gönderilir ve bu akımın potansiyel değişimi (V) içteki iki başlık tarafından ölçülür. Direnç (R) ohm kanunu ile hesaplanır. R ölçülen direnç (Ω), a başlıklar arası mesafe (cm) olmak üzere betonun direnci (ρ) aşağıdaki eşitlik ile elde edilir (Eşitlik 2.23) [12].

$$\rho = 2\pi aR \quad (2.23)$$



Şekil 2.51. Dört başlıklı direnç ölçer devresi şeması.

Deney sonucu elde edilen ρ değerlerinin yorumlanması hakkında birçok farklı araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar farklı değerler belirtmelerine rağmen flu da olsa bir trend görülmektedir. Hornbostel vd. tarafından yapılan çalışmada, farklı araştırmacılar tarafından incelenen korozyon yoğunluğu-direnç arasındaki ilişkinin derlenmiştir (Tablo 2.21) [82].

Tablo 2.21. Korozyon ihtimali ile direnç arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi.

Korozyon ihtimali – direnç ($\Omega.cm$)			Korozyon nedeni
Yüksek	Ortalama	Düşük	
< 5000	5000 - 12000	> 12000	Klorür nüfuzu
< 6500	6500 - 8500	> 8500	
< 7000	7000 - 30000	> 30000 – 40000	
< 10000	10000 - 30000	> 30000	
< 10000	10000 - 100000	> 100000 – 200000	Genel
< 5000	5000 - 20000	> 20000	
< 8000	8000 - 12000	> 12000	

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışması deneysel yöntemle yapılmıştır ve çimento yerine kısmi olarak uçucu kül içeren ve içermeyen çatlaklı ve çatlaksız betonların donatı korozyonuna dirençlerinin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Korozyon etkisi klorür varlığında elde edilmiştir.

Çalışmada üç farklı beton serisi bulunmaktadır:

- Uçucu kül içermeyen (KONT),
- TS EN 206-1’de verilen sınır değerlere göre uçucu kül içeren (UBEL),
- Hesaplanan k -değerine göre kül içeren (UHES).

TS EN 206-1’e göre uçucu külün çimentoya oranı en çok 1/3 olarak alınabilir. Bunun yanında diğer sınırlama, uçucu külün bağlayıcılık etkinliğiyle ilgilidir ve k -değeri olarak ifade edilir. Standartta göre bu değer, CEM I tipi çimentonun etkinliğinin en çok %40’ı olarak ($k = 0.4$) alınabilir. Ancak, standartta verilen k -değeri, tüm uçucu kül tiplerini içeren genel bir değerdir. Bu genel değer kullanılması, gereğinden az veya çok çimento kullanılmasına ve dolayısıyla bazı sorunlara yol açabilir. Kullanılan uçucu kül tipine ait k -değeri TSE CEN/TR 16639 Teknik Raporuna göre hesaplanmıştır.

3.1. Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Deneyler, bu tez çalışmasından önce hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılmıştır. Yukarıda bahsedilen üç seri betonun tasarlanması, bunun için k -değerinin belirlenmesine yönelik basınç dayanımı deneyleri (Bolomey yöntemi), korozyon numunelerinin tasarlanması ve hazırlanması, tez danışmanı Doç. Dr. Tayfun Altuğ SÖYLEV tarafından BAP-2016-A-31 nolu projenin ilk kısmında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde verilen malzeme, k -değerinin hesaplanması ve buna göre beton karışımlarının belirlenmesiyle ilgili deneyler Söylev’in bildirisinde bulunabilir [15]. Numuneler 2016 yılının Nisan ve Mayıs aylarında üretilmişlerdir.

Tablo 3.1. Numune tipi ve kısaltmaları.

Beton serisi	Kısaltması
Uçucu kül içermeyen	KONT
Standartta verilen sınır değerlere göre uçucu kül içeren	UBEL
Hesaplanan k -değerine göre kül içeren	UHES

Beton karışımları Tablo 3.2’de gösterilmektedir. Tabloda görülen üç seri beton şu şekilde ifade edilebilir: Seri 1 uçucu kül içermeyen betonlar, kontrol betonları (KONT), Seri 2 standartta belirlenmiş k -değerine göre kül içeren betonlar (UBEL), Seri 3 TSE CEN/TR 16639 Teknik Raporuna göre hesaplanan şekilde kül içeren betonlar (UHES). Her seride üç farklı su/çimento oranı bulunmaktadır: $s/\ç = 0.40$, 0.50 ve 0.60 . Beton üretiminde kullanılan malzemeler CEM I 42,5 R çimento, F sınıfı uçucu kül, 20 mm ve 10 mm kırma taş iri agrega, dere kumu ve kırma kum, naftelen sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcıdır [15].

Tablo 3.2. Beton karışımları.

Karışım Tipi	KONT			UBEL			UHES		
Su/Çimento Oranı	0.60	0.50	0.40	0.60	0.50	0.40	0.60	0.50	0.40
Çimento (kg)	330	380	420	291	335	371	283	342	406
Uçucu Kül (kg)	-	-	-	97	112	124	94	76	135
Su (ml)	198	190	168	198	190	168	198	114	168
Agrega (20 mm)	548	542	549	548	542	549	548	542	549
Agrega (10 mm)	449	444	450	449	444	450	449	444	450
Dere Kumu (kg)	489	484	490	489	484	490	489	484	490
Kırma Kum (kg)	327	323	327	327	323	327	327	323	327
Süperakışkanlaştırıcı (ml)	1.5	3	9	1.5	3	9	1.5	3	9

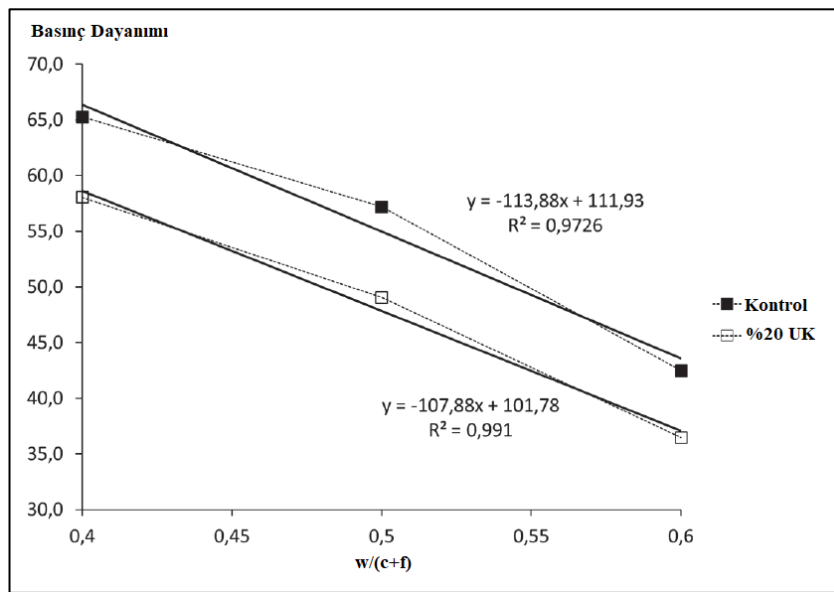
C efektif çimento kütlesi (kg), c uçucu küllü betondaki çimento kütlesi (kg), k k -değeri, f uçucu külün kütlesi (kg) olmak üzere UBEL serisi için standartta verilen sınır değerlere göre çimento ve kül içeriklerinin belirlenmesi aşağıdaki gibi yapılır (Eşitlik 3.1):

$$C = c + k \times f \quad (3.1)$$

Su/çimento oranı 0.50 olan beton için ($f/c = 1/3$, $c = 335$ kg, $f = 112$ kg) örnek verilirse (Eşitlik 3.2):

$$380 = c + 0.40 \times f \quad (3.2)$$

Seri 3 (UHES) betonları için k -değerinin hesaplanması ise Bolomey yöntemine dayanmaktadır. Buna göre uçucu kül içeren (toplam bağlayıcı içeriğine oranı kütlece %20) ve içermeyen betonların basınç dayanımlarının su/çimento oranıyla değişimi elde edilir (Şekil 3.1) [15]. Eğilim çizgilerinin denklemleri eşitlenir ve k -değeri su/çimento oranına bağlı bir ifade olarak elde edilir. Farklı su/çimento oranlarında k -değeri hesaplanır. Bu şekilde hesaplanmış olan k -değerleri Tablo 3.3’de gösterilmiştir [15].



Şekil 3.1. Basınç dayanımı ile su/bağlayıcı oranı arasındaki ilişki ve lineer doğruların denklemleri.

Tablo 3.3. Bolomey yöntemiyle hesaplanmış olan k -değerleri.

Su/Çimento Oranı	k -değeri
0.60	0.495
0.50	0.338
0.40	0.103

3.2. Korozyon Ölçümleri

Bu araştırmada kontrol betonu, standart ve ölçülmüş k -değerlerine göre uçucu kül içeren uçucu küllü betonların donatı korozyonuna karşı eşdeğer dayanıklılık

Önceki bölümde karışım oranları verilen her bir seriden üç farklı su/çimento oranı için üçer adet 100 mm x 200 mm silindirik şekilde numune bulunmaktadır. Üç seride, üç farklı su/çimento oranı ve üçer numuneden toplam 26 numune kullanılmıştır. Numunenin şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



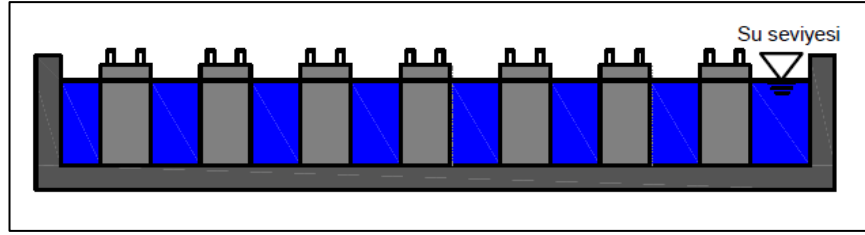
61

kalıplara belirli kalınlıkta bakır plakalar sıkıştırılmış, bu bakır plakalar betonlar priz almaya başlayınca sökülmüştür. Numunelerde beton örtüsü kalınlığı 20 mm'dir. Ayrıca donatıların ucu korozyonla alakalı ölçümün kolay yapılabilmesi amacıyla dışarıda bırakılmıştır. Donatılar yüzeyden içeriye doğru alttan ve üstten 50'şer mm boyunca yalıtkan bantla bantlanmıştır. Bundaki amaç, sadece ortadaki 100 mm'lik bölgede ölçüm yapmaktır.



Şekil 3.3. Kullanılan numuneler.

Numuneler 35 gr/l NaCl derişiminde hazırlanan çözeltide bekletilmiştir. Tuz olarak Merck 106404 NaCl kullanılmıştır. Ölçüm aralığı iki haftadır. Numunelerde bant kullanılmasının amacı bu bölgelerde donatılarda oluşabilecek klorür kaynaklı hasarın engellenmesidir. Numuneler plastik tanklarda, su seviyesi 170 mm olacak şekilde ölçüm zamanları haricinde hep tuzlu suda kalmıştır (Şekil 3.4).



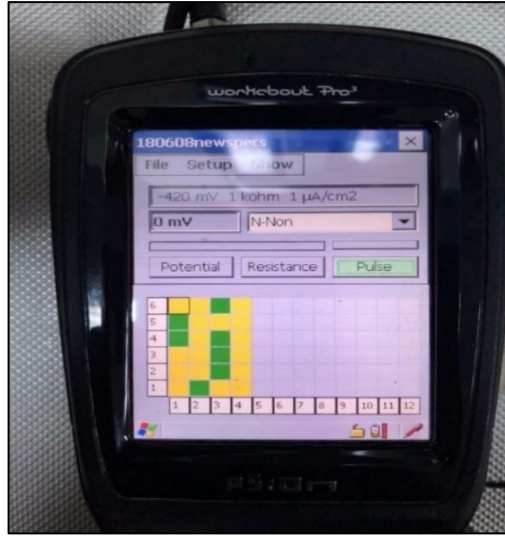
Şekil 3.4. Numunelerin bekletildiği ortam.

Numuneler kolaylık olması açısından kısaltmalarla adlandırılmıştır. Daha önce Tablo 3.1’de verilen bilgilere ek olarak, su/çimento oranları da numune numaraları da kısaltılmıştır (Tablo 3.4). Kullanılan sıralama “Numune tipi – su/çimento oranı – numune numarası” şeklindedir. Örneğin “KONT50-2” kısaltması 0.50 su/çimento oranında üretilmiş kontrol serisinin iki numaralı numunesini tarif eder. Numunenin çatlaklı tarafını belirtmek için “ÇT” kısaltması kullanılmıştır.

Tablo 3.4. Su/çimento oranlarının kısaltmaları.

Su/çimento oranı	Kısaltma
0.60	60
0.50	50
0.40	40

Ölçümlerin başlangıç tarihi Ekim 2017’dir. Haziran 2018 tarihinde son ölçüm yapılmıştır. Numuneler üretimlerinden ölçümün başladığı tarihe kadar laboratuvar ortamında muhafaza edilmişlerdir. Korozyon ile ilgili ölçümlerde CorroMap cihazı kullanılmıştır. Bu cihazla ölçüm sonucunda elde edilen parametreler i_{corr} [$\mu A/cm^2$] ve E_{corr} [mV] olmak üzere iki adettir. CorroMap galvanostatik yöntemle ölçüm yapmaktadır (Şekil 3.5). Ölçümlerde akım dalgası büyüklüğü 10 μA olarak seçilmiştir. Galvanostatik yöntemle ölçüm yapan bir cihaz seçilmesinin nedeni, korozyonun elektrokimyasal doğasıyla daha uyumlu olması hasebiyle diğer yöntemlere göre daha isabetli sonuçlar vermesidir. CorroMap cihazının CE’unun çapı 60 mm’dir. Düzenek Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.5. Ölçüm için kullanılan cihazın ekranı.



Şekil 3.6. Deney düzeneği.

4. DENEY SONUÇLARI

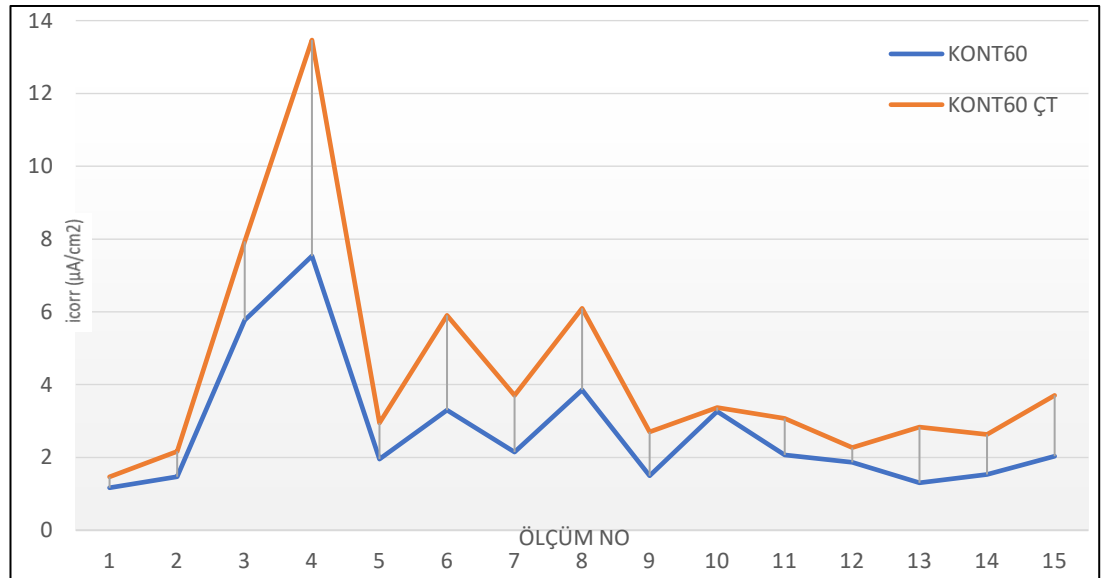
Korozyon ile ilgili deneylerin sonuçları her seri ve su/çimento oranı için ayrı ayrı verilmiştir. Ölçülen değerler, korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) ve yarı hücre potansiyelidir (E_{corr}). Grafiklerde üç adet numunenin ortalama değerleri kullanılmıştır. Bu ortalamayı oluşturan değerler tablolardan görülebilir (Ek A).

4.1. Kontrol Numunelerine (KONT) Ait Ölçüm Sonuçları

Kontrol numunelerine ait ölçüm sonuçları bu kısımda verilmiştir.

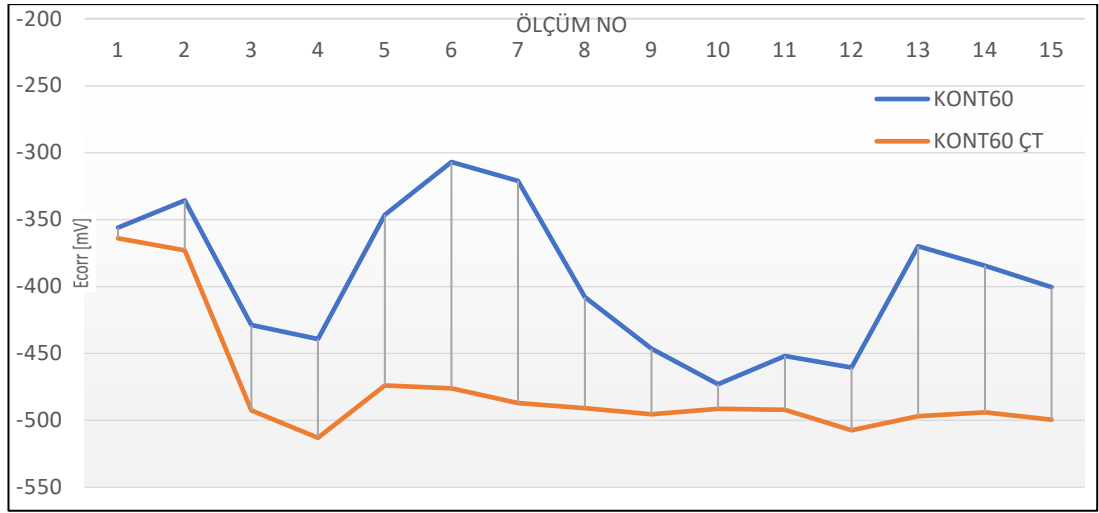
4.1.1. 0.60 Su/Çimento Oranındaki Kontrol Numunelerine (KONT60) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.60 su/çimento oranına sahip üç kontrol numunesinden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.1. KONT60 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

Genel olarak dalgalı bir eğilimde görünen i_{corr} sonuçlarında, aksaklıktan ötürü 2 nolu numune çıkartılmıştır. Bunun dışında çatlakların varlığı, korozyon hızını arttırmaktadır.

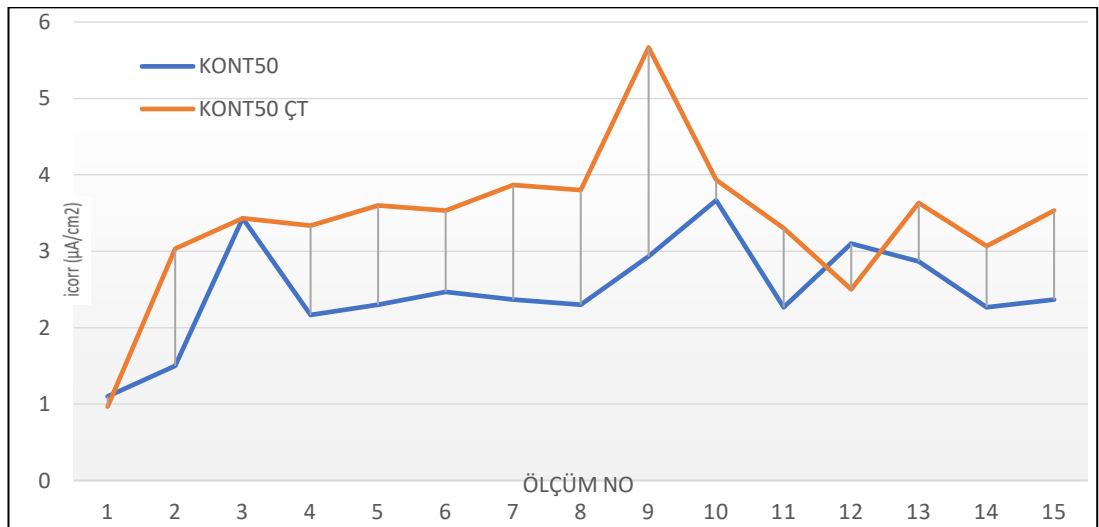


Şekil 4.2. KONT60 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

E_{corr} sonuçlarında çatlaklı bölgenin hızlı bir şekilde yüksek potansiyel değerlerine ulaştığı, ancak bir yerden sonra bu potansiyel değerinde artış gözlenmediği görülmektedir. Çatlaksız tarafta ise potansiyel artışı daha yavaş gerçekleşmiştir. Çatlaklı taraf ile çatlaksız taraf arasında belirgin bir fark vardır.

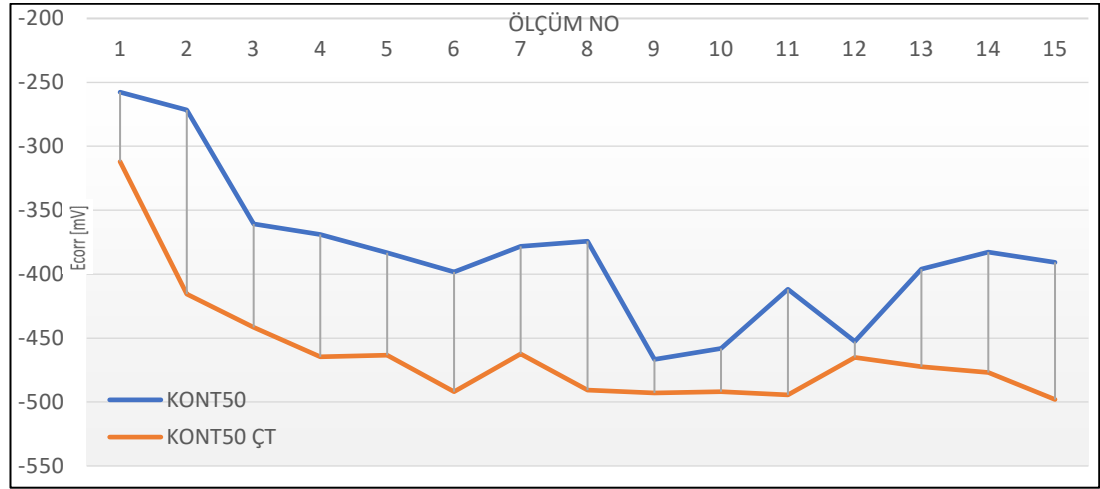
4.1.2. 0.50 Su/Çimento Oranındaki Kontrol Numunelerine (KONT50) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.50 su/çimento oranına sahip üç kontrol numunesinden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.3. KONT50 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

i_{corr} sonuçlarında çatlaklı bölgenin çatlaksız bölgeye nazaran bir parça daha fazla yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Ölçümler genelde stabildir.

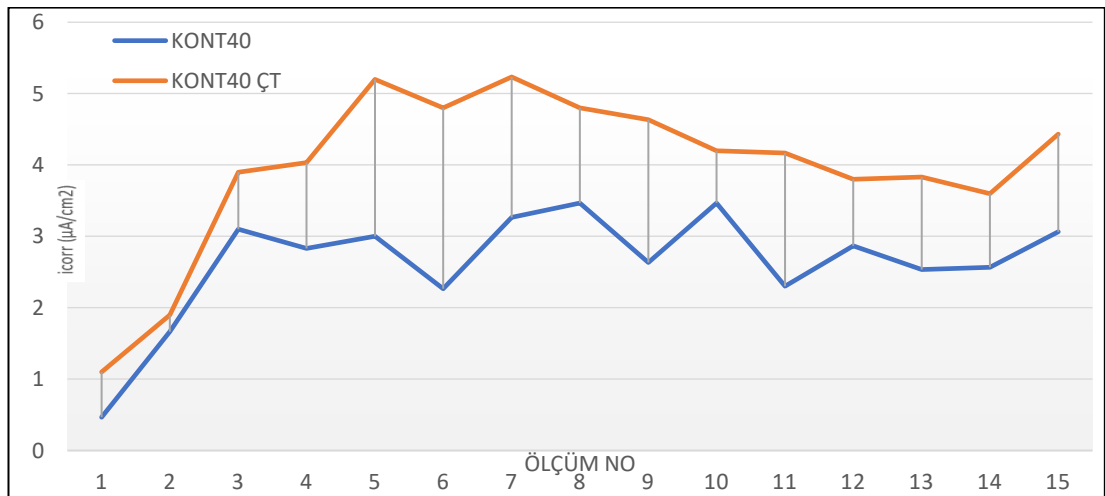


Şekil 4.4. KONT50 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

E_{corr} sonuçlarında çatlaklı bölgenin potansiyel değerleri, çatlaksız bölgeye nazaran daha yüksektir. Sonuçlar i_{corr} ile örtüşmektedir.

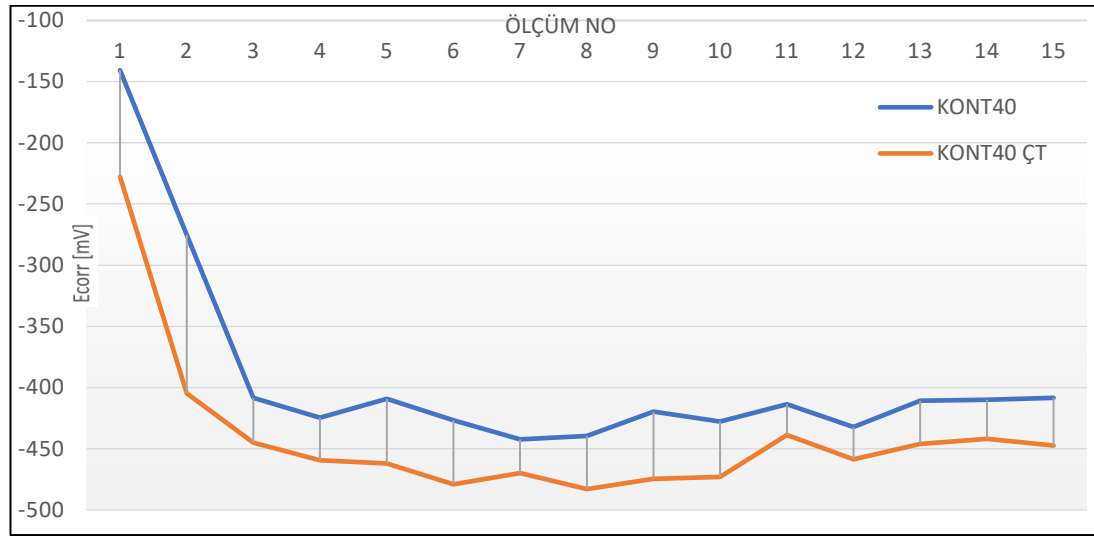
4.1.3. 0.40 Su/Çimento Oranındaki Kontrol Numunelerine (KONT40) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.40 su/çimento oranına sahip üç kontrol numunesinden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.5. KONT40 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

i_{corr} sonuçlarında çatlaklı bölgenin çatlaksız bölgeye nazaran bir parça daha fazla yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

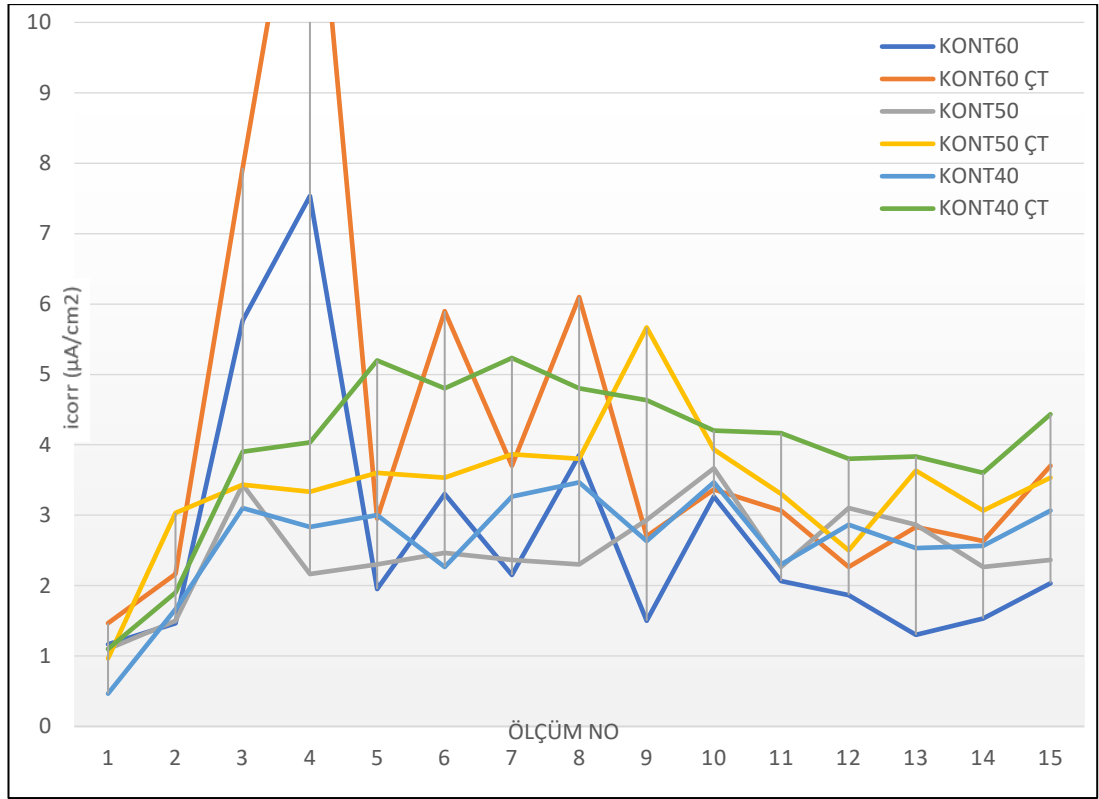


Şekil 4.6. KONT40 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

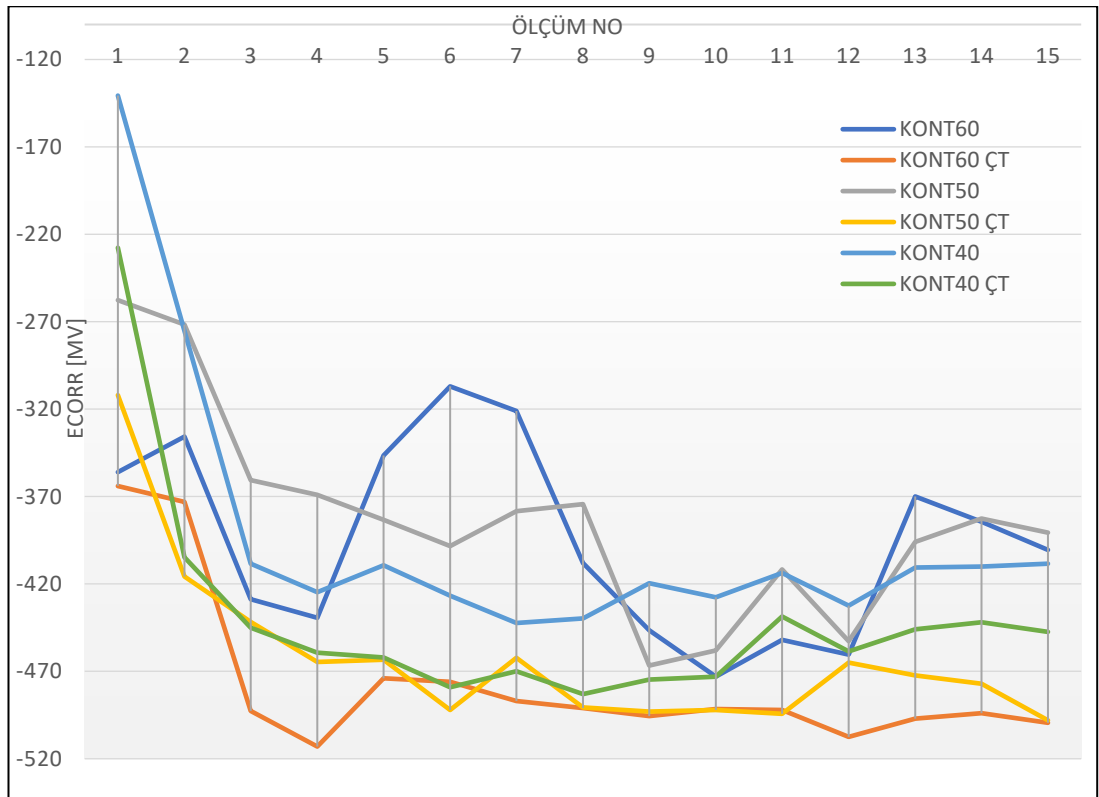
E_{corr} sonuçlarında çatlaklı bölgenin çatlaksız bölgeye göre biraz daha fazla potansiyel değerlerine ulaştığı görülmektedir. Çatlaklı ve çatlaksız tarafın eğrileri birbirlerine oldukça yakındır. Sonuçlar i_{corr} ile örtüşmektedir.

4.1.4. Kontrol Numunelerinin Toplu Ölçüm Sonuçları

Bütün su/çimento oranlarında kontrol numunelerine ait ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir. Kontrol numunelerinin i_{corr} sonuçlarına bakıldığında, korozyon mefhumunun doğasından ve kullanılan yöntemden ötürü kısmen zikzaklı bir grafiğin içinde belirli trendler görmek mümkündür. Çatlağın varlığı, korozyon hızını etkilemektedir. Bütün serilerde, aynı su/çimento oranında çatlaklı tarafların i_{corr} değerleri, çatlaksız tarafa nazaran yüksek çıkmıştır. Bunun dışında, kontrol numuneleri i_{corr} bakımından su/çimento oranıyla birlikte ciddi bir değişim göstermemişlerdir. Kontrol numunelerinin E_{corr} sonuçlarında ise su/çimento oranının yarattığı farka göre daha belirgin bir fark, çatlağın varlığı tarafından yaratılmıştır. Bütün serilerde, aynı su/çimento oranında çatlaklı tarafların E_{corr} değerleri, çatlaksız tarafa nazaran yüksek çıkmıştır. Bunun dışında, kontrol numuneleri E_{corr} bakımından su/çimento oranıyla birlikte ciddi bir değişim göstermemişlerdir.



Şekil 4.7. KONT numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.



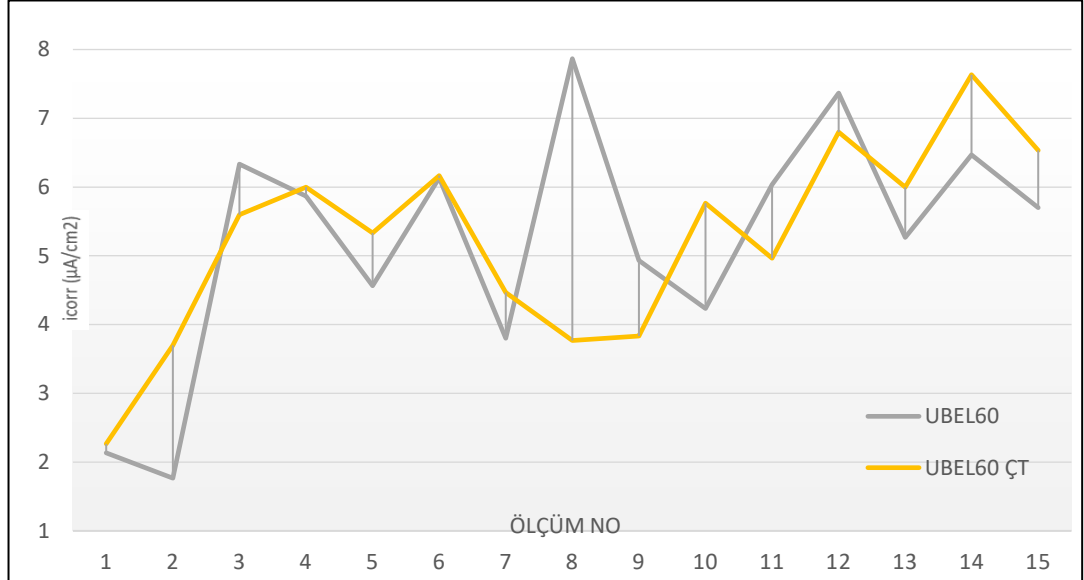
Şekil 4.8. KONT numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

4.2. Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UBEL) Ait Ölçüm Sonuçları

TS EN 206-1’de verilen sınır değere göre uçucu kül içeren numunelere ait ölçüm sonuçları bu kısımda verilmiştir.

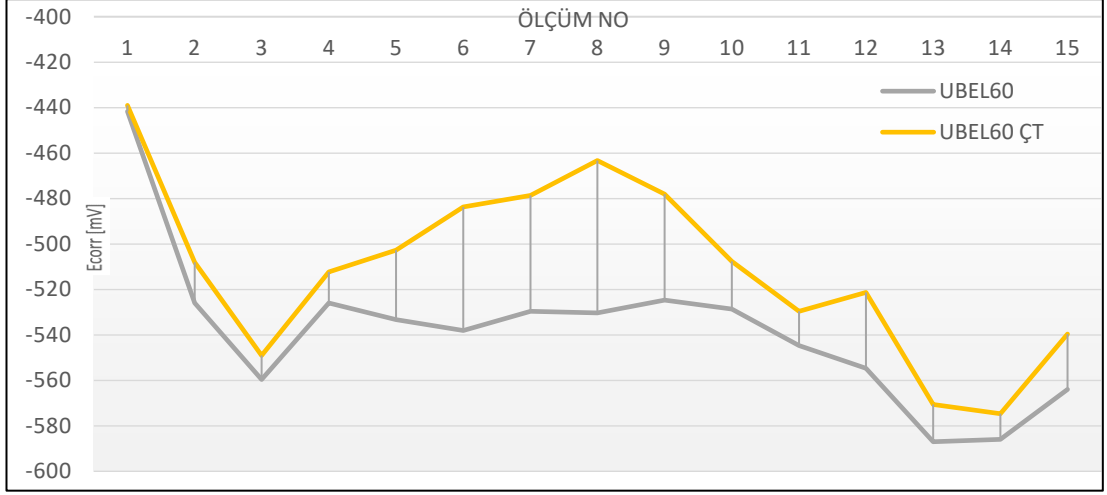
4.2.1. 0.60 Efektif Su/Çimento Oranındaki Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UBEL60) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.60 efektif su/çimento oranında öntanımlı k -değerine göre uçucu kül içeren üç numuneden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.9. UBEL60 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

i_{corr} sonuçlarına bakılırsa, çatlaklı taraf ile çatlaksız taraf arasında ciddi bir fark görülmemektedir. Bunun yanı sıra hem çatlaklı hem de çatlaksız taraf için ortalama i_{corr} değerleri oldukça yüksektir.

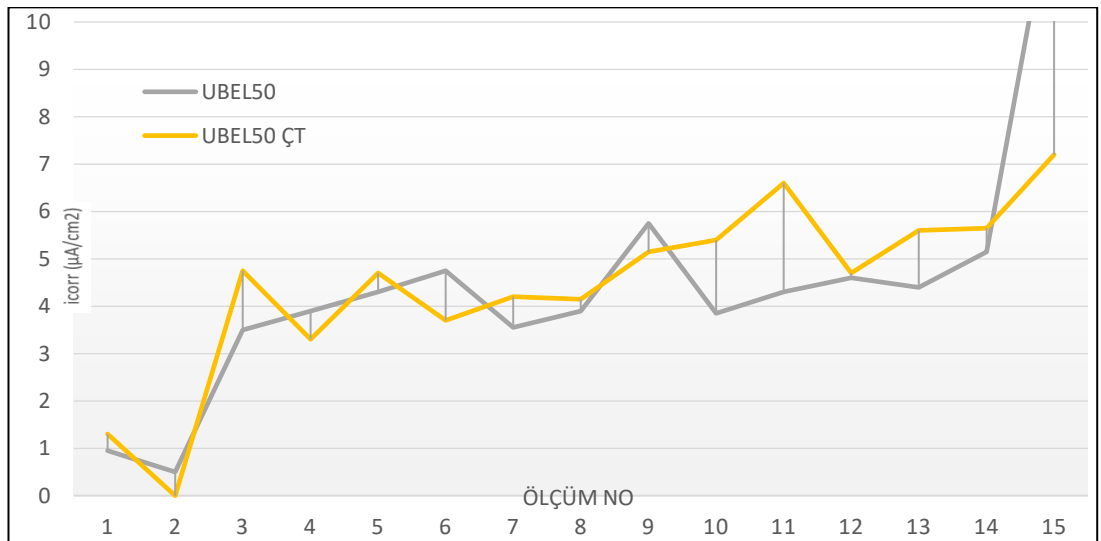


Şekil 4.10. UBEL60 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

E_{corr} sonuçları ile i_{corr} sonuçları birbirlerini tamamlamaktadırlar. Çatlaklı taraf ile çatlaksız taraf arasındaki fark oldukça azdır. Su/çimento oranı yüksek su/çimento oranında, çatlağın varlığından daha etkin olmuştur.

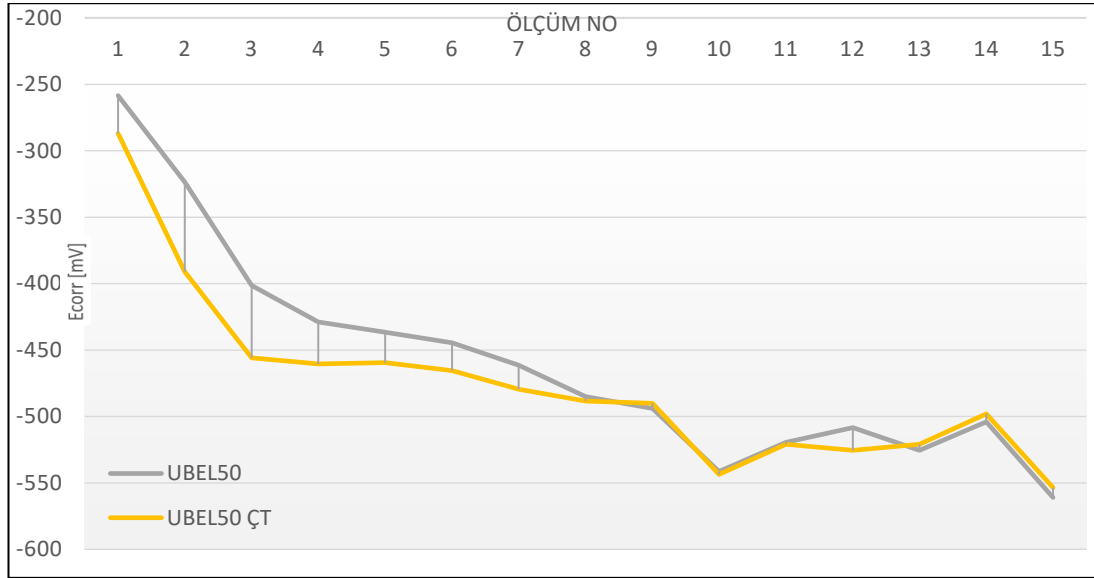
4.2.2. 0.50 Efektif Su/Çimento Oranındaki Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren (UBEL50) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.50 efektif su/çimento oranında öntanımlı k -değerine göre uçucu kül içeren iki numuneden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.11. UBEL50 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

i_{corr} sonuçlarına bakılırsa, çatlaklı taraf ile çatlaksız taraf arasında ciddi bir fark görülmektedir. Bunun yanı sıra hem çatlaklı hem de çatlaksız taraf için ortalama i_{corr} değerleri 0.50 efektif su/çimento oranına sahip bir beton için yüksek görünmektedir.

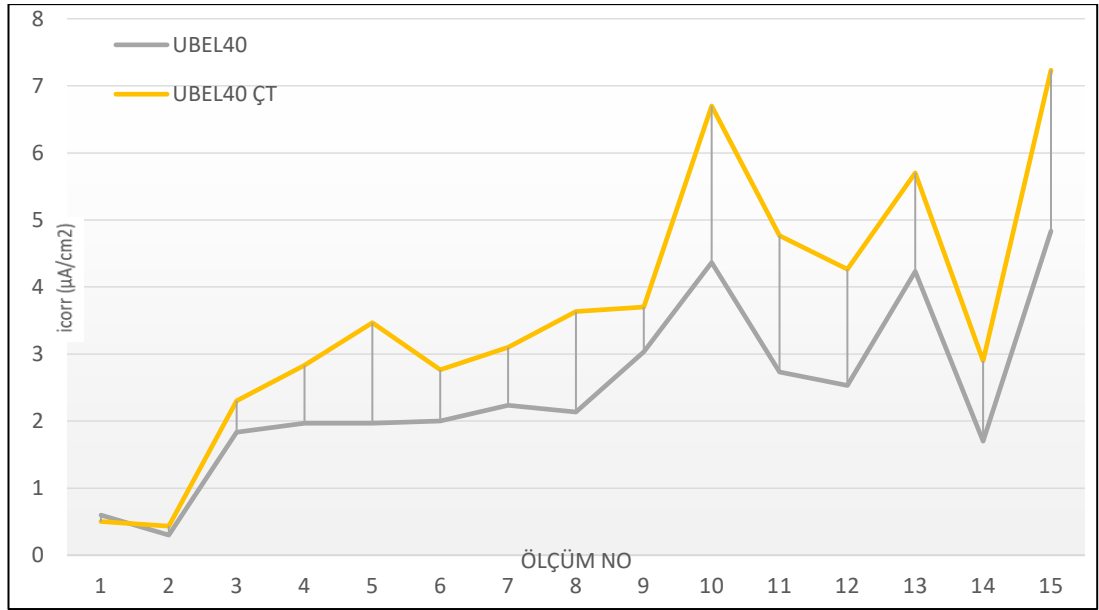


Şekil 4.12. UBEL50 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

E_{corr} sonuçları ile i_{corr} sonuçları birbirleriyle örtüşmektedir. Çatlaklı taraf ile çatlaksız taraf arasındaki fark yok denecek kadar azdır.

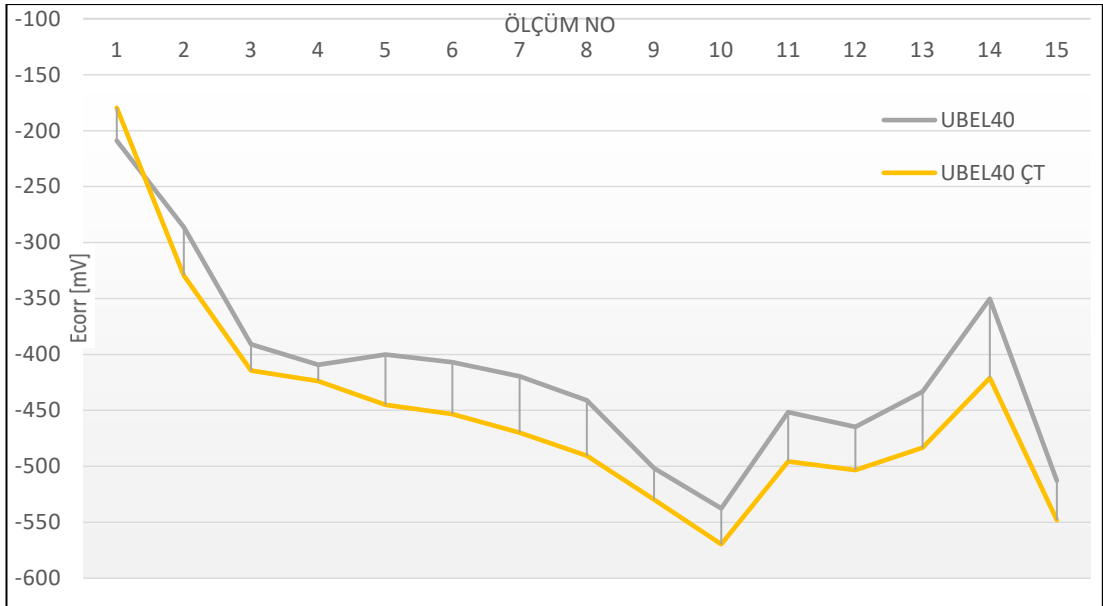
4.2.3. 0.40 Efektif Su/Çimento Oranındaki Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UBEL40) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.40 efektif su/çimento oranında öntanımlı k -değerine göre uçucu kül içeren üç numuneden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.13. UBEL40 numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

i_{corr} sonuçlarına bakılırsa, çatlaklı taraf ile çatlaksız taraf arasındaki fark, yüksek su/çimento oranlarına göre belirginleşmiştir. Yüksek su/çimento oranlarında hem çatlaklı hem çatlaksız taraf yüksek değerlere ulaşmışlardır.

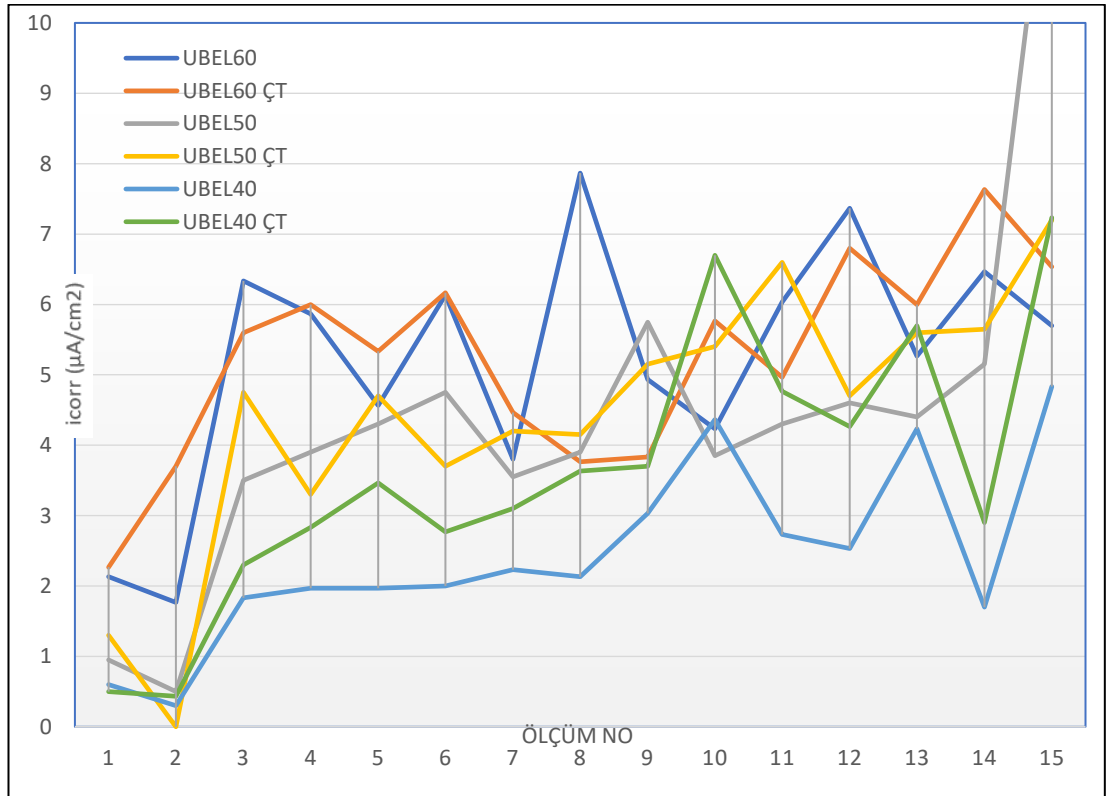


Şekil 4.14. UBEL40 numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

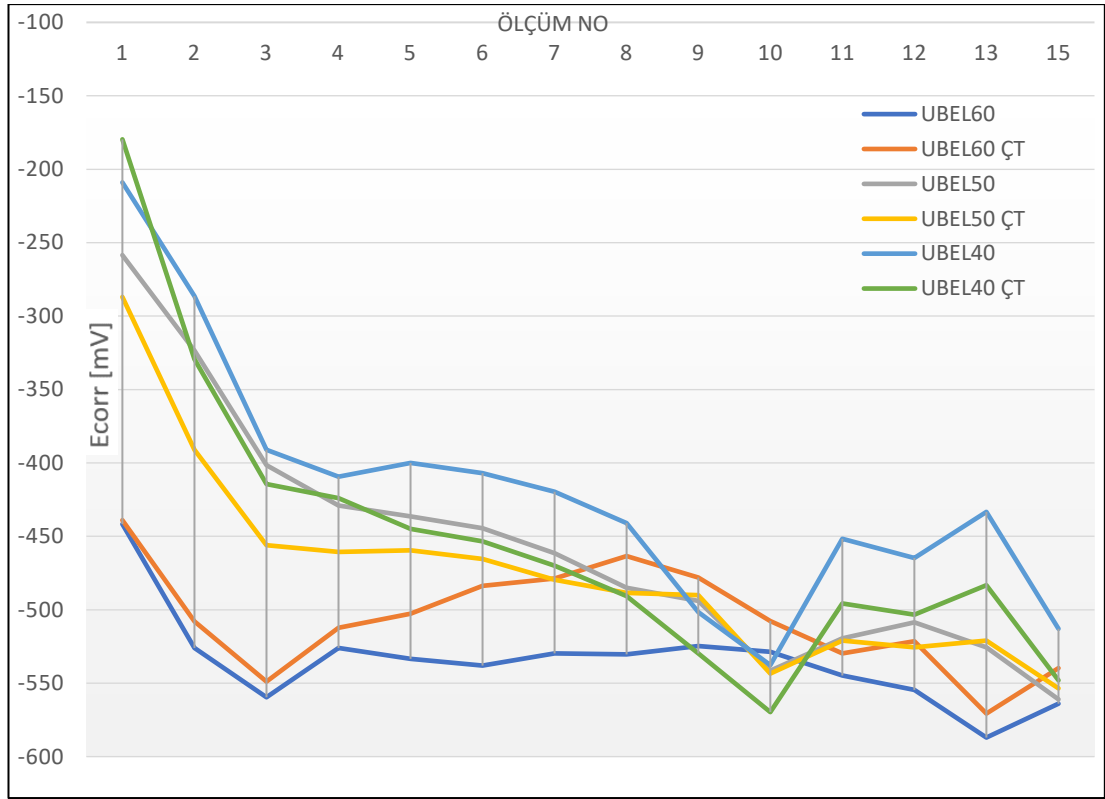
E_{corr} sonuçları ile i_{corr} sonuçları birbirleriyle örtüşmektedir. Çatlaklı taraf ile çatlaksız taraf arasındaki fark izafen belirginleşmiştir.

4.2.4. Öntanımlı k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelerin Toplu Sonuçları

Bütün efektif su/çimento oranlarında öntanımlı k -değerine göre uçucu kül içeren numunelere ait ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir. Öntanımlı k -değerine göre uçucu kül içeren numunelerin i_{corr} sonuçlarında, su/çimento oranının ayırt ediciliği öne çıkmaktadır. Su/çimento oranı yüksek serilerde su/çimento oranının yarattığı farka göre daha belirgin bir fark, çatlağın varlığı tarafından yaratılmıştır. Bütün serilerde, aynı su/çimento oranında çatlaklı tarafların i_{corr} değerleri, çatlaksız tarafa nazaran yüksek çıkmıştır. Öntanımlı k -değerine göre uçucu kül içeren numunelerin E_{corr} sonuçlarında, su/çimento oranı etkin faktördür. Su/çimento oranı yüksek serilerde ise çatlağın etkisi görece azdır. Bütün serilerde, aynı su/çimento oranında çatlaklı tarafların E_{corr} değerleri, çatlaksız tarafa nazaran yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.15. UBEL numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.



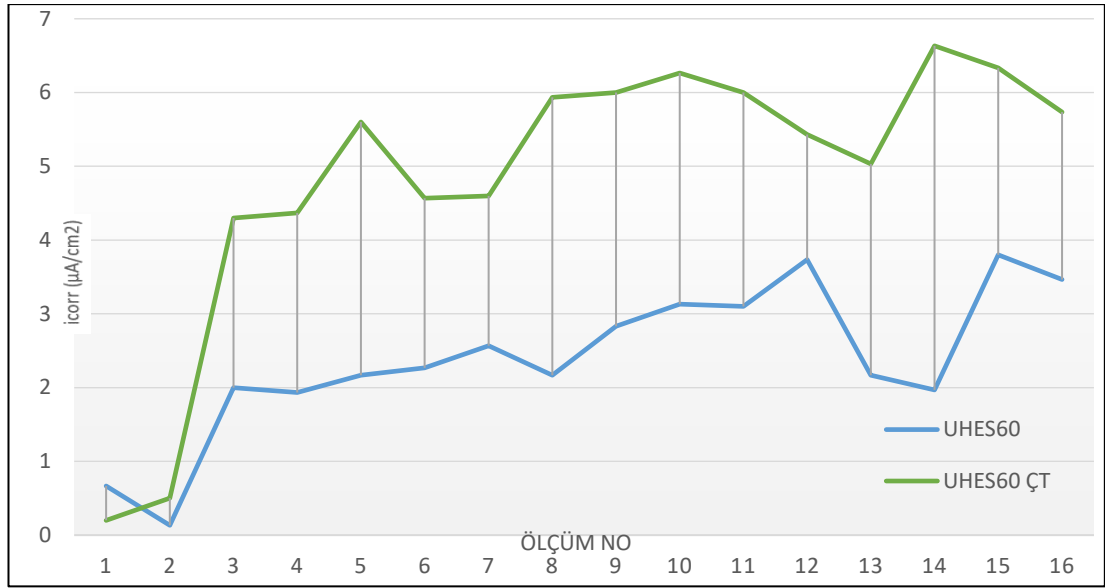
Şekil 4.16. UBEL numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

4.3. Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UHES) Ait Ölçüm Sonuçları

Hesaplanan k -değerine göre kül içeren numunelere ait ölçüm sonuçları bu kısımda verilmiştir.

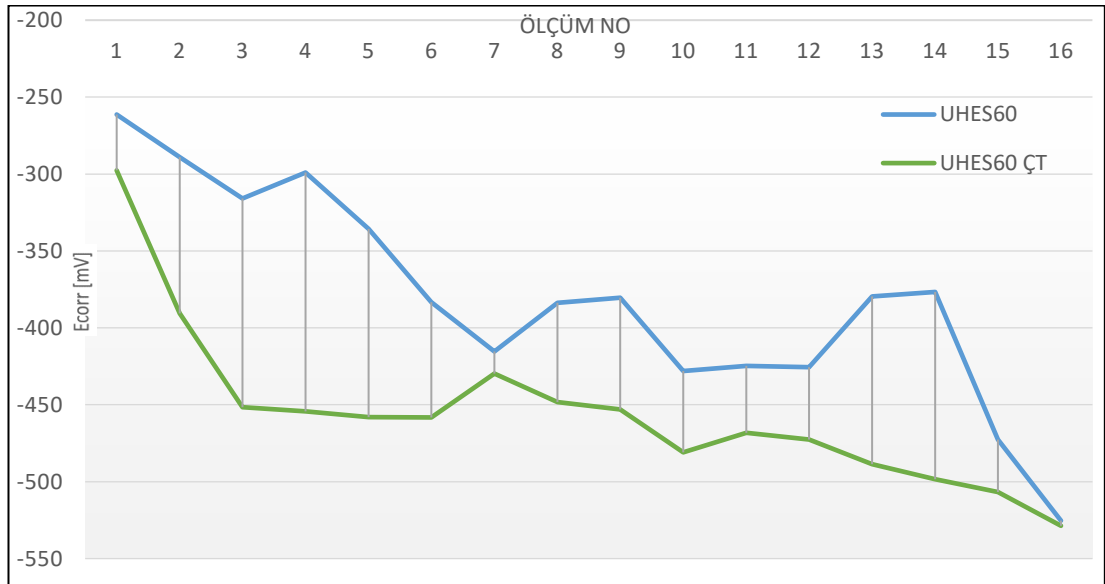
4.3.1. 0.60 Efektif Su/Çimento Oranındaki Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UHES60) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.60 efektif su/çimento oranında ölçülmüş k -değerine ($k = 0.495$) göre uçucu kül içeren üç numuneden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.17. UHES60 ($k = 0.495$) numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

Grafikteki i_{corr} sonuçlarına bakılarak bir seviyeden sonra korozyonun hem çatlaklı hem de çatlaksız tarafta tedrici bir şekilde arttığı söylenebilir. 0.60 yüksek bir su/çimento oranıdır ve bu seri için hesaplanan k -değeri standartta verilen 0.4 değerinden daha yüksektir. Bu seri için çatlaklı tarafta korozyon hususunda uçucu kül kullanımı yeterince önleyici etki yapamamıştır.

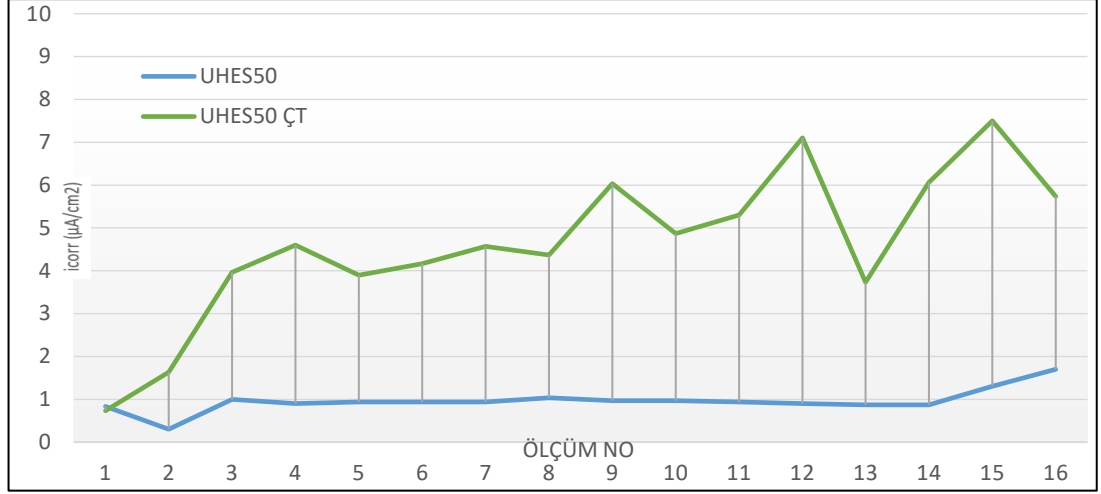


Şekil 4.18. UHES60 ($k = 0.495$) numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

Grafikteki E_{corr} sonuçlarına bakılırsa, çatlaklı ve çatlaksız taraflardaki potansiyel artışları birbirlerine i_{corr} 'a nazaran daha yakındır.

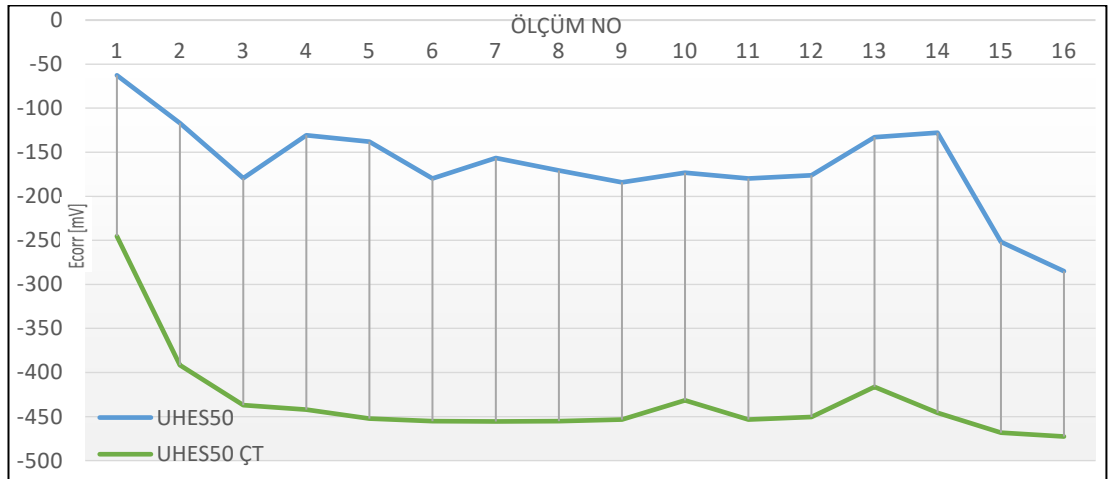
4.3.2. 0.50 Efektif Su/Çimento Oranındaki Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UHES50) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.50 efektif su/çimento oranında ölçülmüş k -değerine ($k = 0.338$) göre uçucu kül içeren üç numuneden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.19. UHES50 ($k = 0.338$) numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

Bu seri için, çatlaksız tarafta ölçülmüş k -değerine göre uçucu kül içeren numunelerin başarılı bir iş çıkarttığı söylenebilir. Ölçülmüş k -değeri, standartta verilen 0.4 değerinden daha küçüktür. Bu numunelerin daha geçirimsiz olması beklenen bir durumdur. Çatlaksız tarafta i_{corr} değeri 16 ölçüm boyunca çok küçük değişimler göstermiştir. Çatlaklı tarafta ise i_{corr} değerleri yüksek ve kararsızdır.

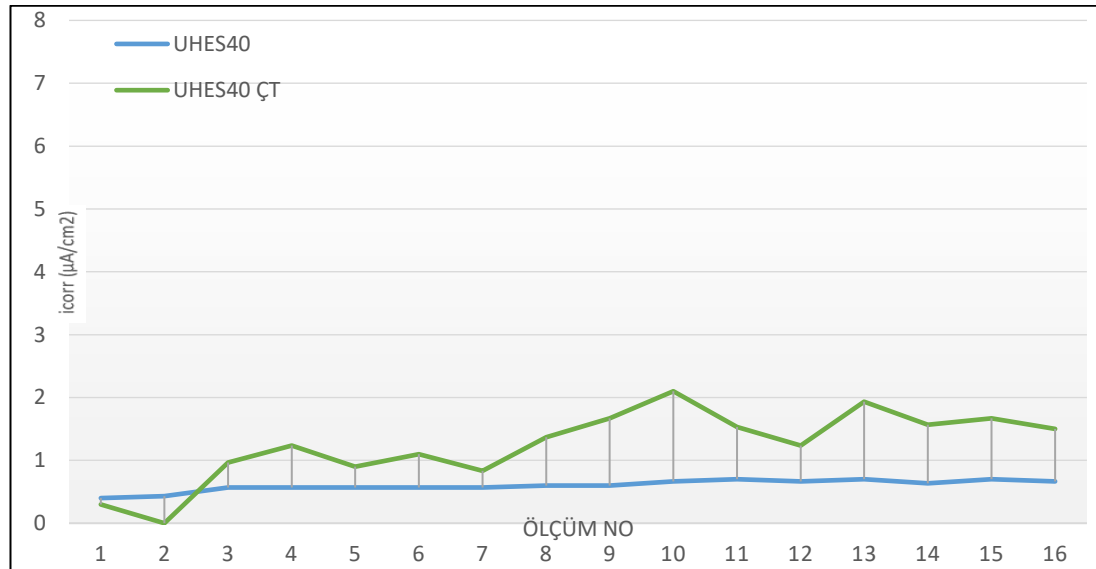


Şekil 4.20. UHES50 ($k = 0.338$) numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

Bu seri için, çatlaksız tarafta ölçülmüş k -değerine göre uçucu kül içeren numunelerin başarılı bir iş çıkarttığı söylenebilir. Ölçülmüş k -değeri, standartta verilen 0.4 değerinden daha küçüktür. Bu numunelerin daha geçirimsiz olması beklenen bir durumdur. Çatlaklı taraf ile çatlaksız taraf arasında mertebe farkı görülmektedir. Sonuçlar i_{corr} değerleri ile örtüşmekte olan bir eğilim göstermektedir.

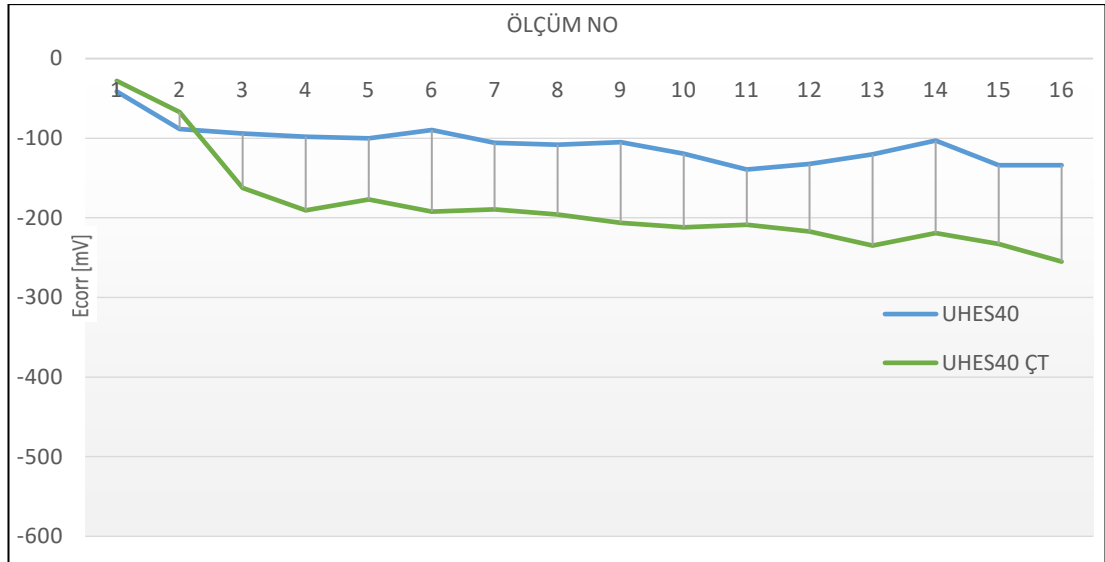
4.3.3. 0.40 Efektif Su/Çimento Oranındaki Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelere (UHES40) Ait Ölçüm Sonuçları

Grafiklerde 0.40 efektif su/çimento oranında ölçülmüş k -değerine ($k = 0.103$) göre uçucu kül içeren üç numuneden elde edilen E_{corr} ve i_{corr} sonuçlarının ortalamaları görülmektedir.



Şekil 4.21. UHES40 ($k = 0.103$) numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.

Her iki tarafta da ölçülmüş k -değerine göre uçucu kül içeren numuneler çok iyi iş çıkartmıştır. Bu seriye bütün deney düzeneğinin şahikası denebilir. 0.40 su/çimento oranında ölçülmüş k -değeri, standartta verilen 0.4 değerinden neredeyse dörtte bir mertebesinde daha küçüktür. Çatlaksız tarafta i_{corr} değeri 16 ölçüm boyunca neredeyse değişmemiştir. Çatlaklı tarafta ise i_{corr} değerleri zaman zaman sıçramalar yapmasına rağmen gayet kabul edilebilir değerlerde seyretmiştir. Bütün bu durumlarda düşük su/çimento oranından ziyade $k = 0.103$ değerinin daha etkin olduğu söylenebilir.

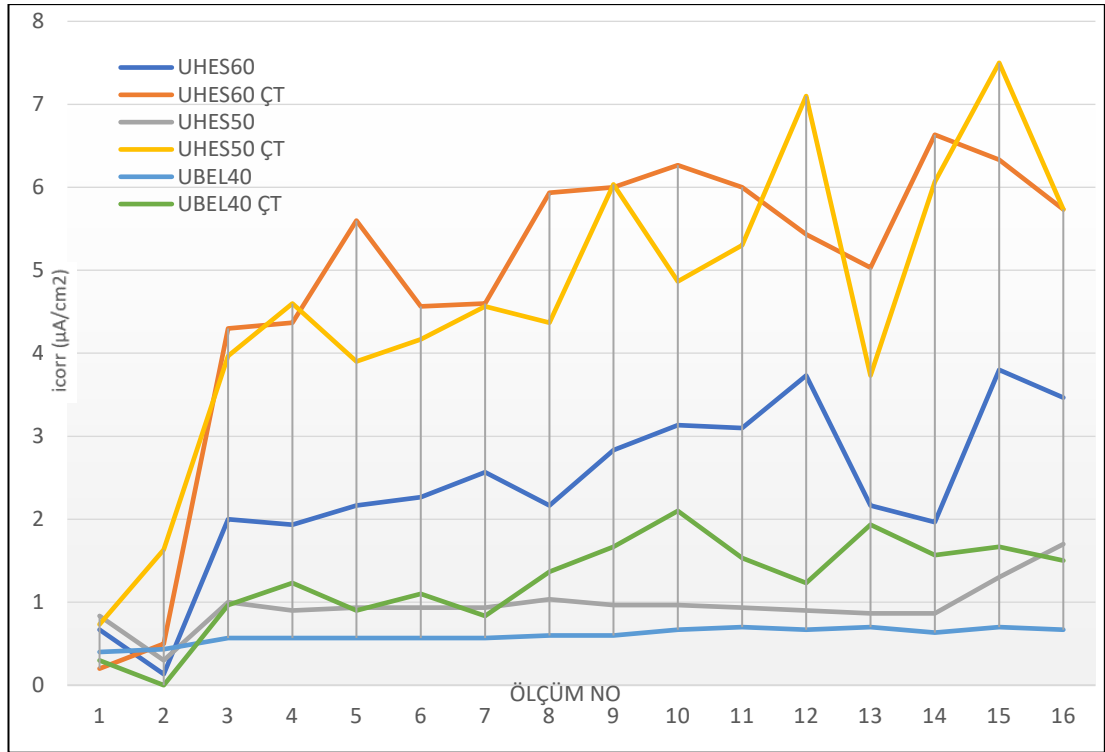


Şekil 4.22. UHES40 ($k = 0.103$) numunelerine ait ortalama E_{corr} sonuçları.

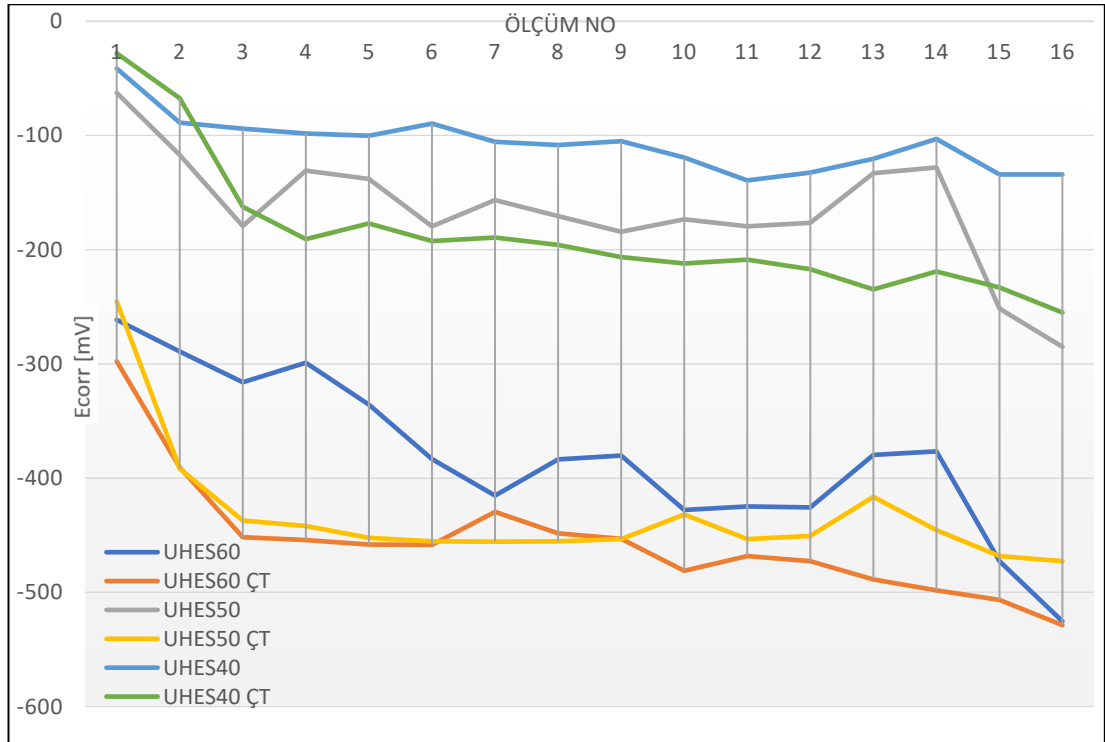
E_{corr} sonuçları, i_{corr} sonuçları ile örtüşmekte olan bir trend izlemiştir. Çatlaksız tarafta E_{corr} değerleri küçük değişimler göstererek artmıştır. Çatlaklı tarafta ise ani potansiyel artışından sonra daha yüksek bir eğimde olan artış gözlenmektedir. Yine de potansiyel değerleri, diğer bütün serilere göre makul seviyelerdedir. Bu seride kullanılan ölçülmüş k -değeri, standartta verilen 0.4 değerinden neredeyse dörtte bir mertebesinde daha küçüktür. Bütün bu sonuçlar için düşük su/çimento oranından ziyade $k = 0.103$ değerinin daha etkin olduğu söylenebilir.

4.3.4. Ölçülmüş k -değerine Göre Uçucu Kül İçeren Numunelerin Toplu Sonuçları

Bütün su/çimento oranlarında ölçülmüş k -değerlerine göre uçucu kül içeren numunelere ait ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir. Bütün su/çimento oranlarında ölçülmüş k -değerine göre uçucu kül içeren numunelerin i_{corr} sonuçları incelenirse, k -değeri standartta verilenden daha küçük olan 0.50 ve 0.40 su/çimento oranlarında üretilen numunelerin çatlaksız kısımlarında korozyon etkisinin çok küçük ve sabit olduğu görülür. 0.60 ve 0.50 su/çimento oranlarındaki numunelerin çatlaklı taraflarının performansları birbirlerine benzer seyir izlemiştir. Burada en dikkat çeken sonuç, 0.40 su/çimento oranında $k = 0.103$ değerine göre uçucu kül içeren numunelerin korozyon performansının çatlaklı taraf-çatlaksız taraf fark etmeksizin standart k -değerine göre uçucu kül içeren numuneler veya kontrol numunelerine göre ciddi anlamda başarılı olduğudur.



Şekil 4.23. UHES numunelerine ait ortalama i_{corr} sonuçları.



Şekil 4.24. UHES numunelerinin ortalama E_{corr} sonuçları.

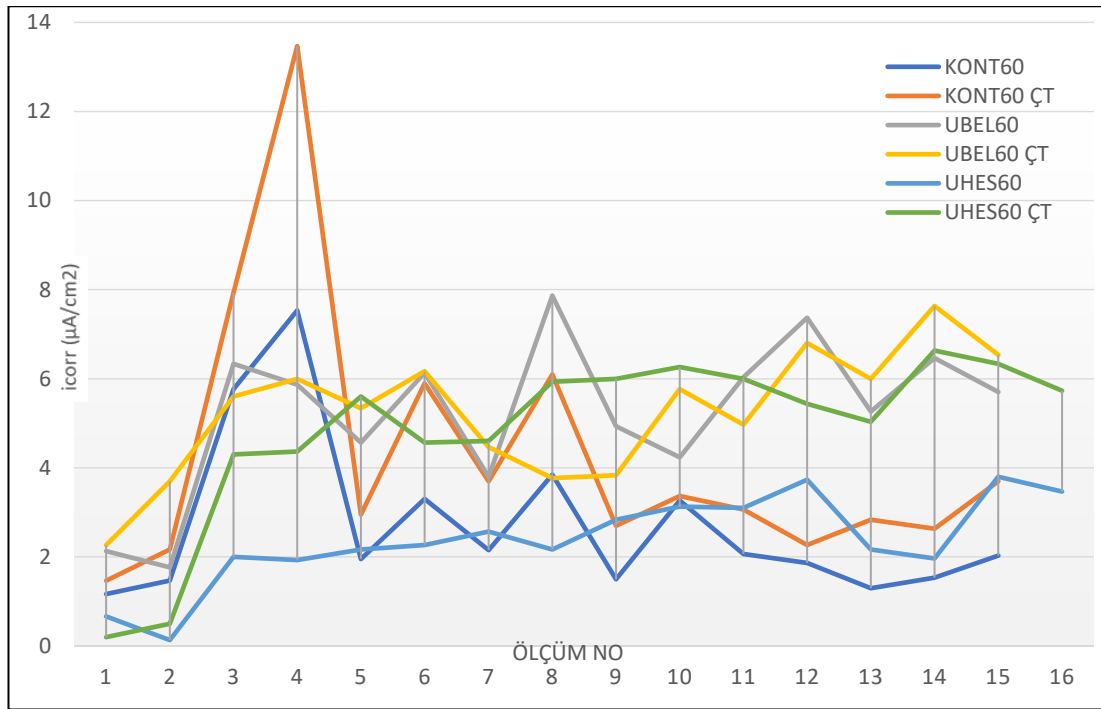
Bütün su/çimento oranlarında numunelerin E_{corr} sonuçları incelendiğinde, i_{corr} sonuçları ile benzer trendler görülmektedir. 0.50 su/çimento oranının çatlaksız tarafı,

0.40 su/çimento oranının her iki taraftaki başarısı buradan da izlenebilir. E_{corr} grafiği, i_{corr} grafiğini doğrular niteliktedir.

Buraya kadar olan bölümde, her serinin üç farklı su/çimento oranındaki sonuçlarının kendi içinde çatlaklı-çatlaksız taraf olarak incelemesi ve aynı seriye ait üç farklı su/çimento oranlarındaki i_{corr} ve E_{corr} değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bundan sonraki kısımda aynı su/çimento oranında farklı serilerin performansları konu edilecektir.

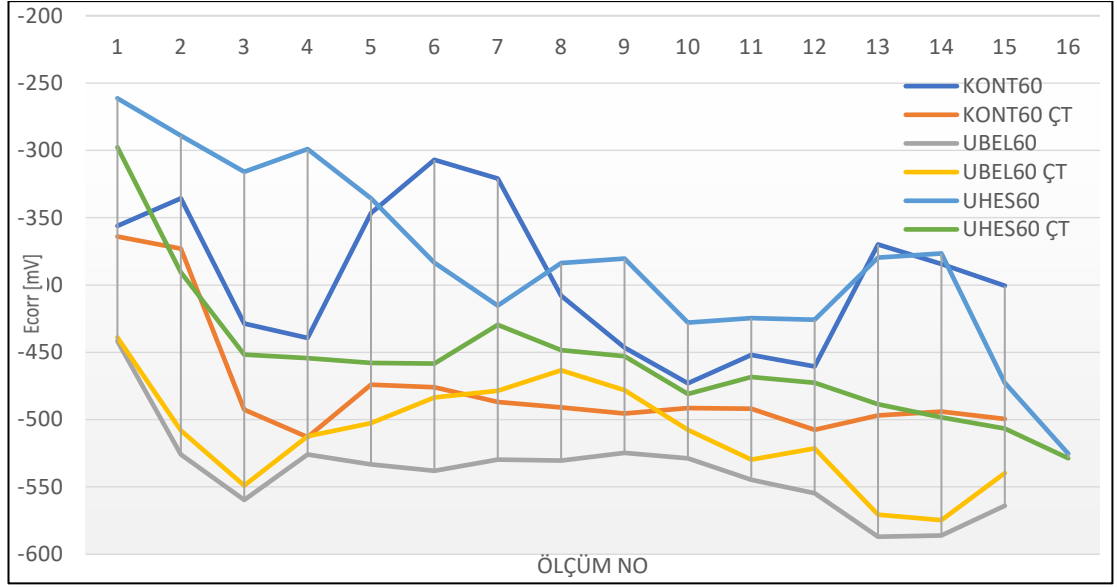
4.4. 0.60 Efektif Su/Çimento Oranındaki Numunelere Ait Ölçüm Sonuçları

0.60 efektif su/çimento oranında üç serinin çatlaklı ve çatlaksız taraflarına ait ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.25. 0.60 su/çimento oranına sahip üç serinin ortalama i_{corr} değerleri.

0.60 su/çimento oranındaki i_{corr} sonuçları incelendiğinde, çatlaklı tarafların çatlaksız taraflara göre daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Kontrol numuneleri, 0.60 su/çimento oranında $k = 0.4$ değerine göre üretilen numunelere nazaran daha başarılıdır. 0.60 su/çimento oranının yüksek bir değer olduğu unutulmamalıdır.

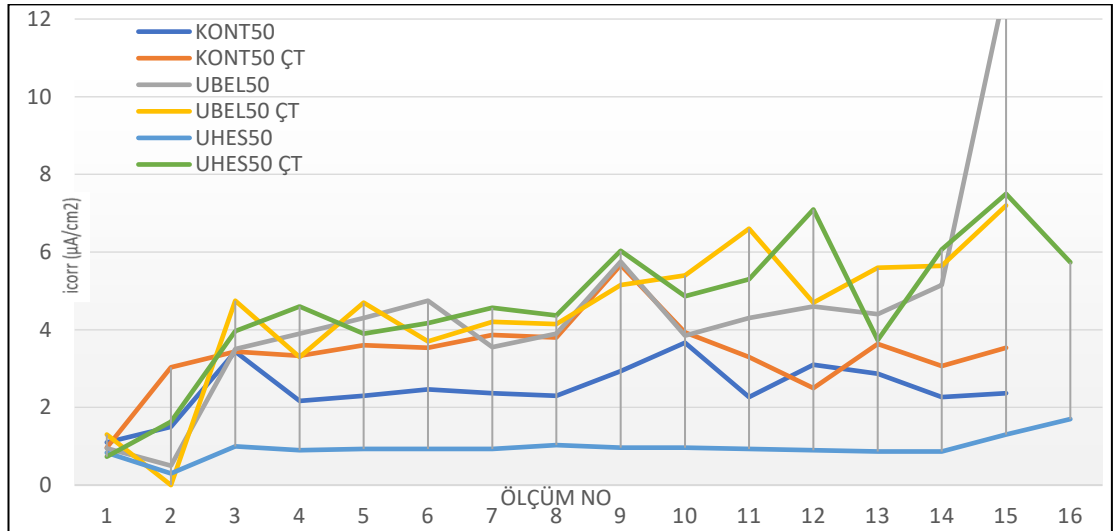


Şekil 4.26. 0.60 su/çimento oranına sahip üç serinin ortalama E_{corr} değerleri.

E_{corr} değerlerine bakılırsa, i_{corr} grafiğindeki eğilimler benzer şekilde fark edilebilir. Aynı şekilde, $k = 0.4$ değeriyle üretilen numuneler oldukça yüksek potansiyellere erişmişlerdir.

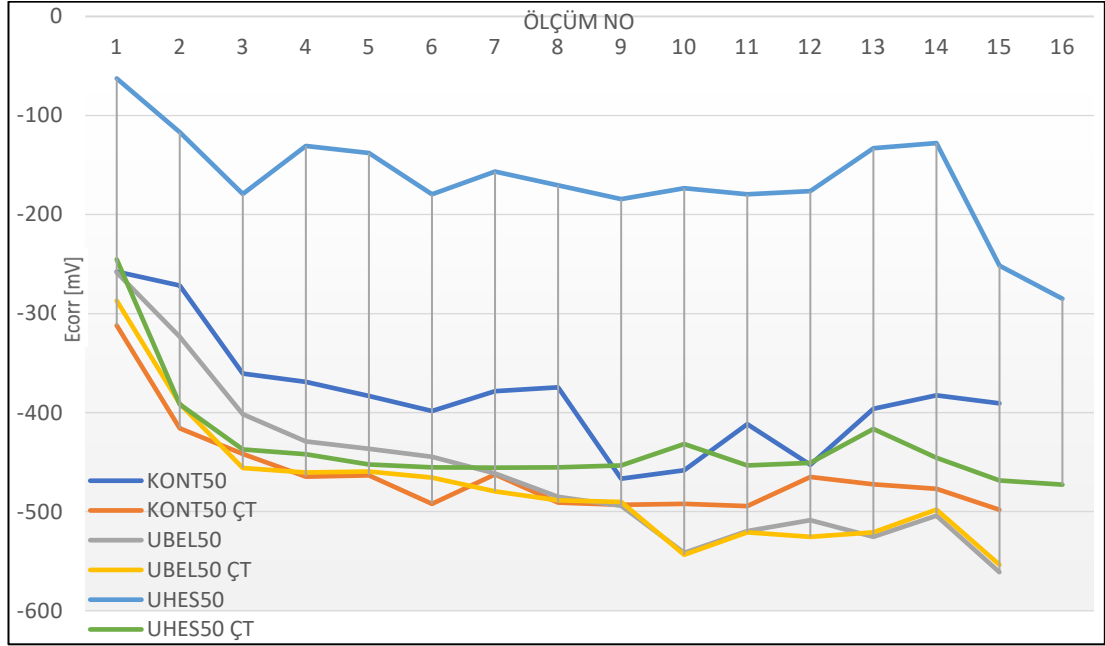
4.5. 0.50 Efektif Su/Çimento Oranındaki Numunelere Ait Ölçüm Sonuçları

0.50 efektif su/çimento oranında üç serinin çatlaklı ve çatlaksız taraflarına ait ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.27. 0.50 su/çimento oranına sahip üç serinin ortalama i_{corr} değerleri.

0.50 su/çimento oranında i_{corr} sonuçlarına bakıldığında kontrol numunelerinin $k=0.4$ değeriyle üretilenlere göre başarısı devam etmektedir. Ölçülmüş k -değerinin kullanımı 0.60 su/çimento oranında gösteremediği farkını ortaya koymaya başlamıştır, çatlaksız tarafındaki i_{corr} değerleri, neredeyse hiç korozyona uğramadığına işaret etmektedir. $k = 0.4$ değeriyle üretilen numunelerdeki ölçümler kararsızdır, çatlaklı ve çatlaksız taraf arasındaki fark griftir.

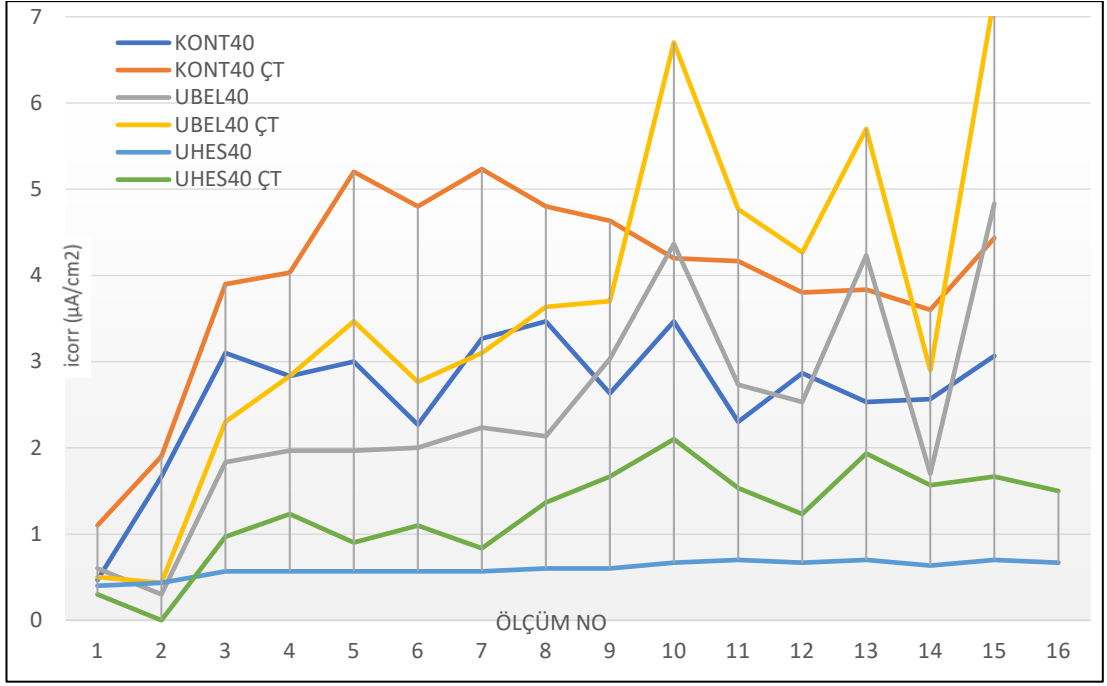


Şekil 4.28. 0.50 su/çimento oranına sahip üç serinin ortalama E_{corr} değerleri.

E_{corr} sonuçlarına bakıldığında, i_{corr} sonuçlarına göre farklı bir eğilim görülmektedir. Ölçülmüş k -değerlerine göre üretilen numunelerin potansiyel değerleri, diğerlerine nazaran mertbe seviyesinde düşüktür. Diğer seriler ve çatlak varlığı, yeterince birbirinden ayrılmamaktadır.

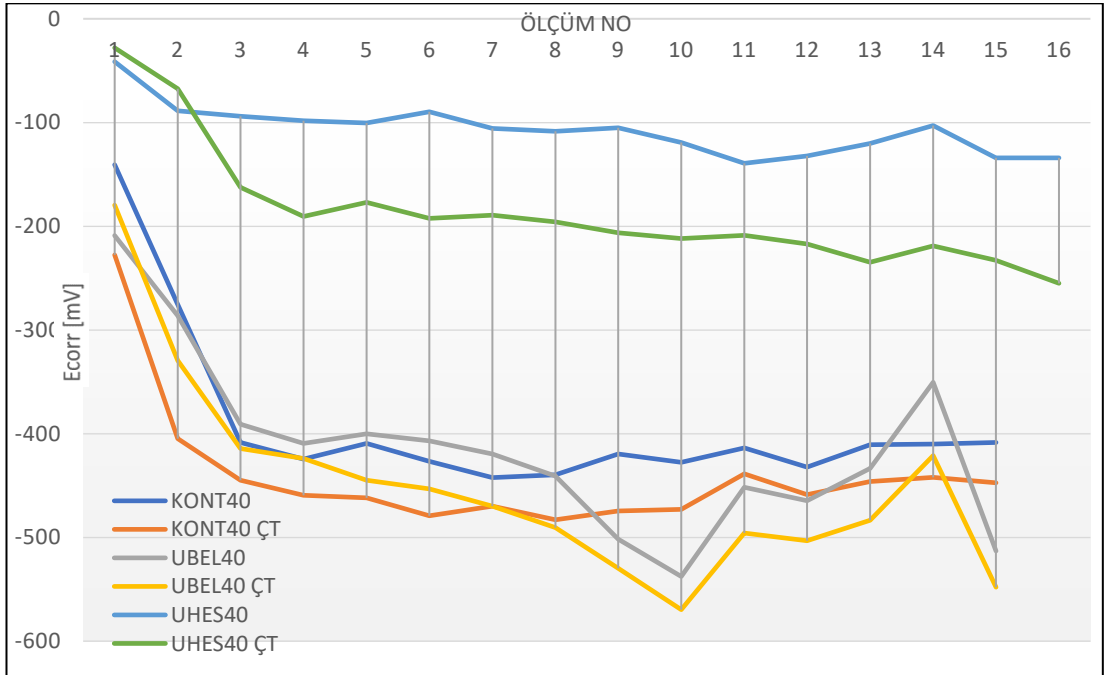
4.6. 0.40 Efektif Su/Çimento Oranındaki Numunelere Ait Ölçüm Sonuçları

0.40 efektif su/çimento oranında üç serinin çatlaklı ve çatlaksız taraflarına ait ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.29. 0.40 su/çimento oranına sahip üç serinin ortalama i_{corr} değerleri.

Ölçülmüş k -değerine göre uçucu kül içeren numuneler, 0.40 su/çimento oranında kıyas kabul etmeyecek derecede başarılıdır. Hem çatlaklı hem çatlaksız tarafta i_{corr} değerleri 16 ölçüm boyunca neredeyse artmamıştır bile. $k = 0.4$ değeriyle üretilen numuneler, yine kontrol numunelerine benzer sonuçlara sahiptir.



Şekil 4.30. 0.40 su/çimento oranına sahip üç serinin E_{corr} değerleri.

E_{corr} değerlerine bakılırsa, bütün numunelerde başlangıçtan itibaren benzer eğimlerde potansiyel artışı olmuştur. 3. haftadan itibaren potansiyel değerleri artmaya başlamıştır. $k = 0.108$ değeriyle üretilen numuneler i_{corr} 'daki gibi düşük potansiyel değerlerine sahiptir. Öntanımlı k -değerine göre uçucu külle üretilen numunelerle kontrol numuneleri arasındaki fark küçüktür.

5. BULGULAR

Korozyon hızı su/çimento oranı azaldıkça azalma eğilimi göstermektedir (Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.23, Şekil 4.24). Bu durum, birbirine yakın değerler veren KONT ve UBEL serilerinden ziyade UHES serilerinde belirginleşmiştir (Şekil 4.23, Şekil 4.24). UHES serisinde 0.60 su/çimento oranına göre; 0.50 su/çimento oranındaki numuneler %51, 0.40 su/çimento oranındaki numuneler ise %81 daha düşük i_{corr} değerleri vermişlerdir (Şekil 4.23).

Numunelerdeki oluşturulan suni çatlaklar (0.3 mm), klorür geçirimsizliğini ve dolayısıyla korozyon boyutunu artırıcı bir etki göstermiştir. Neredeyse bütün numunelerde çatlak bulunan taraftaki korozyon hızı, çatlaksız tarafa nazaran daha yüksektir. KONT serisinde 0.60 su/çimento oranında %82 (Şekil 4.1), 0.50 su/çimento oranında %50 (Şekil 4.3), 0.40 su/çimento oranında ise %45 fark etmiştir (Şekil 4.5). UBEL serisinde 0.60 su/çimento oranında %15 (Şekil 4.9), 0.50 su/çimento oranında %10 (Şekil 4.11), 0.40 su/çimento oranında ise %50 fark çıkmıştır (Şekil 4.13). UHES serisinde 0.60 su/çimento oranında %66 (Şekil 4.17), 0.50 su/çimento oranında %476 (Şekil 4.19), 0.40 su/çimento oranında ise %138 fark etmiştir (Şekil 4.21). Çatlak bulunan yapılar, dış etkiye bağlı olarak kuvvetle muhtemel daha çabuk korozyona uğrarlar. Bu durum yapının servis ömrünü olumsuz yönde etkiler.

Yapılarda sürdürülebilirliğin yoğun tartışma konusu olduğu son yıllarda, üretimi için büyük miktarda enerji harcanan çimentoya ikame olarak bir endüstriyel atık olan uçucu külün kullanılması daha da önem kazanmaktadır. Uçucu kül uzun sürelerdir beton üretiminde kullanılmaktadır. Ancak burada konu edinilen durum, uçucu kül kullanımındaki detaylardır. TS EN 206-1 uçucu kül kullanımının çerçevesini çizmiştir. Standartın puzolanik katkılar ile ilgili kısmında tanımı yapılan k -değeri uçucu kül için 0.4 olarak belirlenmiştir. Ancak bu değer rijit bir kurala işaret etmez. Standart tarafından belirlenen $k = 0.4$ değerine göre karışım hesabı yapılarak üretilen numuneler, kontrol betonuna nazaran başarılı olamamışlardır. KONT serisinin 0.40 su/çimento oranındaki numunelerinin i_{corr} değerleri ölçümlerin başlangıcından itibaren 15 ölçüm boyunca çatlaksız tarafta $2.60 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, çatlaklı tarafta $3.33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ artış göstermiştir (Şekil 4.29). UBEL numunelerinin 0.40 su/çimento oranındaki numunelerinin i_{corr} değerleri 15 ölçüm boyunca çatlaksız

tarafıta 4.23 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, çatlaklı tarafıta 6.73 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ artış göstermiştir (Şekil 4.29). Buna karşın, 0.40 su/çimento oranlı $k = 0.103$ değeriyle üretilmiş numunelerin i_{corr} değeri 16 ölçüm boyunca çatlaksız tarafıta sadece 0.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, çatlaklı tarafıta ise 1.36 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ artmıştır (Şekil 4.29). Bu görelili olarak neredeyse artış olmadığı anlamına gelir. Standarttaki k -değeri bu çalışmadaki çatlak varlığı, klorür etkisi, farklı su/çimento oranları parametreleriyle sınanmıştır ve hesaplanarak elde edilen daha düşük k -değeri daha iyi sonuçlar vermiştir. Standarttaki değeri *a priori* olarak görülmemelidir. Özellikle düşük su/çimento oranlarında, TS CEN/TR 16639 teknik raporunda tarif edildiği şekilde hesaplanan k -değeri daha düşük olmaktadır. Korozyon ihtimalini arttıracak çevre koşullarına maruz kalacak betonlar tasarlanırken hem düşük su/çimento oranı kullanımı, hem de hesaplanmış k -değeri göre uçucu kül kullanımı korozyon ihtimalini çatlak varlığında dahi ciddi oranda azaltır. UHES40 serisinin çatlaklı tarafında elde edilen i_{corr} değeri, KONT40 ve UBEL40 serisinin çatlaksız tarafından elde edilen sonuçlardan 3 kat daha azdır. Düşük su/çimento oranlarında k -değeri standartta verilen 0.4 değeri yerine hesaplayarak kullanmak, yapıların servis ömürlerini azaltan dış etkenler ve korozyona karşı koruma sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Erdoğan S. T., Erdoğan T. Y., (2007), “Bağlayıcı malzemelerin ve betonun onbinyıllık tarihi”, 1. Baskı, ODTÜ Yayıncılık.
- [2] ACI, (2005), “Cement and Concrete Terminology”, ACI 116R, American Concrete Institute.
- [3] Erdoğan T. Y., (2003), “Beton”, 6. Baskı, ODTÜ Yayıncılık.
- [4] Glazer B., Graber C., Roose C., Syrett P., Youssef C., (2011), “Fly ash in concrete”, Perkins+Will.
- [5] RILEM Technical Committee, (2018), “Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials”, 1. Baskı, Springer.
- [6] TSE, (2014), “Beton: Özellik, performans, imalat ve uygunluk”, TS EN 206-1, Türk Standartları Enstitüsü.
- [7] TSE, (2014), “k-değeri kavramı, eşdeğer beton performansı kavramı ve kombinasyonların eşdeğer performans kavramlarının kullanımı”, TSE CEN/TR 16639, Türk Standartları Enstitüsü.
- [8] Alshamsi A. M., Bushlaibi A. H., (2000), “Calcium Nitrite Effect On Setting of Cement At Various Temperatures”, Engineering Journal of Qatar University, 13, 97–105.
- [9] Baradan B., Aydın S., (2013), “Betonun Dürabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık)”, Hazır Beton, 120, 54–68.
- [10] Neville A. M., (1996), “Properties of concrete”, 4. Baskı. John Wiley.
- [11] Lee H. S., Noguchi T., Tomosawa F., (2002), “Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion”, Cement and Concrete Research, 32 (8), 1313–1318.
- [12] Song H., Saraswathy V., (2007), “Corrosion monitoring of reinforced concrete structures - A review”, International Journal of Electrochemical Science, 2, 1–28.
- [13] Eker A. A., (2009), “Makine Malzemelerinde Korozyon ve Yüzeysel Koruma Ders Notları”, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [14] Hou, B., Li, X., Ma, X., Du, C., Zhang, D., Zheng, M., Xu, W., Lu, D., Ma, F., (2017), “The cost of corrosion in China”, NPJ Materials Degradation, 1 (1), 1–10.

- [15] Söylev T. A., (2016), "Comparison of measured and prescribed k-values for the equivalent performance of fly ash concrete", International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering, 187–194, Lyngby, Danimarka, 22-24 Aėustos.
- [16] Abbas Z. H., Majdi H. S., (2017), "Study of heat of hydration of Portland cement used in Iraq", Case Studies in Construction Materials, 7, 154–162.
- [17] Erdoğan T. Y., (2004), "Sorular ve yanıtlarıyla beton malzemeleri: imentolar, agregalar, su", Türkiye Hazır Beton Birliği.
- [18] Al-Jumaily I. A. S., Naji N., Kareem Q., (2015), "An overview on the Influence of Pozzolan Materials on Properties of Concrete", International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 4 (3), 81–92.
- [19] Kochert S., Ricci D., Sorrenti R., Bertolino M., (2009), "Transforming Bottom Ash Into Fly Ash in Coal Fired Power Stations", World of Coal Ash Conference, 1–17, Lexington, KY, USA, 4-7 Mayıs 2009.
- [20] Web 1, (2018), <http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik>, (Eriřim Tarihi: 19/04/2018).
- [21] American Coal Ash Association, (2016), "Coal Combustion Production&Use Survey Report".
- [22] ASTM, (2017), "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use", ASTM- C618-17a American Society for Testing and Materials.
- [23] ACI, (2018), "Use of Fly Ash in Concrete", ACI 232R, American Concrete Institute.
- [24] Roy D. M., Luke K., Diamond S., (1984), "Characterization of fly ash and its reactions in concrete", Proceedings of Materials Research Society, 43, 3–20.
- [25] TSE, (2013), "Uucu Kl - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, zellikler ve uygunluk kriterleri", TS EN 450-1, Türk Standartları Enstitüsü.
- [26] Türker P., Erdoğan B., Katnař F., Yeğinobalı A., (2009), Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve zellikleri, 4. Baskı, Türkiye imento Müstahsilleri Birliği.
- [27] Ucol-Ganiron Jr T., (2013), "Analysis of Fly Ash Cement Concrete for Road Construction", International Journal of Advanced Science and Technology, 60, 33–44.
- [28] Alatař T., (1996), "Afřin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Klnn Yol Stabilizasyonunda eřitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı zerine Bir Araştırma", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi.

- [29]Feuerborn H.-J., (2011), “Coal Combustion Products in Europe - an update on Production and Utilisation , Standardisation and Regulation”, World of Coal Ash Conference, 1-18, Denver, CO, USA, 9-12 Mayıs.
- [30]Gürbüz E., (2009), “C tipi uçucu küllerin etkinliği”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [31]Smith I. A., (1967), “The Design of Fly-Ash Concretes.”, ICE Proceedings, 36 (4), 769–790.
- [32]Babu K. G., Rao G. S. N., (1993), “Efficiency of fly ash in concrete”, Cement and Concrete Composites, 15 (4), 223–229.
- [33]Akman S., Yücel K. T., (1995), “Efficiency Factors of Turkish C Class Fly Ashes”, Türkiye Hazır Beton Birliği XI. Beton Kongresi, İstanbul, Türkiye, 23-24 Haziran.
- [34]Yildirim H., Sümer M., Akyüncü V., Gürbüz E., (2011), “Comparison on efficiency factors of F and C types of fly ashes”, Construction and Building Materials, 25 (6), 2939–2947.
- [35]Ramezaniapour A. A., (2014), Cement Replacement Materials; Properties, Durability, Sustainability, 1. Baskı, Springer.
- [36]Chindaprasirt P., Homwuttiwong S., Sirivivatnanon V., (2004), “Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar”, Cement and Concrete Research, 34 (7), 1087–1092.
- [37]Durán-Herrera A., Juárez C. A., Valdez P., Bentz D. P., (2011), “Evaluation of sustainable high-volume fly ash concretes”, Cement and Concrete Composites, 33 (1), 39–45.
- [38]Güneyisi E., Gesoglu M., Al-Goody A., Ipek S., (2015), “Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete”, Construction and Building Materials, 95, 29–44.
- [39]Jawed I., Skalny J. P., (1981), “Hydration of Tricalcium Silicate In The Presence of Fly Ash”, Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete, 60–70.
- [40]Thomas M. D. A., (2007), “Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete”, Portland Cement Association, 1-24.
- [41]Lane R. O., (1983), “Effect of fly ash on freshly mixed concrete”, Concrete International, 5 (10), 50–52.
- [42]Langan B. W., Weng K., Ward M. A., (2002), “Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement”, Cement and Concrete Research, 32 (7), 1045–1051.

- [43] Tokyay M., (1988), “Effects of three Turkish fly ashes on the heat of hydration of PC-FA pastes”, *Cement and Concrete Research*, 18 (6), 957–960.
- [44] Thomas M. D. A., Mukherjee P. K., Sato J. A., Everitt M. F., (1995), “Effect of Fly Ash Composition on Thermal Cracking in Concrete”, *Special Publication*, 153, 81–98.
- [45] Oner A., Akyuz S., Yildiz R., (2005), “An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete”, *Cement and Concrete Research*, 35, 1165–1171.
- [46] Kovacs R., (1975), “Effect of the Hydration Products on The Properties of Fly-Ash Cement”, *Cement and Concrete Research*, 5, 73–82.
- [47] Kocak Y., Nas S., (2014), “The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristics of blended cements”, *Construction and Building Materials*, 73, 25–32.
- [48] Saha A. K., (2018), “Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete”, *Sustainable Environment Research*, 28 (1), 25–31.
- [49] Chia K. S., Zhang M. H., (2002), “Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete”, *Cement and Concrete Research*, 32 (4), 639–645.
- [50] Chousidis N., Rakanta E., Ioannou I., Batis G., (2015), “Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash”, *Construction and Building Materials*, 101, 810–817.
- [51] Nişanyan S., (2009), “Sözlerin soyağacı : çağdaş Türkçenin etimolojik sözlüğü”, 1. Baskı, Everest Yayınları.
- [52] Aköz F., (2011), “Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonuna Neden Olan Faktörler ve Alınacak Önlemler”, *Korozyon*, 19 (1-3), 22–28.
- [53] ASTM, (2004), “Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing”, ASTM G15, American Society for Testing and Materials.
- [54] Erdoğan Ş., (2003), “Betonda Donatı Korozyonunun Ölçümü ve İrdelenmesinde Yaygın Olarak Kullanılan Yöntemler ve Teknikler”, 5. Ulusal Beton Kongresi, 247–259, İstanbul, Türkiye, 1-3 Ekim.
- [55] Akman S. M., (1992), “Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi”, İ.T.Ü. Matbaası.
- [56] Poursaei A., Hansson C. M., (2007), “Reinforcing steel passivation in mortar and pore solution”, *Cement and Concrete Research*, 37 (7), 1127–1133.
- [57] C. M. Hansson, A. Poursaei, S. J. Jaffer, (2007), “Corrosion of reinforcing bars in concrete”, *The Masterbuilder*.

- [58] Mehta P. K., Monteiro P. J. M., (2006), “Concrete: microstructure, properties, and materials”, 3. Baskı, McGraw-Hill Professional.
- [59] Fang C., Lundgren K., Chen L., Zhu C., (2004), “Corrosion influence on bond in reinforced concrete”, *Cement and Concrete Research*, 34 (11), 2159–2167.
- [60] Broomfield J. P., (1997), “Corrosion of Steel in Concrete”, 2. Baskı, Taylor & Francis.
- [61] Aköz F., Çakır Ö., (2014), “Betonarme Korozyonu”, *Hazır Beton*, 124, 70–85.
- [62] Khan M. U., Ahmad S., Al-Gahtani H. J., (2017), “Chloride-Induced Corrosion of Steel in Concrete: An Overview on Chloride Diffusion and Prediction of Corrosion Initiation Time”, *International Journal of Corrosion*, 2017, 1-9.
- [63] Pedferri P., Bertolini L., Elsener B., Redaelli E., Polder R. B., (2013), “Corrosion of Steel in Concrete - Prevention, Diagnosis, Repair”, 2. Baskı, Wiley-VCH.
- [64] ACI, (2001), “Protection of Metals in Concrete Against Corrosion”, ACI 222R, American Concrete Institute.
- [65] Choi Y. S., Kim J. G., Lee K. M., (2006), “Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete”, *Corrosion Science*, 48 (7), 1733–1745.
- [66] TSE, (2000), “Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları”, TS 500, Türk Standartları Enstitüsü.
- [67] ACI, (2014), “Building Code Requirements for Structural Concrete”, ACI 318R, American Concrete Institute.
- [68] Lopez-Calvo H. Z., Montes-García P., Jiménez-Quero V. G., Gómez-Barranco H., Bremner T. W., Thomas M. D. A., (2018), “Influence of crack width, cover depth and concrete quality on corrosion of steel in HPC containing corrosion inhibiting admixtures and fly ash”, *Cement and Concrete Composites*, 88, 200–210.
- [69] Kim Y. Y., Kim J. M., Bang J. W., Kwon S. J., (2014), “Effect of cover depth, w/c ratio, and crack width on half cell potential in cracked concrete exposed to salt sprayed condition”, *Construction and Building Materials*, 54, 636–645.
- [70] Şahmaran M., Yaman İ. Ö., (2008), “Influence of transverse crack width on reinforcement corrosion initiation and propagation in mortar beams”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35 (3), 236–245.
- [71] Scott A., Alexander M. G., (2007), “The influence of binder type, cracking and cover on corrosion rates of steel in chloride-contaminated concrete”, *Magazine of Concrete Research*, 59 (7), 495–505.

- [72] Andrade C., Buják R., (2013), “Effects of some mineral additions to Portland cement on reinforcement corrosion”, *Cement and Concrete Research*, 53, 59–67.
- [73] Li H., Fan Z., Li P., (2015), “Influence of Mineral Admixtures on Corrosion Rate of Reinforced Steel in Concrete”, 711, 430–433.
- [74] Ehtesham H. S., Rasheeduzzafar, (1995), “Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete”, *ACI Materials Journal*, 91 (3), 264-272.
- [75] Otieno M., Beushausen H., Alexander M., (2016), “Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete - Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments”, *Cement and Concrete Research*, 79, 373–385.
- [76] ASTM, (2015), “Standart Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”, ASTM C876, American Society for Testing and Materials.
- [77] Frølund T., Klinghoffer O., Sørensen H. E., (2003), “Pros and Cons of Half-cell Potentials and Corrosion Rate Measurements”, *Structural Faults + Repairs International Conference*, 1–11, London, UK, 1-3 Temmuz.
- [78] Haque M. N., Kawamura M., (1992), “Carbonation and Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement in Fly Ash Concretes”, *ACI Materials Journal*, 89 (1), 41–48.
- [79] Tuutti K., (1982), “Corrosion of Steel in Concrete”, *Swedish Cement and Concrete Research Institute*.
- [80] Andrade C., Gonzalez J. A., (1978), “Quantitative measurements of corrosion rate of reinforcing steels embedded in concrete using polarization resistance measurements”, *Materials and Corrosion/Werkstoffe und Korrosion*, 29 (8), 515–519.
- [81] Andrade C., Alonso C., (2005), “Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method”, *Materials and Structures*, 37, 623–643.
- [82] Hornbostel K., Larsen C. K., Geiker M. R., (2013), “Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review”, *Cement and Concrete Composites*, 39, 60–72.

ÖZGEÇMİŞ

Ömer KARADAĞ 1992 yılında İstanbul’da doğdu. 2010 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 2015 yılında başarıyla tamamladıktan sonra 2016 yılında yüksek lisans eğitimine Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Deprem ve Yapı Mühendisliği programında başladı.

EKLER

Ek A: Korozyon Ölçüm Sonuçlarının Tablo Halinde Sunumu

Tablo A1.1: KONT60 numunelerinin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT60-1	-359	-393	-406	-434	-445	-460	-447	-460
KONT60-2	-405	-393	-567	-565				
KONT60-3	-304	-221	-313	-319	-248	-154	-195	-356
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT60-1 (ÇT)	-411	-479	-505	-523	-522	-528	-529	-535
KONT60-2 (ÇT)	-382	-353	-592	-594				
KONT60-3 (ÇT)	-299	-287	-381	-422	-426	-424	-445	-447

Tablo A1.2: KONT60 numunelerinin 9-15. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT60-1	-478	-504	-474	-511	-410	-421	-444
KONT60-2							
KONT60-3	-415	-442	-430	-410	-330	-348	-357
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT60-1 (ÇT)	-539	-540	-528	-543	-525	-528	-521
KONT60-2 (ÇT)							
KONT60-3 (ÇT)	-452	-443	-456	-472	-469	-460	-478

Tablo A1.3: KONT60 numunelerinin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT60-1	1,4	1,6	2,4	2	3,2	6,3	3,7	4,9
KONT60-2	1,1	1,8	13,9	19,7				
KONT60-3	1	1	1	0,9	0,7	0,3	0,6	2,8
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT60-1 (ÇT)	1,5	4,1	5,1	9	3,5	9	4,9	9
KONT60-2 (ÇT)	1,4	1,8	16,4	27,4				
KONT60-3 (ÇT)	1,5	0,6	2,3	4	2,4	2,8	2,5	3,2

Tablo A1.4: KONT60 numunelerinin 9-15. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT60-1	2,5	4,9	4,5	3,1	2,4	3,5	3,7
KONT60-2							
KONT60-3	2	4,9	1,7	2,5	1,5	1,1	2,4
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT60-1 (ÇT)	4,6	7,5	6,4	4,1	4,3	5	7,8
KONT60-2 (ÇT)							
KONT60-3 (ÇT)	3,5	2,6	2,8	2,7	4,2	2,9	3,3

Tablo A1.5: KONT50 numunelerinin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT50-1	-174	-101	-272	-285	-315	-314	-319	-261
KONT50-2	-340	-429	-486	-493	-489	-493	-497	-506
KONT50-3	-259	-285	-324	-329	-346	-388	-319	-356
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT50-1 (ÇT)	-359	-455	-483	-486	-485	-496	-500	-504
KONT50-2 (ÇT)	-367	-487	-515	-524	-517	-521	-521	-521
KONT50-3 (ÇT)	-210	-305	-327	-384	-388	-459	-366	-447

Tablo A1.6: KONT50 numunelerinin 9-15. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT50-1	-405	-457	-415	-399	-378	-365	-341
KONT50-2	-547	-531	-533	-553	-514	-476	-533
KONT50-3	-448	-386	-287	-406	-296	-307	-298
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT50-1 (ÇT)	-505	-536	-496	-501	-448	-458	-495
KONT50-2 (ÇT)	-515	-521	-521	-531	-521	-547	-535
KONT50-3 (ÇT)	-459	-419	-466	-363	-448	-426	-464

Tablo A1.7: KONT50 numunelerinin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT50-1	0,6	0,3	0,9	1	1,1	0,6	0,8	1,2
KONT50-2	1,9	2,9	8,3	4,2	4,1	4	5,1	3,9
KONT50-3	0,8	1,3	1,1	1,3	1,7	2,8	1,2	1,8
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT50-1 (ÇT)	0,9	4,3	3,3	4,7	4,7	5,3	4,9	4,2
KONT50-2 (ÇT)	1,1	3,4	4,7	3,9	3,7	2,7	5,2	4,9
KONT50-3 (ÇT)	0,9	1,4	2,3	1,4	2,4	2,6	1,5	2,3

Tablo A1.8: KONT50 numunelerinin 9-15. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT50-1	1,3	4	0,8	1,2	1,5	0,7	1
KONT50-2	3,1	4,5	4,7	4,7	5,9	4,7	4,5
KONT50-3	4,4	2,5	1,3	3,4	1,2	1,4	1,6
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT50-1 (ÇT)	7,6	2,4	4,3	3,3	3,1	3,1	2,4
KONT50-2 (ÇT)	4,7	6,6	3,8	3,2	4,7	4,1	4,3
KONT50-3 (ÇT)	4,7	2,8	1,8	1	3,1	2	3,9

Tablo A1.9: KONT40 numunelerinin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT40-1	-148	-217	-488	-495	-493	-518	-526	-521
KONT40-2	-107	-224	-289	-318	-270	-278	-305	-309
KONT40-3	-167	-385	-448	-461	-465	-484	-496	-489
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT40-1 (ÇT)	-267	-398	-443	-482	-481	-515	-513	-500
KONT40-2 (ÇT)	-265	-412	-468	-458	-475	-497	-492	-489
KONT40-3 (ÇT)	-151	-404	-424	-438	-430	-425	-405	-460

Tablo A1.10: KONT40 numunelerinin 9-15. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT40-1	-528	-527	-529	-518	-535	-510	-529
KONT40-2	-321	-345	-312	-312	-323	-307	-330
KONT40-3	-410	-411	-400	-467	-374	-413	-366
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT40-1 (ÇT)	-509	-508	-489	-512	-504	-509	-515
KONT40-2 (ÇT)	-481	-481	-480	-483	-480	-471	-477
KONT40-3 (ÇT)	-434	-430	-347	-381	-354	-346	-350

Tablo A1.11: KONT40 numunelerinin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT40-1	0,1	0,8	4,7	3,8	4,9	2,9	5,7	6
KONT40-2	0,6	0,6	3,6	1	0,7	0,8	0,8	0,8
KONT40-3	0,7	3,6	1	3,7	3,4	3,1	3,3	3,6
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
KONT40-1 (ÇT)	1,1	0	2,7	4,3	5,3	3,4	7,7	5,1
KONT40-2 (ÇT)	0,9	2,3	3,5	3,1	3,7	4,3	4,5	4,2
KONT40-3 (ÇT)	1,3	3,4	5,5	4,7	6,6	6,7	3,5	5,1

Tablo A1.12: KONT40 numunelerinin 9-15. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT40-1	4,3	3,2	4,2	3,8	3,3	4,4	5,4
KONT40-2	1,1	1	1	1	1	0,8	1
KONT40-3	2,5	6,2	1,7	3,8	3,3	2,5	2,8
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
KONT40-1 (ÇT)	6,3	5,1	4,4	3,1	5,8	4,3	6,1
KONT40-2 (ÇT)	4,5	3,3	4,7	4,2	3,4	3,5	4,1
KONT40-3 (ÇT)	3,1	4,2	3,4	4,1	2,3	3	3,1

Tablo A1.13: UBEL60 numunelerinin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL60-1	-456	-558	-545	-527	-545	-535	-534	-546
UBEL60-2	-473	-547	-595	-522	-512	-542	-522	-509
UBEL60-3	-396	-473	-539	-529	-543	-537	-533	-536
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL60-1 (ÇT)	-455	-517	-514	-510	-518	-502	-506	-506
UBEL60-2 (ÇT)	-466	-576	-599	-530	-535	-526	-533	-513
UBEL60-3 (ÇT)	-396	-431	-534	-497	-455	-423	-397	-371

Tablo A1.14: UBEL60 numunelerinin 9-15. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL60-1	-544	-540	-558	-575	-592	-594	-574
UBEL60-2	-493	-501	-523	-541	-610	-602	-561
UBEL60-3	-537	-545	-553	-548	-559	-562	-557
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL60-1 (ÇT)	-509	-511	-549	-554	-585	-579	-558
UBEL60-2 (ÇT)	-532	-575	-563	-551	-588	-587	-554
UBEL60-3 (ÇT)	-393	-437	-477	-459	-539	-558	-507

Tablo A1.15: UBEL60 numunelerinin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL60-1	1,8	1,4	4,3	4,5	4,7	4,9	4,4	4,7
UBEL60-2	3	2,1	7,9	8,2	4,3	5,4	2,1	9,9
UBEL60-3	1,6	1,8	6,8	4,9	4,7	8,1	4,9	9
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL60-1 (ÇT)	2,7	3,1	5,2	5,2	5,4	8,3	4,9	4,2
UBEL60-2 (ÇT)	2,7	3,5	7,7	7,6	7,4	6,6	6,7	4,9
UBEL60-3 (ÇT)	1,4	4,5	3,9	5,2	3,2	3,6	1,8	2,2

Tablo A1.16: UBEL60 numunelerinin 9-15. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL60-1	2,3	3,5	5,8	3,5	7,6	7,6	6,5
UBEL60-2	4,3	4,1	5,2	8,7	3,1	5,1	5,2
UBEL60-3	8,2	5,1	7,1	9,9	5,1	6,7	5,4
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL60-1 (ÇT)	4,7	7	7,6	9	7,6	9,8	8,2
UBEL60-2 (ÇT)	4,6	7,8	4,5	6,7	6,3	9	7,6
UBEL60-3 (ÇT)	2,2	2,5	2,8	4,7	4,1	4,1	3,8

Tablo A1.17: UBEL50 numunelerinin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL50-1	-248	-334	-418	-451	-460	-457	-470	-500
UBEL50-2	-269	-313	-385	-407	-413	-432	-453	-470
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL50-1 (ÇT)	-315	-440	-500	-506	-508	-511	-513	-511
UBEL50-2 (ÇT)	-259	-342	-412	-415	-411	-420	-446	-466

Tablo A1.18: UBEL50 numunelerinin 9-15. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL50-1	-498	-508	-492	-493	-473	-475	-555
UBEL50-2	-490	-575	-547	-524	-578	-533	-567
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL50-1 (ÇT)	-506	-521	-528	-528	-518	-512	-574
UBEL50-2 (ÇT)	-474	-566	-514	-523	-524	-484	-533

Tablo A1.19: UBEL50 numunelerin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL50-1	1,4	0	4,1	4,2	4,5	5,8	2,6	4,5
UBEL50-2	0,5	1	2,9	3,6	4,1	3,7	4,5	3,3
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL50-1 (ÇT)	2	0	6,9	3,6	7	5,1	5,6	5,8
UBEL50-2 (ÇT)	0,6	0	2,6	3	2,4	2,3	2,8	2,5

Tablo A1.20: UBEL50 numunelerinin 9-15. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL50-1	4,3	3,9	3,5	4,7	3,4	4,3	5,7
UBEL50-2	7,2	3,8	5,1	4,5	5,4	6	20,1
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL50-1 (ÇT)	7,6	6,1	7,8	6,5	7,4	7,6	8
UBEL50-2 (ÇT)	2,7	4,7	5,4	2,9	3,8	3,7	6,4

Tablo A1.21: UBEL40 numunelerin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL40-1	-219	-293	-403	-414	-396	-415	-411	-456
UBEL40-2	-176	-270	-395	-405	-410	-422	-456	-461
UBEL40-3	-232	-296	-375	-409	-394	-384	-392	-406
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL40-1 (ÇT)	-245	-356	-386	-415	-417	-443	-446	-484
UBEL40-2 (ÇT)	-217	-361	-466	-475	-494	-499	-524	-529
UBEL40-3 (ÇT)	-77	-271	-391	-382	-424	-418	-440	-459

Tablo A1.22: UBEL40 numunelerinin 9-15. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL40-1	-495	-577	-400	-397	-363	-368	-562
UBEL40-2	-592	-594	-564	-602	-565	-322	-581
UBEL40-3	-418	-442	-391	-395	-372	-361	-396
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL40-1 (ÇT)	-513	-606	-428	-408	-395	-389	-570
UBEL40-2 (ÇT)	-608	-615	-589	-626	-598	-432	-607
UBEL40-3 (ÇT)	-468	-488	-470	-476	-457	-442	-467

Tablo A1.23: UBEL40 numunelerin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL40-1	0,8	0,4	2	2,2	2,1	2,1	1,7	1,9
UBEL40-2	0,5	0	1,7	1,8	1,8	2,4	2,9	2,8
UBEL40-3	0,5	0,5	1,8	1,9	2	1,5	2,1	1,7
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UBEL40-1 (ÇT)	0,5	0	1,7	2,9	2,4	2,3	2,8	3,6
UBEL40-2 (ÇT)	0,5	0	3,2	3,7	4,1	4,9	3,9	4,3
UBEL40-3 (ÇT)	0,5	1,3	2	1,9	3,9	1,1	2,6	3

Tablo A1.24: UBEL40 numunelerin 9-15. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL40-1	2,6	4,2	2,4	2,2	1,6	1,8	4,3
UBEL40-2	3,6	6	3,8	3,1	8,3	1,6	6,8
UBEL40-3	2,9	2,9	2	2,3	2,8	1,7	3,4
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15
UBEL40-1 (ÇT)	4,5	5,8	2,8	2,6	1,7	2,1	5,7
UBEL40-2 (ÇT)	4,3	8,3	7	6,2	9	3	12,2
UBEL40-3 (ÇT)	2,3	6	4,5	4	6,4	3,6	3,8

Tablo A1.25: UHES60 numunelerin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES60-1	-273	-299	-336	-306	-290	-402	-404	-407
UHES60-2	-246	-198	-205	-195	-278	-270	-376	-269
UHES60-3	-265	-370	-407	-396	-439	-478	-466	-475
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES60-1 (ÇT)	-300	-431	-455	-451	-447	-469	-405	-464
UHES60-2 (ÇT)	-186	-250	-399	-397	-422	-398	-382	-382
UHES60-3 (ÇT)	-407	-491	-501	-515	-505	-508	-502	-499

Tablo A1.26: UHES60 numunelerinin 9-16. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES60-1	-413	-420	-414	-411	-369	-360	-454	-550
UHES60-2	-260	-317	-319	-340	-280	-302	-423	-482
UHES60-3	-468	-547	-541	-526	-490	-468	-541	-544
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES60-1 (ÇT)	-468	-508	-487	-485	-510	-517	-503	-528
UHES60-2 (ÇT)	-392	-411	-414	-418	-438	-455	-489	-518
UHES60-3 (ÇT)	-499	-524	-504	-515	-518	-523	-528	-540

Tablo A1.27: UHES60 numunelerin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu A/cm^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES60-1	1	0	2	1	1,6	1,3	2,6	2,3
UHES60-2	1	0,3	1,2	1,2	1,8	1,4	1,4	1,1
UHES60-3	0	0,1	2,8	3,6	3,1	4,1	3,7	3,1
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES60-1 (ÇT)	0,6	0,1	2,8	2,6	3,3	3,5	1,8	4,7
UHES60-2 (ÇT)	0	0	3,4	4,1	3,6	3,9	4,5	4,1
UHES60-3 (ÇT)	0	1,4	6,7	6,4	9,9	6,3	7,5	9

Tablo A1.28: UHES60 Numunelerin 9-16. Ölçümdeki i_{corr} Sonuçları [$\mu A/cm^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES60-1	2,1	2,7	2	2,7	2,1	2	4,1	3,4
UHES60-2	1,5	1,5	1,9	2,3	1,9	1,3	3,1	4,1
UHES60-3	4,9	5,2	5,4	6,2	2,5	2,6	4,2	2,9
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES60-1 (ÇT)	5,8	5,4	4,9	4,1	3,2	8,2	8,2	3,7
UHES60-2 (ÇT)	5,2	5,2	4,9	3,2	3	2,7	4,9	4,3
UHES60-3 (ÇT)	7	8,2	8,2	9	8,9	9	5,9	9,2

Tablo A1.29: UHES50 numunelerin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES50-1	-113	-202	-335	-322	-323	-330	-293	-305
UHES50-2	-19	-47	-54	-3	-39	-154	-122	-105
UHES50-3	-56	-102	-149	-67	-52	-55	-55	-102
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES50-1 (ÇT)	-254	-384	-428	-436	-454	-462	-465	-472
UHES50-2 (ÇT)	-278	-405	-443	-458	-456	-464	-457	-452
UHES50-3 (ÇT)	-204	-386	-440	-432	-447	-440	-445	-442

Tablo A1.30: UHES50 numunelerinin 9-16. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES50-1	-320	-312	-303	-280	-257	-243	-292	-335
UHES50-2	-120	-118	-118	-145	-86	-105	-264	-252
UHES50-3	-113	-90	-118	-104	-56	-36	-199	-268
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES50-1 (ÇT)	-466	-377	-471	-459	-373	-457	-465	-463
UHES50-2 (ÇT)	-452	-465	-463	-477	-466	-463	-474	-479
UHES50-3 (ÇT)	-442	-453	-426	-416	-410	-417	-466	-476

Tablo A1.31: UHES50 numunelerin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu A/cm^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES50-1	0,3	0	1,8	1,3	1,3	1,2	1,2	1,7
UHES50-2	1,3	0,9	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8
UHES50-3	0,9	0	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES50-1 (ÇT)	0,9	0	4,9	5,4	3,9	4,7	5,4	3,8
UHES50-2 (ÇT)	0,8	0	4,7	4,5	3,1	4	3,8	5,4
UHES50-3 (ÇT)	0,5	4,9	2,3	3,9	4,7	3,8	4,5	3,9

Tablo A1.32: UHES50 numunelerinin 9-16. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu A/cm^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES50-1	1,4	1,4	1,2	1,3	1,1	1	1,4	1,5
UHES50-2	0,8	0,8	0,9	0,7	0,8	0,8	1,2	1,9
UHES50-3	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	1,3	1,7
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES50-1 (ÇT)	6,4	0,6	6,7	5,4	0,2	4,5	4,5	4,1
UHES50-2 (ÇT)	4,7	8,2	4,7	8,3	6,7	6,7	12,2	8,2
UHES50-3 (ÇT)	7	5,8	4,5	7,6	4,3	7	5,8	4,9

Tablo A1.33: UHES40 numunelerinin 1-8. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES40-1	15	-19	-29	-39	-39	-41	-42	-46
UHES40-2	-151	-226	-250	-241	-229	-202	-267	-260
UHES40-3	12	-21	-3	-15	-33	-26	-8	-19
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES40-1 (ÇT)	15	-55	-16	-16	-15	-8	-5	-10
UHES40-2 (ÇT)	-30	-40	-338	-320	-276	-277	-269	-288
UHES40-3 (ÇT)	-69	-107	-133	-236	-240	-292	-294	-289

Tablo A1.34: UHES40 numunelerinin 9-16. ölçümdeki E_{corr} sonuçları [mV].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES40-1	-52	-39	-34	-49	-29	-43	-35	-55
UHES40-2	-238	-232	-228	-226	-187	-167	-210	-210
UHES40-3	-25	-87	-156	-122	-145	-99	-157	-137
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES40-1 (ÇT)	-83	-106	-129	-128	-188	-144	-153	-234
UHES40-2 (ÇT)	-238	-214	-223	-243	-234	-228	-258	-255
UHES40-3 (ÇT)	-298	-316	-274	-280	-282	-285	-288	-276

Tablo A1.35: UHES40 numunelerinin 1-8. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES40-1	0,3	0,8	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6
UHES40-2	0,5	0,5	0,7	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8
UHES40-3	0,4	0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Numune / Ölçüm	1	2	3	4	5	6	7	8
UHES40-1 (ÇT)	0	0	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5
UHES40-2 (ÇT)	0,4	0	2,1	2,5	1,6	1,4	0,9	2,1
UHES40-3 (ÇT)	0,5	0	0,4	0,7	0,7	1,5	1,2	1,5

Tablo A1.36: UHES40 numunelerinin 9-16. ölçümdeki i_{corr} sonuçları [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$].

Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES40-1	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5
UHES40-2	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9
UHES40-3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6
Numune / Ölçüm	9	10	11	12	13	14	15	16
UHES40-1 (ÇT)	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,9
UHES40-2 (ÇT)	2,4	2,3	1,7	1,4	2,8	2	1,7	2,5
UHES40-3 (ÇT)	2,1	3,4	2,3	1,7	2,3	2,1	2,6	1,1