

DONATI KOROZYONUNUN GERÇEK DENİZ ORTAMINDA İNCELENMESİ*

Ahsanollah Beglarigale¹, Hüseyin Yiğiter², Halit Yazıcı³
Ahmet Hilmi Aytaç⁴, Hüseyin Levent Sevin⁵

Özet

Deniz suyu etkisine maruz betonarme yapılar önemli durabilite problemleri ile karşı karşıya kalmaktadır. Betonun bozulma sürecinin ve betonarme donatısının korozyon sürecinin doğru değerlendirilmesi deniz yapılarının servis ömrü açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, CEM I çimentosu ile üretilmiş ve çimento miktarının %20 oranında uçucu kül ikamesi ile hazırlanmış iki farklı C25/30 sınıfı beton karışımının özel bir platforma yerleştirilerek deniz ortamındaki performansı incelenmiştir. Test sonuçları, uçucu kül kullanımının betonun elektriksel direnç değerlerini belirgin bir şekilde arttırdığını ve klor geçirimsizlik değerlerini belirgin şekilde azalttığını göstermiştir. Islanma-kuruma çevrimleri sonunda eğilme ve basınç dayanımlarının hâlâ ıslanma-kuruma çevrimleri öncesi dayanım değerlerinden büyük olduğu tespit edilmiştir. Pas payı küçük olan örneklerde donatı korozyonu hasarlarının oluştuğu, uçucu kül içeren betonlardaki donatıların korozyon akım yoğunluğu değerlerinin düşük mertebelerde kaldığı tespit edilmiştir.

1. GİRİŞ

Bilindiği üzere donatı korozyonu olayında etkili birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları pas payı tabakasının kalınlığı, beton kalitesi, donatı çapı ve cinsi, betonda mineral katkı kullanımı, donatı aralıkları, betonun geçirgenliği, betonun nem içeriği, çevreden gelen agresif saldırıların tipi ve şiddeti, betonun kimyasal madde (klor, sülfat vb.) içeriği, eleman boyutları, kullanılan çimentonun kompozisyonu vb. olarak sıralanabilir.

Korozyon önlemleri hakkında standart ve şartnamelerde pas payı kalınlığı, beton sınıfı ve çimento dozajı için en küçük, su/çimento oranı ve klorür içeriği için ise en yüksek değerler tanımlanmıştır [1-5]. Öte yandan betonda kullanılan mineral katkıları, betonun donatıya karşı fiziksel ve kimyasal koruma özelliklerini etkileyerek korozyon davranışını değiştirir. Zayıf bir bileşen olan kireç kimyasal olarak bağlanarak suda çözünmesi engellenir. Uygun dozajda kullanılan puzolanik malzemeler ile daha yoğun ve geçirimsiz bir iç yapı elde edilir. Geçirimsizliğin azalması ile fiziksel koruma sağlayan bariyer etkisi daha yüksek mertebede bir koruma sağlar.

Investigation of Rebar Corrosion Under Real Sea Environment

Reinforced concrete structures are exposed to important durability problems under sea water environment. Evaluation of concrete degradation and rebar corrosion has significant importance on the service life of the marine structures. The performance of C25/30 class concrete with and without fly ash incorporation were evaluated under sea water exposure. Test results showed that 20% fly ash incorporation increased the resistivity and decreased the rapid chloride permeability of concrete. Compressive and flexural strengths of the concretes which were subjected to sea water by wetting-drying cycles were still greater than control ones. Cracks and damage were observed at the specimens with thin concrete cover. On the other hand, fly ash incorporation lowered the corrosion current density values.

1) ahsan.beglari@okan.edu.tr, ahsan.beglari@gmail.com, İstanbul Okan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul 2, 3) huseyin.yigiter@deu.edu.tr, halit.yazici@deu.edu.tr, Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir 4, 5) a.hilmiaytac@bursabeton.com.tr, hl.sevin@bursabeton.com.tr Bursa Beton AŞ, Bursa

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

Diğer yandan ikinci mekanizma olarak, puzolanik reaksiyonlar ile bağlanan kireç, betonun boşluk suyundaki alkaliniteyi azaltır, pH seviyesi düşer. Kimyasal koruma yüksek pH ile sağlandığından mineral katkıların kullanımı ile kimyasal koruma seviyesi azalmış olur.

Sunulan çalışmada, mineral katkı olarak uçucu kül içeren ve içermeyen betonlara gömülü çelik donatıların korozyon gelişimleri ve donatı korozyonu ile doğrudan ilgili geçirimsizlik özellikleri gerçek deniz ortamında ıslanma-kuruma etkisi altında incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Kullanılan Malzemeler

Portland çimentosunun (CEM I 42.5 R) fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Deneysel programda çimento bağlayıcılı betonun yanında çimento yerine %20 uçucu kül (UK) ikamesi yapılan beton da üretilmiştir. Orhaneli Termik Santrali'nden temin edilen uçucu külün özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Kullanılan UK, ASTM C618'e göre %10'dan daha düşük CaO oranına sahip olduğundan düşük kireçli sınıfta yer aldığı söylenebilir.

Tablo 1. Portland çimentosunun (CEM I 42.5 R) özellikleri.

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	KK (%)	Ç.K* (%)	Blaine (cm ² /g)	P.B.** (sa:dk)	P.S.*** (sa:dk)
19	5,61	3	62	0,9	3	0,6	0,7	4,8	1,09	4780	03:05	04:10

* Çözünmeyen Kalıntı ** Priz başlangıcı *** Priz sonu

Tablo 2. Orhaneli uçucu külünün özellikleri.

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	Kızdırma kaybı (%)	Serbest CaO (%)	Özgül ağırlık	Blaine (cm ² /g)	P.A.i.* (%)
51,47	25,08	10,89	0,88	4,38	0,73	0,10	2,21	3675	88,2

* Puzolanik aktivite indeksi

Çalışmada tek kaynaktan sağlanan kırma kireç taşı kullanılmıştır. Beton karışımlarında üç farklı tane büyüklüğüne sahip agrega kullanılmıştır. Ayrıca, beton karışımlarında TS EN 934-2 Standardı'na uygun modifiye polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı (SA) katkı (katı madde oranı %25,66, yoğunluğu 1,090 ve pH değeri 5,90) kullanılmıştır.

Betonarme örneklerde kullanılan donatılar TS 708 Beton Çelik Çubukları Standardı'na göre BÇ III sınıfı (S420) çelik donatılardır [6]. Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılan çekme deneyi sonuçlarına göre 6 numuneden elde edilen ortalama akma mukavemeti 478 MPa,

ortalama çekme mukavemeti 591 MPa ve ortalama kopma uzaması ise %22,8'dir.

2.2. Beton Karışımları

Hazır beton sektöründe yaygın olarak kullanılan normal dayanım sınıfı olan C25/30 beton dizaynı yapılmıştır. Betonlarda bağlayıcı dozajı 350 kg/m³ olup su/bağlayıcı madde oranı (s/b) 0,56 olarak seçilmiştir. Ayrıca, beton karışımında %20 oranında çimento yerine uçucu kül ikamesi ile uçucu kül içeren beton karışımı tasarlanmıştır. C25/30 sınıfı uçucu kül kullanılan betonda s/b oranı 0,56 olup su/çimento oranı (s/ç) 0,70'dir. Betonlara ait karışım oranları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. C25/30 sınıfı betonların karışım oranları.

Karışım	Çimento	Uçucu kül	Su	Kum	Agrega 5/12	Agrega 12/22	s/ç	s/b	SA, %	Hava, %	Çökme, cm
CEMI	350	-	196	906	398	491	0,56	0,56	0,10	2,0	20
CEMI-F	280	70	196	889	391	481	0,70	0,56	0,10	1,8	21

2.3. İslanma-Kuruma Çevrimleri

Çalışmanın en önemli bölümlerinden biri örneklerin deniz suyuna güvenli ve düzenli bir şekilde maruz kalmalarının sağlanmasıdır. Bu amaçla yüksek kapasiteli (çok sayıda farklı örnek alan) bir platform Bursa Beton ile birlikte projelendirilmiş, numunelerin ıslanma-kuruma çevrimlerini otomatik olarak yapacak bir daldırma-çıkarma düzeneği hazırlanmıştır. Platform fotoğrafları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 1). Deniz ortamı olarak Gemlik'teki Rodaport Limanı seçilmiştir. Beton örneklerin ıslanması kısa sürede, kuruması ise daha uzun sürede gerçekleştiğinden, ıslanma-kuruma çevrimleri örneklerin tamamen otomatik olarak 12 saat süre ile denize daldırılması ve 24 saat su dışında bekletilmesi, böylece bir çevrimin 36 saat sürmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. İslanma-kuruma platformu ve deniz ortamı

Beton karışımlarının dayanım gelişimleri 15 cm ayrıtlı küp numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Beton numuneler istenen dayanım mertebesine ulaşıncaya kadar Bursa Beton Laboratuvarında standart kür havuzunda saklanmıştır. Dayanım gelişimini tamamlayan numuneler kür havuzundan çıkarılıp daha sonra havada bekletilmiştir. Dolayısıyla farklı bağlayıcıya sahip iki karışımın benzer dayanıma sahip olmaları için gerekli su kürü süreleri değişiklik göstermiştir. Deniz suyu etkisine maruz bırakılacak prizmatik numuneler ise küp numuneler ile aynı kür geçmişiine sahiptir.

2.4. Basınç ve Eğilme Dayanımları

İki karışımdan alınan 15 cm ayrıtlı beton küp numuneler deney yaşına kadar standart su kürüne tabi tutulmuştur. Beton

numunelere değişik yaşlarda basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Basınç deneyleri TS EN 12390-3 Standardı'na göre yapılmıştır. Özellikle uçucu kül içeren betonların dayanım gelişiminin nispeten yavaş olması nedeni ile örnekler benzer dayanımlara gelinceye kadar dayanım gelişimi takip edilmiştir. Deniz suyuna ıslanma-kuruma şeklinde maruz kalan betonların yıpranma süreci boyunca eğilme ve basınç dayanımı değişimleri takip edilmiş, bu amaçla prizmatik numuneler (75x75x285 mm) üzerinde eğilme dayanımı deneyi ve eğilme sonrası basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir.

2.5. Rezistivite Ölçümleri

Beton karışımlarında rezistivite (elektriksel direnç) ölçümleri Venner prob kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Betonun elektriksel direnci ölçülürken dıştaki iki proba bir akım uygulanıp, içteki iki prob arasındaki potansiyel fark ölçülmektedir. Beton rezistivitesi $\rho = 2 @ aV / I$ formülü ile hesaplanmaktadır. Burada ρ rezistivite, a probalar arası mesafe, V ölçülen potansiyel ve I uygulanan akımdır. Çalışma kapsamında elektriksel direnç ölçümü deneyleri kür sürecini tamamlayan 15x15x7,5 cm boyutlu kare prizma örnekler üzerinde yapılmıştır. Test sonuçları üç numunenin ortalaması şeklinde verilmiştir.

2.6. Hızlı Klor Geçirimsizlik Deneyi

İncelenen beton karışımları üzerinde ASTM C 1202 Standardı'na göre hızlı klor geçirimsizliği deneyi yapılmıştır. 100 mm çapında, 50 mm kalınlığında silindirik beton numunelerin klor geçirimsizlik değerleri belirlenmiştir [7]. Numuneler kür periyodu tamamlandıktan sonra suya doygun hâle getirilmiştir. Test sonuçları üç numunenin ortalaması şeklinde verilmiştir.

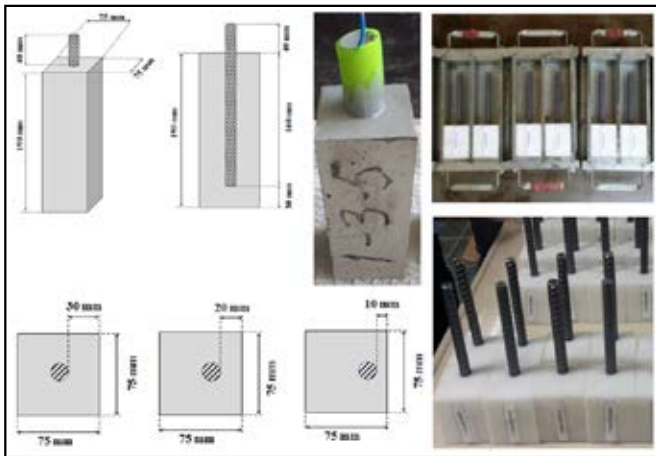
2.7. Klor İşleme Derinliği

Deniz suyu etkisine maruz kalan beton karışımlarında klor girişi ve klorür cephesinin takip edilmesi için ıslanma-kuruma çevrimleri sırasında numunelerde klorür işleme derinliği ölçümleri yapılmıştır. Otsuki'nin (1992) çalışma sonuçlarına göre yöntemde yeni kırılmış bir beton kesiti üzerine 0,1 N gümüş nitrat ($AgNO_3$) çözeltisi püskürtülerek klor işleme

derinliği tespiti yapılmaktadır [8]. Yüzeyden derinlere inildikçe klorürlerce kirlenmiş bölge gri-beyaz renk alırken, henüz klorürlerin ulaşamadığı bölge kahverengi-siyah bir renk almaktadır.

2.8. Korozyon Ölçümleri

Korozyon analizlerinin gerçekleştirileceği betonarme numuneler 75×75×190 mm boyutlarında prizmatik örneklerdir. Numuneler yatay olarak dökülmüş ve donatıların yerleştirilmesi amacıyla prizmanın üst taban bölümünde donatı yerleştirme aparatı kullanılmıştır. Betonarme örneklerin boyutları Şekil 2'de gösterilmiştir. Ayrıca, çeşitli pas payı tabakasına sahip örneklerin en kesitleri Şekil 12'de şematik olarak gösterilmiştir. Korozyon analizlerinin gerçekleştirileceği betonarme numuneler için, çelik donatılar 200 mm uzunluğunda friksiyon testeresi ile kesilmiş, kalıplara yerleştirilmeden önce hassas bir şekilde alkol ile yıkanıp temizlenmiş ve daha sonra temiz havlular üzerinde kurutulmuştur [9]. Pas payı tabakası kalınlığı 10, 20 ve 30 mm olacak şekilde özel aparatlar yardımı ile donatılar kalıplara konulmuştur (Şekil 2). Daha sonra hazırlanan beton karışımları iki kademede vibrasyon masasında kalıplara yerleştirilmiştir.



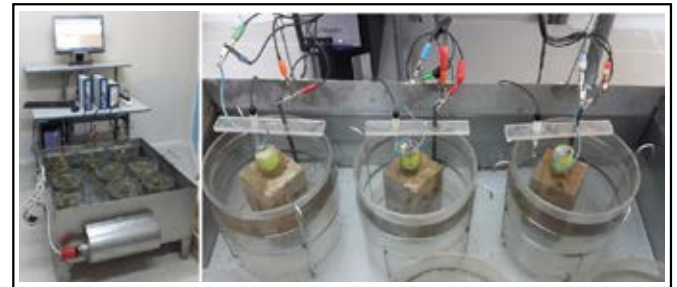
Şekil 2. Donatılı aparatların kalıplara yerleştirilmesi.

Yapılacak korozyon deneyleri için, çelik çubukların açıkta kalan kısımlarına elektriksel bağlantı kabloları takılmıştır. Beton içine gömülü çelik çubukların korozyon alanını sınırlamak ve aynı zamanda çelik çubukların açıkta kalan kısımlarında gelişecek korozyonun, ölçümleri etkilemesini engellemek amacıyla beton prizmalarının üst tabanları ve açıkta kalan çelik donatılara epoksi esaslı iki bileşenli koruyucu kaplama malzemesi (BRV SC 650-ST iki bileşenli solventsiz epoksi reçine esaslı) ile kaplama yapılmıştır.

Kaplama aşamasından sonra örnekler standart su kürüne tabi tutulmuştur. Beton karışımlarının istenen dayanım mertebelerine ulaşmaları için gerekli kür süreleri basınç dayanımları sonuçları ile belirlenmiştir. Kür periyodunu tamamlayan betonarme numuneler platforma nakledilerek ıslanma kuruma çevrimlerine maruz bırakılmıştır.

Korozyon ölçümleri üç elektrotlu sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir [10]. Çalışma elektrodu ölçüm yapılan betonarme numune, karşıt elektrot grafit, referans elektrot ise doygun kalomel elektrottur (SCE). Ölçümlerde Gamry Potentiostat/Galvanostat/ZRA sistemi kullanılmıştır. Ölçümler sırasında deney hücrelerinin ortam sıcaklığı 20 °C'dir. Deney numuneleri ölçümler başlamadan önce 12 saat süre ile su banyosunun yedek hücreleri içinde şartlandırılmıştır. Deney hücrelerindeki test çözeltisi, numunelerin ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz kaldığı gerçek deniz ortamından (Gemlik Limanı) alınan gerçek deniz suyudur. Bir başka deyişle ıslanma-kuruma ortamındaki ile aynı çözeltide test edilmiştir. Ölçümler sırasında çekilmiş bir fotoğraf Şekil 3'te verilmiştir.

Numuneler ölçüm sistemine bağlandıktan sonra öncelikle deney yapılan numunelerin açık devre potansiyelleri belirlenmiştir. Çalışma elektrodunun potansiyeli, referans elektroda göre ölçülmüş ardından ikinci aşamada numunelere doğru akım ile anodik yönde polarizasyon uygulanmıştır. Açık devre potansiyelinde ölçülen değer ± 200 mV aralığında 0,2 mV/s tarama hızı ile polarizasyon eğrileri çıkarılmıştır. Daha sonra elde edilen polarizasyon eğrisi üzerinde Tafel analizi uygulanarak beton numunelere gömülü çelik donatıların korozyon hızları belirlenmiştir. Donatı korozyonu ölçüm çalışmalarında her bir karışımın her bir pas payı tabakası kalınlığı için 10'ar adet betonarme numune kullanılmıştır.



Şekil 3. Donatılı örneklerde korozyon ölçümleri.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Basınç Dayanımları

Betonlara ait değişik yaşlardaki basınç dayanımı değerleri

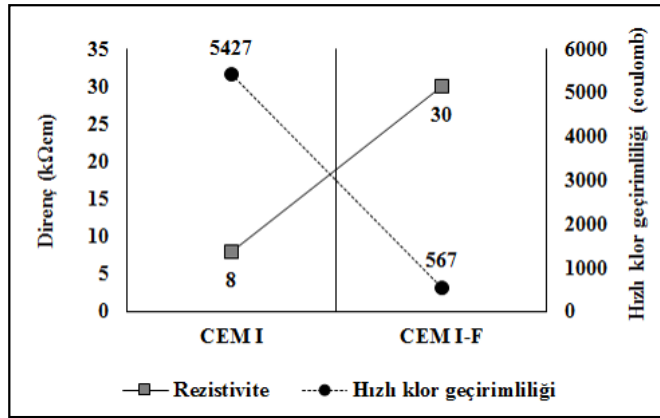
Tablo 4’te verilmiştir. Basınç dayanımı verilerine bakıldığında, beklendiği üzere zamanla dayanım değerlerinin arttığı, bu artışın uçucu küllü betonda puzolanik aktivite ile daha uzun sürdüğü söylenebilir. Uzun dönemde ise dayanımlar 40 ile 44 MPa arasında olup benzer mertebelindedir.

Tablo 4. Betonlara ait değişik yaşlardaki basınç dayanımı değerleri.

Beton yaşı, gün		2	7	14	21	28	35	42	49
Basınç Dayanımı, MPa	CEMI	20,1	34,7	38,2	39,4	41,6	41,3	43,7	-
	CEMI-F	13,4	27,9	33,6	33,9	35,8	38,8	40,2	40,9

3.2. Rezistivite ve Hızlı Klor Geçirirliği

Betonun elektriksel iletkenliği, içine gömülü donatının korozyon davranışını oldukça etkilemektedir. Bu açıdan rezistivite ölçümlerine göre yapılan korozyon risk sınıflandırması önemlidir. Şekil 4’te uçucu kül kullanımının direnç değerini belirgin bir şekilde arttırdığı görülmektedir. Bir başka deyişle korozyon riski açısından uçucu küllü ikamesi, “yüksek korozyon riski” ($\leq 10 \text{ k}\Omega\text{cm}$) kategorisinde olan CEMI betonunun rezistivite değerini “orta korozyon riski” (10 - 50 $\text{k}\Omega\text{cm}$) seviyesine çıkartabilmiştir. Hızlı klor geçirirlilik ve rezistivite (elektriksel direnç) deneyleri sonuçları arasında çok güçlü bir korelasyon olduğu anlaşılmaktadır. Uçucu kül kullanımı klor geçirirlilik değerlerini belirgin şekilde azaltmıştır (Şekil 4). Düşük klor geçirirlilik değerlerine sahip betonda korozyon gelişimlerinin daha yavaş olacağı beklenmektedir.



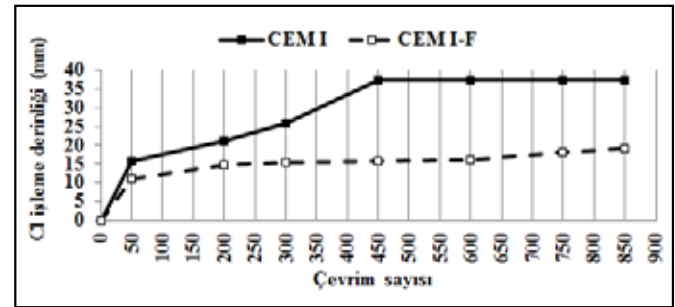
Şekil 4. Rezistivite ve hızlı klor geçirirliliği sonuçları.

3.3. Deniz Suyu Etkisi

3.3.1 Klor İşleme Derinliği

Deniz ortamında ıslanma-kuruma çevrimlerinde beton numunelerden elde edilen klor işleme derinliği değerleri Şekil 5’te gösterilmektedir. Çevrim sayıları arttıkça klor cephesinin ilerlediği görülmektedir. 450 çevrimde kül içermeyen karışımın klor işleme derinliği değerleri 37,5 mm seviyesine ulaş-

mıştır. Bu sonucun 75x75 mm enkesitli beton numunelerden elde edildiği düşünüldüğünde numune kesitinin tamamına klor işlemiş olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Öte yandan UK içeren betonlarda 850 çevrime ulaşıldığında bile klor işleme derinliği değerlerinin çok daha düşük kaldığı ve tüm kesite ulaşamadığı görülmektedir. Bu durum uçucu küllün önemini ve klor cephesinin ilerlemesinde pozitif etkisini göstermektedir.

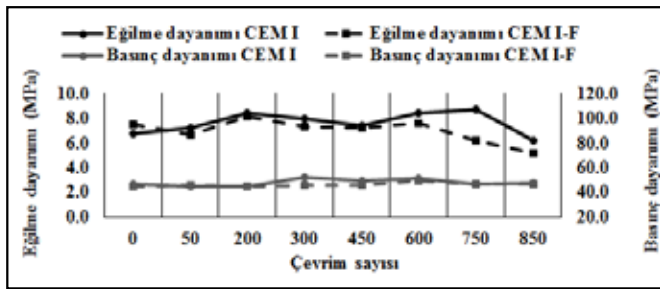


Şekil 5. Islanma-kuruma çevrimlerinde klor işleme derinliği değerlerinin değişimi.

3.3.2 Islanma-kuruma Etkisinde Eğilme ve Basınç Dayanımı Değişimleri

Islanma-kuruma etkisindeki beton numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının değişimi Şekil 6’da sunulmuştur. 200 çevrime kadar ıslanma-kuruma etkisi sonunda ölçülen eğilme dayanımı değerlerinin başlangıca göre genel olarak bir miktar arttığı söylenebilir. 450 ve 600 sonrası deneylerin sonuçlarına bakıldığında, eğilme dayanımlarında önemli bir değişim olmamıştır. Bu bağlamda, etkin mekanizmanın ıslanma-kuruma çevrimlerinin kür etkisi yaptığı, henüz hasar oluşmadığı düşünülmektedir. 750 çevrim sonrası ise bir önceki çevrime kıyasla eğilme dayanımlarında bir miktar düşüş olduğu görülmektedir. Özellikle 850 çevrim sonrasında eğilme dayanımlarında düşüşlerin kimyasal tahribattan ziyade deniz ortamının fiziksel etkilerinden dolayı oluşmuş olabileceği düşünülmek-

tedir. Boy değişimi sonuçlarında herhangi bir genişlemenin olmaması ve eğilme dayanımında düşüşün tüm karışımlarda olması fiziksel etkilerin baskın olduğunu desteklemektedir. Tuz kristalleşmesi, dalgaların yıpratıcı etkisi, ıslanma-kuruma çevrimlerinde kuruma sonucunda tekrarlı büzülmelemlerin yıpratıcı etkisi gibi fiziksel olgular mikro çatlaklara hassas olan eğilme performansını olumsuz etkilemiş olabilir. Fakat görüldüğü gibi genel olarak dayanımlar hala ıslanma-kuruma çevrimin öncesi dayanımların altına inmemiştir. ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası düşük çevrim sayılarında basınç dayanımı değerleri için de eğilme dayanımı değerlerine benzer yorum yapılabilir. Genel eğilimin dayanım değerlerinin artışı şeklinde olduğu söylenebilir. Çevrimler sonrası deneylerin sonuçlarına bakıldığında, etkin mekanizmanın ıslanma-kuruma çevrimlerinin kür etkisi yaptığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6. İslanma-kuruma çevrimlerine göre eğilme ve basınç dayanımı değişimi.

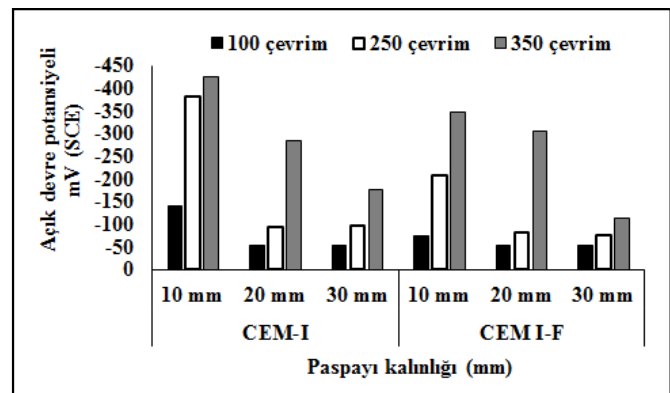
3.3.3 Korozyon Ölçüm Sonuçları

Çalışmada gerçekleştirilen donatı korozyonu ile ilgili ölçümler, açık devre potansiyeli ölçümü değerleri ve korozyon akım yoğunluğu değerleri olmak üzere iki kategoride değerlendirilmiştir. Yarı hücre potansiyeli değerleri çelik donatının bulunduğu ortam koşulları altında donatı korozyonu aktivitesinin niteliksel bir göstergesi olup, potansiyel değerine göre korozyon durumu tahmin edilebilmektedir [11].

Betonarme numunelerdeki donatıların ıslanma-kuruma çevrimlerine göre açık devre potansiyeli değerleri Şekil 7'de sunulmuştur. Her pas payı kalınlığı için ıslanma-kuruma çevrim sayısı arttıkça potansiyel değerlerinin de arttığı görülmektedir. Pas payı kalınlığı 1 cm olan numunelerden ölçülen açık devre potansiyeli değerleri, 250 ıslanma-kuruma çevriminden itibaren aktif korozyon sürecinin başladığını göstermektedir. Pas payı kalınlığı 2 cm olan numunelerde ise 250 çevrimde hâlâ %90 olasılıkla korozyon gelişimi olmadığı, 350 çevrimden sonra korozyon gelişiminin başlamış olabileceğini göstermektedir. 3 cm pas payına sahip numunelerde ise 250

çevrime kadar korozyon gelişiminin olmadığı, 350 çevrimde ise potansiyel değerlerinin belirsiz bölgede olduğu görülmektedir. Küçük pas payı tabakası kalınlıklarında yüksek potansiyel değerleri elde edilmiş olması, bir başka deyişle pas payı kalınlığı fazla olan numunelerde düşük potansiyel değerlerinin ölçülmüş olması pas payı tabakasının fiziksel bariyer etkisinin önemini ortaya koymaktadır. Klor iyonlarına karşı etkin bir pas payı kalınlığı korozyonun başlangıç aşamasını geciktirmektedir.

Beton karışımında UK kullanılması açık devre potansiyeli açısından eğilimi değiştirmemekle birlikte potansiyel değerlerini bir miktar düşürmüştür. Buna göre, 1 ve 2 cm pas payı tabakası kalınlığına sahip numuneler 350 çevrimden itibaren %90'dan büyük olasılıkla korozyon aktivitesi göstermektedir. 3 cm pas payı tabakasına sahip örneklerde %90'dan büyük olasılıkla korozyon gelişiminin henüz başlamadığı söylenebilir.



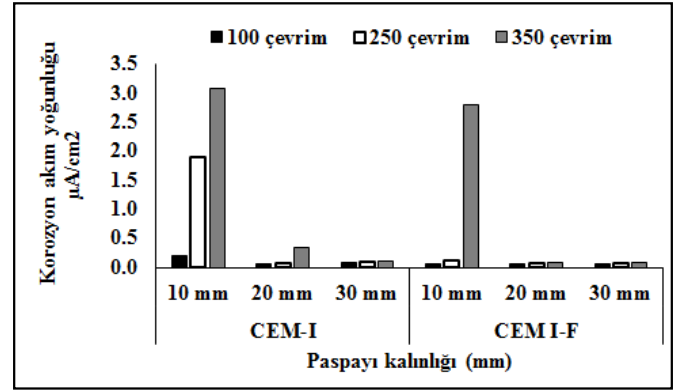
Şekil 7. İslanma-kuruma çevrimlerine göre açık devre potansiyeli değerleri.

UK içermeyen betonarme numunelerdeki donatıların ıslanma-kuruma çevrimlerine göre korozyon akım yoğunluğu değerleri Şekil 8'de verilmiştir. Grafik açık devre potansiyeli değerleri ile paralellik göstermekte olup, ıslanma-kuruma çevrim sayısı arttıkça korozyon gelişiminin hızlandığını göstermektedir. Özellikle 1 cm pas payı tabakası kalınlığına sahip numunelerde 250 ıslanma-kuruma çevriminden itibaren korozyon gelişimi başlamıştır. 250 ıslanma-kuruma çevriminde korozyon akım yoğunluğu $1,886 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine, 350 çevrimde ise $3,067 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine ulaşmıştır. Korozyon hızı sınıflandırmasına göre $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden yüksek bu değerler yüksek hızda korozyon gelişimini göstermektedir [12]. 2 cm pas payı tabakasına sahip numuneler 100 ve 250 çevrimde $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinin altında ihmal edilebilir

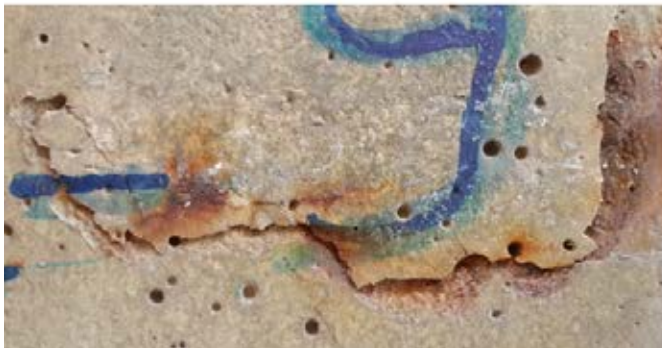
mertebede korozyon hızı gösterirken, 350 çevrimden itibaren $0,352 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinde düşük korozyon hızı değerleri göstermiştir. Pas payı tabakası kalınlığı 3 cm olan betonarme numunelerde korozyon akım yoğunluğu değerleri $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve altında olup korozyon akım yoğunluğu değeri ihmal edilebilir düzeydedir. Pas payı 1 cm olarak üretilmiş betonarme numunelerdeki 350 ıslanma-kuruma çevriminden oluşan çatlak ile donatıda oluşan korozyon ve kütle kaybı Şekil 9'da sunulmuştur.

CEM I-F bağlayıcı tipi ile üretilmiş betonarme numunelerdeki donatıların ıslanma-kuruma çevrimlerine göre korozyon akım yoğunluğu değerleri de Şekil 8'de gösterilmiştir. 100 ıslanma-kuruma çevriminde tüm numunelerdeki korozyon akım yoğunluğu değerleri $0,053 - 0,064 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ aralığında olup ihmal edilebilir düzeydedir. Pas payı tabakası kalınlığı 1 cm olan numunelerde 250 ıslanma-kuruma çevriminden sonra ölçülen korozyon akım yoğunluğu değeri $0,130 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olup düşük hızda korozyon gelişiminin başladığı, 250 ıslanma-kuruma çevriminden sonra $2,801 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olup yüksek hızda ko-

rozyon seviyesine ulaştığı görülmektedir. Pas payı tabakası kalınlığı 2 ve 3 cm olan numunelerdeki korozyon akım yoğunluğu değerleri 350 ıslanma-kuruma çevrimine kadar bir miktar artsa da $0,088 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerlerinde kalıp ihmal edilebilir korozyon hızı seviyesinde kalmıştır.



Şekil 8. ıslanma-kuruma çevrimlerine göre korozyon akım yoğunluğu değerleri.



Şekil 9. 350 çevrim sonucu oluşan çatlak ile donatıda oluşan korozyon ve kütle kaybı.

4. SONUÇ

Deneysel çalışmalarda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- C25/30 sınıfı betonda uçucu kül kullanımı betonun elektriksel direnç değerini yaklaşık 4 kat arttırmakta ve hızlı klor geçirimsizliği değerini yaklaşık 10 kat azaltmaktadır.
- Deniz suyu etkisinde 850 ıslanma-kuruma çevrimi sonrasında donatısız betonların eğilme ve basınç dayanımı değerleri çevrimleri öncesi dayanım değerleri ile benzer mertebelindedir.
- Uçucu kül içermeyen ve pas payı küçük olan betonarme örneklerde 350 çevrim sonunda donatıların korozyon akım yoğunluğu değerlerinin arttığı ve donatı korozyonu ha-

sarlarının oluştuğu gözlenmiştir. Diğer yandan uçucu kül içeren betonlardaki donatıların korozyon akım yoğunluğu değerleri düşük mertebelerde kalmıştır.

- Betonarme elemanlardaki donatı korozyonu gelişimi ile bu betonların klor işleme derinliği, elektriksel direnç, hızlı klor geçirimsizliği gibi karakteristikleri arasında anlamlı ilişkilerin varlığı tespit edilmiştir.

Teşekkür

Sunulan çalışma, TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı tarafından desteklenen 112M899 numaralı araştırma projesinin bir bölümü olup yazarlar TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Kaynaklar

1. TS-EN 206-1, "Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
2. ACI 222.3R-03, "Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures", Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.
3. EN 1992-1, "Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings"
4. TS 500, "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları"
5. BS 8110-1, "Structural Use of Concrete, Code of Practice for Design and Construction"
6. TS 708, "Beton Çelik Çubukları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
7. ASTM C1202, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration"
8. Otsuki, N., Nagataki, S., Nakashita, K., "Evaluation of the AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials", **Construction and Building Materials**, No: 7, pp.195-201, 1993.
9. ASTM G1, "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens", Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02, 17-25, American Society for Testing and Materials, PA.
10. ASTM G5, "Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, Annual Book of ASTM Standards", Volume 03.02, 60-71, American Society for Testing and Materials, PA.
11. ASTM C876, "Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.02, 11-16, American Society for Testing and Materials, PA.
12. Andrade, C., Alonso, M.C., "Values of Corrosion Rate of Steel in Concrete to Predict Service Life of Concrete Structures", American Society for testing and Materials. **ASTM Symposium on Application of Accelerated Corrosion Tests to Service Life Prediction of Materials**, 2004.