

Gerçek Deniz Ortamındaki Betonlarda Bağlayıcı Tipi ve Su/Bağlayıcı Oranının Klorür İşleme Derinliğine Etkisinin İncelenmesi*

Hilmi Aytaç ⁽¹⁾, Hüseyin L. Sevin ⁽¹⁾,
Ahsanollah Beglarigale ⁽²⁾, Hüseyin Yiğiter ⁽²⁾
ve Halit Yazıcı ⁽²⁾

1. Özet

Deniz ortamında bulunan betonarme elemanlar değişik fiziksel ve kimyasal etkilere maruzdur. Bunlar arasında, sülfat etkisi, karbonik asit etkisi, beton içindeki kirecin yıkanarak uzaklaşması, klorür korozyonu, donma-çözülme, tuz kristalizasyonu, dalgaların ve yüzen parçacıkların aşındırıcı etkileri sayılabilir. Genel olarak en çok hasarın, ıslanma-kuruma bölgesinde bulunan elemanlarda oluştuğu söylenebilir. Tasarımda çimento tipi, bağlayıcı dozajı, su/bağlayıcı oranı, mineral katkı kullanımı gibi faktörlerin yanında pas payı kalınlığı gibi uygulama detayları dayanıklılık anlamında büyük önem arz eder. Deniz suyunda klorür ve sülfat iyonlarından kaynaklanan karma bir etki söz konusu olduğu için, beton bir taraftan sülfat etkisinden dolayı tahrip olma riski taşırken diğer taraftan da klorür iyonlarının (betonarme sistemler için) donatıyı tahrip etme riski söz konusudur.

Deniz ortamında hangi tip çimento kullanılmasının uygun olacağı konusunda tartışmalar mevcuttur. Klorür iyonlarını bağlama, dolayısıyla korozyon riskini azaltma kabiliyetinden dolayı C₃A miktarının göreceli olarak daha yüksek olduğu çimento kullanılması uygun görünmesine rağmen, sülfat etkisine dirençli bir betonda C₃A miktarının mümkün olduğunca

Effect of Binder Type and Water/Binder Ratio on Chloride Penetration Depth of Concrete Exposed to Actual Marine Environment

Reinforced concrete elements in marine environment are exposed to various physical and chemical influences. In general, it can be stated that the elements in the wetting-drying regions are exposed to highest rate of damage. Since there is a combined effect generated by chloride and sulphate ions in sea water, the concrete while on one hand bears the risk of destruction due to sulphate effect, on the other hand there is a risk for the reinforcement to be corroded by chloride (for reinforced concrete systems) ions as well.

az olması gerektiği bilinen bir gerçektir. Bu noktada baskın etkinin ne olduğuna karar vermek önem taşımaktadır.

Bu çalışmada çimento tipi (CEM I 42.5R, CEM II 42.5R, CEM I-SR 5) başta olmak üzere, su/bağlayıcı oranı ve uçucu kül kullanımının betonun klorür işleme derinliği üzerindeki etkisi gerçek deniz ortamında bekletilen numuneler üzerinde incelenmiştir. Deney sonuçları söz konusu parametrelerin betonun geçirimsizliği üzerinde önemli etkisi olduğunu göstermiştir.

GİRİŞ

Yapılar, inşa edildikleri zamandan itibaren dış ortamdaki mekanik, fiziksel ve kimyasal faktörlerin etkisinde kalır, zaman içinde başlangıçtaki

özelliklerini yitirir ve hasara uğrarlar. Deniz ortamında ya da denize yakın kesimlerde inşa edilen yapılar da bu faktörlerin biri veya birkaçının birlikte yer aldığı etkilere maruz kalır. Deniz ortamından, doğrudan ya da dolaylı olarak etkilenen betonarme yapılarda ortaya çıkan en büyük problem korozyondur. Bu problem doğru tasarlanmış, geçirimsiz, kaliteli bir betonun donatıyı fiziksel ve kimyasal olarak korumasıyla bertaraf edilebilir. Fiziksel koruma, zararlı maddelerin donatıya ulaşmasının engellenmesiyle, kimyasal koruma ise yüksek pH'lı bir ortam yaratılması ile gerçekleşir. Betonun bu olumlu

⁽¹⁾ Bursa Beton A.Ş.

⁽²⁾ Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

* Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen 17. ERMCO Kongresi'nde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler:

Deniz suyu, çimento tipi, korozyon, dürabilite, bağlayıcı dozajı, C₃A miktarı, klorür işleme derinliği

özelliğine rağmen, tasarım ve uygulamada yapılan hatalar, korozyonu günümüz betonarme yapılarının servis ömürlerini belirleyen en önemli faktörü haline getirmiştir. Özellikle tekrarlı ıslanma-kuruma etkisine maruz deniz yapılarında, beton içine sızan klorür iyonları, suyun buharlaşması sonucu beton içerisinde kalmakta, tekrar sayısı arttıkça klorür yoğunluğu da artmaktadır. Bu durumda deniz suyundaki iyon konsantrasyonundan daha fazla klorür, beton içerisinde birikebilmektedir [1-6]. Bunun neticesinde ortaya çıkan korozyon, donatı kesitini yetersiz hale getirmekte, diğer taraftan genleşme yaratan korozyon ürünleri ve sülfat saldırısı betonda

ciddi tahribat yapmaktadır.

Ülkemizin sahil şeridinde hayata geçirilen birçok projenin şartnamesinde doğrudan doğruya sülfata dayanıklı çimento kullanılması ile ilgili kriterler yer almaktadır. Oysa ki deniz suyunun içerdiği yüksek sülfat konsantrasyonu gerekçe gösterilerek, sülfata dayanıklı çimento kullanımının şart koşulması doğru değildir. Bu tip bir çimento yalın sülfat etkilerine karşı tavsiye edilmesine rağmen, deniz suyu etkisi gibi karma bir kimyasal saldırı durumunda betonarme donatısının korozyonu açısından doğru bir çözüm olmamaktadır. TS EN 206 standardının F.1 no'lu çizelgesine bakıldığında, deniz suyu kaynaklı klorürün sebep olduğu korozyon riski için özel bir çimento kullanılması gerektiği ifade edilmemiş, sadece max. su/çimento oranı, min. çimento dozajı ve min. dayanım sınıfı ile ilgili kriterler verilmiştir. Yine aynı çizelgede, zararlı

kimyasal ortamlar için sülfata dayanıklı çimento kullanımı zorunluluğu, sülfat etkisinin şiddetli olması koşuluna bağlanmıştır [7]. Konuyla ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında ise deniz suyuna maruz yapılarda doğrudan doğruya sülfata dayanıklı çimento kullanılması ile ilgili bir bilgiye rastlanılmakta, orta derecede C_3A içeren çimentoların optimum çözüm olduğu görülmektedir. Amerikan Beton Enstitüsünün bir raporunda çimentonun C_3A içeriğinin %4'den az olmaması

durumunda donatı korozyonunun önleneyeceği; %10'dan fazla olmaması halinde ise sülfata karşı direnç göstereceği belirtilmiştir [8]. Diğer bir raporda C_3A içeriğinin %5-8 arasında olduğu çimento kullanılması durumunda, %5'den az C_3A içeriğine sahip çimentoya göre, korozyondan kaynaklanan çatlak oluşumunun daha az gerçekleştiği belirtilmiştir [9]. Başka bir çalışmada ise, deniz suyu etkisindeki bir ortamda C_3A içeriği %0,6, % 8,8 ve % 14,1 olan çimentolar kullanıldığı bir araştırmaya yer verilmiş ve dürabilitesi en yüksek betonun sülfata dayanıklı çimento ile değil, %8,8 C_3A içerikli çimento ile yapılan beton olduğu belirtilmiştir [10].

Yapılan araştırmalar çimentodaki C_3A bileşeninin sülfatlarla oluşan reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan etrenjitin, klorür iyonlarının bulunduğu ortamda genleşmeye yol açmadığını ve deniz suyunda çözündüğünü göstermiştir. Ayrıca sülfat etkisi açısından zararlı olan C_3A bileşeni aynı zamanda çimentoya klorür bağlama özelliği kazandırmakta ve böylece donatının klorür iyonlarından etkilenme riski azalmaktadır [11]. Dolayısıyla düşük C_3A içerikli çimentoların kullanılması korozyon problemine neden olabilir. Bunun neticesinde yapı veya yapı elemanı, sülfat etkisinden korunmak istenirken donatı korozyonu nedeniyle beklenmedik kısa sürelerde işlevini yitirerek kullanılmaz hale gelebilir. Bu sebeple çok düşük C_3A içerikli sülfata dayanıklı çimentoların deniz ortamında kullanımı tercih edilmemektedir [1].

Klorür iyonlarını bağlama, dolayısıyla korozyon riskini azaltma kabiliyetinden C_3A miktarının göreceli olarak daha yüksek olduğu çimento kullanılması uygun görünmesine rağmen, sülfat etkisine dirençli bir betonda C_3A miktarının mümkün olduğunca az olması gerektiği ortadadır. Bu noktada baskın etkinin ne olduğuna karar vermek önem taşımaktadır. Hazır beton kullanıcısı, yukarıda bahsedilenler çerçevesinde, deniz ortamına yakın yerde inşa etmeyi düşündüğü yapı için sülfata dayanıklı çimento kullanımını gündeme getirmekte ve kalıcılıkla ilgili değerlendirmelerini korozyon problemini gözden kaçırarak tamamen sülfat üzerinden yapmaktadır. Oysa ki yukarıda da belirtildiği üzere deniz suyu etkisinde servis ömrünü etkileyen baskın faktör sülfat değil, klorür kaynaklı donatı korozyonudur.

Bu çalışmada kullanıcının çimento seçimi ile ilgili yaşadığı ikilemlere cevap bulabilmek amacıyla çimento tipi başta olmak üzere, su/bağlayıcı oranı ve uçucu kül kullanımının, gerçek deniz ortamındaki betonlarda klorür işleme derinliğine etkisi araştırılmıştır.

There are discussions on which type of cement would be the best for use in marine environment. Although it seems that use of cement type with relatively high amount of C_3A would be more suitable due to its capability of binding chloride ions and therefore to reduce the risk of corrosion, it is a known fact that a concrete with resistance to sulphate effect should have as low C_3A content as possible.

In this study, the effects of cement type (CEM I 42.5R, CEM II 42.5R, CEM I-SR 5), water/binder ratio and use of fly ash on the chloride penetration depth of concrete were investigated on samples kept in actual marine environment. The results of the experiments revealed that the given parameters have remarkable effects on permeability of the concrete.

Key words: Sea water, cement type, corrosion, durability, C_3A , chloride penetration depth.

2. Deneyisel çalışma

2.1. Malzemeler

2.1.1. Çimento

TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 R, CEM II / A-M (P-L) 42,5 R ve CEM I 42,5 R-SR 5 tipi çimentolara ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir. C_3A miktarı Bogue formülünden hesaplanmıştır. CEM II çimentosunda C_3A miktarı hesaplanmamıştır.

Tablo 1. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri

		CEM I	CEM II A-M/P-L	CEM I SR 5
SiO_2 (%)		19,07	23,17	19,66
Al_2O_3 (%)		5,61	6,16	3,98
Fe_2O_3 (%)		2,91	2,82	4,15
CaO (%)		62,28	56,57	64,82
MgO (%)		0,87	0,84	0,99
SO_3 (%)		2,75	3,08	2,45
Na_2O (%)		0,61	0,74	0,09
K_2O (%)		0,67	0,86	0,61
Kızd. (%)		4,82	4,90	2,76
Katkı (%)		-	18,07	-
Özgül ağırlık		3,10	3,02	3,15
Blaine (cm^2/g)		4780	5070	3790
Priz Başlangıcı (saat:dk)		03.05	03.05	03.20
Priz Sonu (saat:dk)		04.10	04.00	04.15
Basınç Dayanımı (MPa)	2 gün	31,7	30,4	24,9
	7 gün	51,3	46,0	44,2
	28 gün	58,1	54,8	55,8
C_3A (%) (Bogue)		9,95	-	3,53

2.1.2. Uçucu Kül

Orhaneli termik santralinden elde edilen uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri

SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	Kızd. Kaybı (%)	S. CaO (%)	Özgül Ağırlık	Blaine (cm^2/g)	Reaktif CaO (%)	45 μ Elek Bakiyesi (%)	28 Günlük Puzolanik Aktivite (%)
51,47	25,08	10,89	4,18	2,59	0,88	0,21	2,54	0,73	0,10	2,21	3675	4,38	32,9	88,2

2.1.3. Agrega

Çalışmada tek kaynaktan sağlanan kırma kireçtaşı kullanılmıştır. Tablo 3'te agregalara ait özellikler verilmiştir.

Tablo 3. Agregalara ait özellikler

	Kırma Kum (0/5)	I No. İri Agrega (5/12)	II No. İri Agrega (12/22)
Özgül ağırlık	2,65	2,69	2,70
Su Emme (%)	1,95	0,75	0,42
Metilen Mavisi (g/kg)	0,7	-	-
Elek Göz Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)		
31,5	100	100	100
22,4	100	100	100
16	100	100	63
11,2	100	93	6
8	100	49	-
5,6	100	13	-
4	92	2	-
2	61	1	-
1	40	-	-
0,5	28	-	-
0,25	19	-	-
0,150	14	-	-
0,063	7	-	-

2.1.4. Kimyasal Katkı

Beton karışımlarında TS EN 934-2 standardına uygun modifiye polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Katı madde oranı %25,66, yoğunluğu 1.090 ve pH değeri 5,90'dır.

2.2. Malzeme Karışım Oranları

Deneysel çalışmalarda su/bağlayıcı oranı (beton sınıfı) ana değişkenlerden biridir. Hazır beton sektöründe yaygın olarak kullanılan normal dayanım sınıfı olan C25/30 ve nispeten daha yüksek mukavemetli C40/50 sınıfları için dizaynlar yapılmıştır. C25/30 sınıfı betonlarda toplam bağlayıcı dozajı 350 kg/m³, su/bağlayıcı oranı ise 0,56 olarak seçilmiştir. C40/50 sınıfı betonlarda ise bağlayıcı dozajı 450 kg/m³, su/bağlayıcı oranı 0,43'tür.

Çalışmada bir diğer ana değişken çimento tipidir. Çimento tipinin betonun deniz suyu dayanıklılığı ve donatı korozyonuna etkisinin belirlenmesi amacıyla her iki sınıf beton için, normal Portland çimentosu (CEM I 42,5R), Portland kompoze çimento (CEM II / A-M (P-L) 42,5R) ve sülfata dayanıklı çimento (CEM I 42,5 R-SR 5) olmak üzere üç farklı çimento türü ile numune üretimi yapılmıştır.

Sözü edilen beton karışımlarına, %20 oranında uçucu kül ikame edilerek beton karışımları tekrarlanmıştır. Aynı beton sınıfı için küllü ve külsüz karışımlarda su miktarı sabittir. Tüm karışımların benzer kıvam değerlerine sahip olması için akışkanlaştırıcı katkı farklı oranlarda kullanılmıştır. Toplamda 12 farklı karışımın performansı ölçülmüştür. Tablo 4'te karışım oranları ve taze beton özellikleri verilmiştir.

Tablo 4. Beton karışım oranları ve taze beton özellikleri

Beton Sınıfı	Karışım Kodu	Çim. (kg/m ³)	U. Kül (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Akışk. (%)	Akışk. (kg/m ³)	0/5 (kg/m ³)	5/12 (kg/m ³)	12/22 (kg/m ³)	Top. (kg/m ³)	S/B	Hava Sic. (°C)	Beton Sic. (°C)	Hava (%)	Çökme (cm)
C25/30	C25CEMIFA	280	70	196	0,1	0,35	889	391	481	2307	0,56	17	17	1,8	21
	C25CEMIIFA				0,4	1,40	889	391	481	2308		16	17	1,5	20
	C25SRFA				0,1	0,35	889	391	481	2307		12	12	2,1	21
	C25CEMI	350	0		0,1	0,35	906	398	491	2341		5	9	2,0	20
	C25CEMII				0,4	1,40	906	398	491	2343		2	9	2,1	20
	C25SR				0,0	0,00	906	398	491	2341		5	9	1,4	20
C40/50	C40CEMIFA	360	90	194	0,4	1,80	809	405	460	2320	0,43	8	9	1,8	21
	C40CEMIIFA				0,5	2,25	809	405	460	2320		10	12	1,7	21
	C40SRFA				0,2	0,90	809	405	460	2319		13	16	1,8	21
	C40CEMI	450	0		0,4	1,80	836	419	473	2373		7	9	2,1	21
	C40CEMII				0,6	2,70	836	419	473	2374		12	12	2,3	21
	C40SR				0,2	0,90	836	419	473	2372		7	9	2,0	21

2.3. Çalışma Yöntemi

Çalışma laboratuvar ve gerçek deniz ortamında gerçekleştirilmiştir. Deniz ortamında yapılan çalışmalar Gemlik/ Bursa'da Bursa Çimento Fabrikası kuruluşu olan RODA Liman Sahası'nda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin deniz suyuna güvenli ve sistematik bir şekilde maruz kalması gerekmektedir. Sahilde bekletme şeklindeki bir düzenlemede dalgaların etkisiyle numunelerin kaybolma-zayı olma riski vardır. Ayrıca değişkenliklerin en aza indirilebilmesi için tüm örneklerin benzer şekilde etkilenmesi gerekmektedir. Bu riskleri ortadan kaldırmak için bir platform içinde numunelerin denize daldırılması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla 75 x 75 x 285 mm ebatlarındaki 600 adet numuneyi taşıyabilecek, ıslanma-kuruma çevrimini otomatik olarak yapacak bir daldırma-çıkarma düzeneği hazırlanmıştır (Şekil 1-5). Numunelerin ıslanması kısa sürede, kuruması ise uzun sürede gerçekleştiğinden,

ıslanma-kuruma çevrimleri örneklerin 12 saat süreyle denizde, 24 saat süreyle havada bekletilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

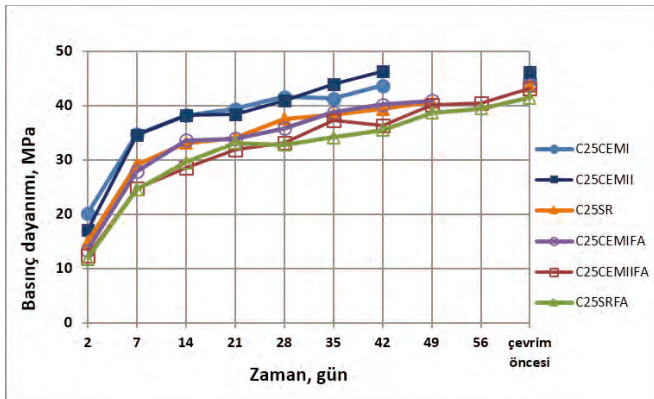
Islanma-kuruma platformu bir ana taşıyıcı sistem ve buna bağlı 4 sepetten oluşmaktadır. Numunelerin yerleştiği hücreleri içeren sepetler birer piston ile taşıyıcı iskelete asılmış durumdadır. 12 saatlik ıslanma periyodu tamamlandığında pistonlar sepetleri yukarı çekerek kuruma aşaması başlamaktadır. 24 saat boyunca su dışında bekleyen numune sepetleri, kuruma periyodu tamamlanınca pistonlar ile deniz suyunun içerisine itilmekte ve tekrar ıslanma periyodu başlamaktadır. Bu şekilde ıslanma-kuruma döngüleri tekrar etmekte olup, çevrim sayıları platforma monte edilmiş mekanik bir sayaç ile takip edilmektedir. Tüm sistem tamamen otomatik olup, daldırma-çıkarma işlemleri için herhangi bir manuel müdahaleye gerek yoktur.



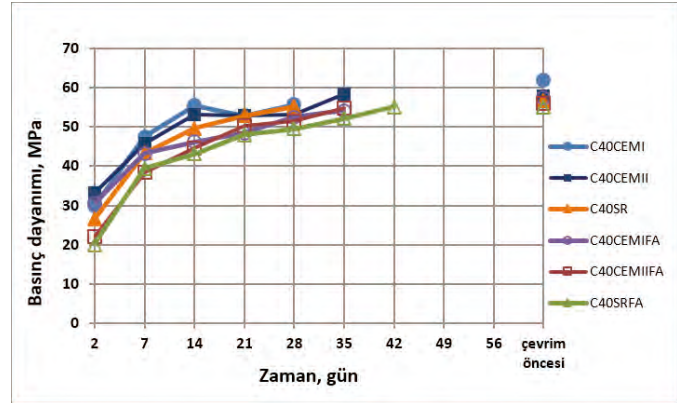
Şekil 1-5. Montaj öncesi ve sonrasında ıslanma-kuruma düzeneği ve deney numuneleri

Tüm karışımlardan, çevrim öncesinde basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla her bir yaş için 150 mm ayrıtlı, 3'er adet küp; deniz suyuna maruz kaldıktan sonrasındaki farklı çevrim sürelerinde klorür işleme derinliğini ölçebilmek için ise 20'şer adet 75x75x285 mm ebatlarında kiriş numune alınmıştır. Çimento tipi ve kül kullanımına bağlı olarak dayanım gelişimlerinin farklı olacağı bilinen bir gerçektir. Numunelerin ıslanma-kuruma çevrimine girmeden önce birbirinden çok farklı dayanıma sahip olmasının, çimento tipi ve kül kullanımının etkisinin sağlıklı bir şekilde görülmesini engelleyebileceği düşünülmüştür. Dolayısıyla dayanımların sabit bir mertebeye tutulması hedeflenmiş ve bu amaçla 28 gün standart kür işleminden sonra, ilerleyen yaşlarda dayanımları benzer duruma getirebilmek için su kürü farklı şekilde uygulanmıştır. Örneğin dayanım gelişimi hızlı olan bir karışımın, kür havuzundan çıkartılarak (oda sıcaklığında havada bekletme) dayanım ilerleme hızının azaltılması amaçlanmış, dayanım gelişimi yavaş olan karışımlar ise bu süreçte kür havuzunda beklemeye devam etmiştir. Dayanım değerine göre havuzdan çıkartılan küp numuneleriyle eş zamanlı olarak kiriş numuneleri de havuz dışına alınmıştır. Dayanımların belli mertebeye gelmesinden sonra kiriş numuneleri liman sahasına götürülerek platforma yerleştirilmiş ve çevrimler başlatılmıştır. Belirli çevrimlerden sonra kiriş numunelerde eğilme deneyi yapılmış ve eğilme sonrasında ortaya çıkan kesit üzerine 0.1 N AgNO₃ çözeltisi püskürtülmüştür. Renk değiştiren bölgeler klorür işleme derinliği değeri olarak kaydedilmiştir [12-13].

Islanma-kuruma çevrimleri öncesinde elde edilen basınç dayanımları C25/30 sınıfı için Şekil 6'da, C40/50 sınıfı için ise Şekil 7'de görülmektedir. Tüm değerler küp numunelerden elde edilen değerlerin ortalamasıdır.



Şekil 6. C25/30 sınıfı numunelere ait basınç dayanımı gelişimi



Şekil 7. C40/50 sınıfı numunelere ait basınç dayanımı gelişimi

Şekil 6 ve 7'de grafiklerin sürekliliğinin bozulduğu bölümler su kürünün olmadığı, numunelerin oda sıcaklığında beklediğini göstermektedir.

C25 sınıfı betonların 28 günlük dayanımlarına bakıldığında, en düşük ve en yüksek değer arasında ~9 MPa fark varken, çevrim öncesinde bu fark ~4.5 MPa'a inmiştir. C25 sınıfında bu mertebenin dayanım anlamında benzer olduğu kabul edilmiştir. C40 sınıfı betonlarda ise 28. günde en düşük ve en yüksek değer arasındaki ~7 MPa fark, çevrim öncesinde de aynı değeri almıştır. Bu mertebenin de C40 sınıfı için dayanım benzerliği anlamında uygun olduğu düşünülmüştür. Tablo 5'te betonların deniz suyuna maruz bırakılmadan önceki basınç dayanım değerleri görülmektedir.

Tablo 5. Kürünü tamamlayan betonların deniz suyu etkisine maruz bırakılmadan önceki basınç dayanımı değerleri (MPa)

C25 CEMI	C25 CEMII	C25 SR	C25 CEMIFA	C25 CEMIIFA	C25 SRFA
44,8	46,2	43,7	43,8	43,2	41,5

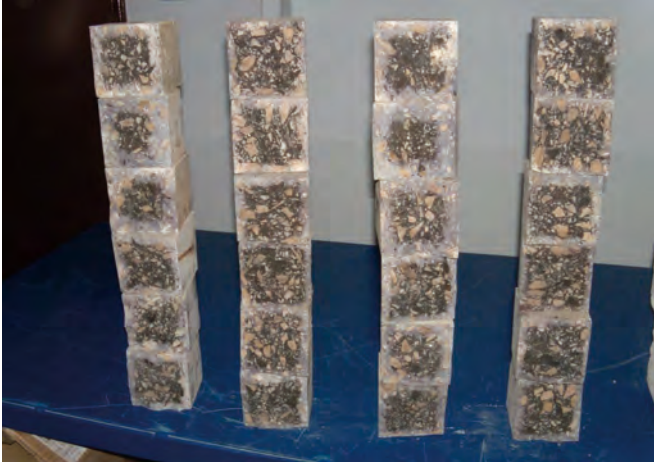
C40 CEMI	C40 CEMII	C40 SR	C40 CEMIFA	C40 CEMIIFA	C40 SRFA
62,0	57,9	56,7	57,3	56,1	55,0

Her iki beton sınıfında da, beklenildiği gibi UK kullanılan karışımların erken yaşlardaki dayanımları düşük bulunmuştur. İlerleyen yaşlarda ise UK kullanılan ve kullanılmayan karışımların dayanımları benzer hale gelmiştir.

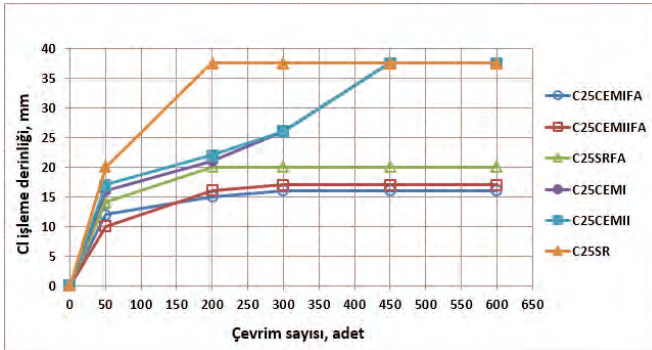
3. Bulgular ve değerlendirme

Beton bünyesine klorür girişinin tespit edilmesi ve klorür profilinin belirlenmesi için referans yöntem, değişik derinliklerde kimyasal analiz ile klorür muhtevasının belirlenmesidir. Ancak bu yöntem oldukça zaman alıcı bir metottur. Diğer yandan renklendirme yöntemi ile klorür işleme derinliğinin tespit edilmesi oldukça kullanışlıdır. Çözeltinin püskürtülmesinden sonra yü-

zeyden derinlere inildikçe klorürlerce kirlenmiş bölge gri-beyaz renk alırken, henüz klorürlerin ulaşamadığı bölge kahverengisiyah renk almaktadır (Şekil 8). Gri-beyaz renkli klorür cephesi çelik donatı için riskli bölge olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 8. Kiriş numune en kesitlerinde klorür işleme derinlikleri C25/30 sınıfı numuneler için klorür işleme derinliği değerleri Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. C25/30 sınıfı betonların klorür işleme derinlikleri Her bir çevrim için UK içermeyen betonlara klorür daha fazla işlemiş, UK'li betonlarda klorür işleme derinlikleri daha düşük kalmıştır. Bu sonuçlarda UK'nin klorür bağlama özelliğinin ve pozulanik reaksiyon neticesinde azalan geçirimliliğin etkili olduğu düşünülmektedir.

UK'li ve UK'siz karışımlarda en yüksek işleme derinlikleri SR tipi çimentoda gerçekleşmiştir. Tüm çevrim sayılarında, sabit bir çevrim sayısı için çok değişken değerlerin elde edilmesi basınç dayanımından bağımsız olarak bağlayıcı tipinin önemini ortaya koymaktadır.

50 çevrim sonunda (2,5 ay) klorür işleme derinliği en az CEMIIFA'da, en fazla SR'de gerçekleşmiştir. Bu kadar kısa bir sürede SR çimentosunun işleme derinliği CEMIIFA'nın tam iki katıdır. Bu kısa sürede bağlayıcı tipinin etkisi net bir şekilde görülebilmektedir.

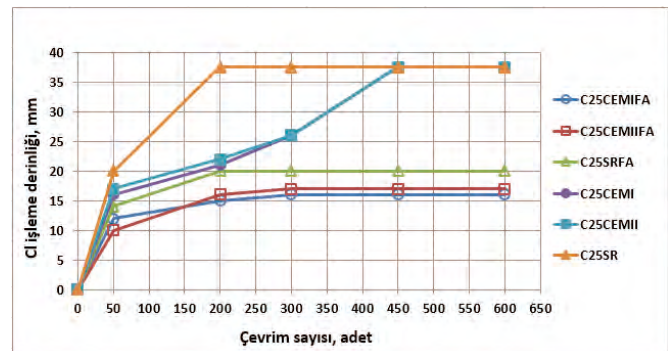
200 çevrim (10 ay) sonunda en düşük işleme derinlikleri C25CEMIFA ve C25CEMIIFA'da gerçekleşmiştir. Bu iki karışım hemen hemen aynı performanstadır. SR çimentosu ise en yüksek işleme derinliğine sahiptir (37,5 mm). Bu sonucun 75x75 mm en kesitli numunelerden elde edildiği düşünüldüğünde, numune kesitinin tamamına klorür işlediği sonucuna varılmaktadır. Burada C25SR karışımının 37,5 mm değerine daha önceki bir süreçte ulaşma ihtimali de gözden kaçırılmamalıdır. Ayrıca 200 çevrim sonrasında klorür işleme derinliğinin sabitlenmesi, klorürün ilerlemediği anlamına gelmemekte, büyük ihtimalle klorür işlemeye devam etmektedir. Numune en kesit ebatları 75x75 mm olduğundan, 37,5 mm'den daha fazla klorür işleme derinliği ölçülemeyeceği için böyle bir algı oluşmuştur. C25SR karışımında klorürün bu kadar kısa sürede tüm kesite işleme gereğcesinin, ortamda klorürle reaksiyona girebilecek yeteri kadar C_3A bulunmaması olduğu düşünülmektedir.

C25CEMI ve C25CEMII karışımlarının işleme derinlikleri ise 450 çevrimde max. değere (37,5 mm) ulaşmış, kesitin tamamına klorür işlemiştir. Bu iki karışım da C25SR karışımına göre gecikmeli de olsa tüm kesite klorür işlemiştir. C25SR'ye göre daha fazla olan C_3A miktarlarının, bu iki karışıma bir miktar daha süre kazandırdığı söylenebilir. C25SR karışımında olduğu gibi büyük ihtimalle daha sonraki süreçlerde de klorür işleme süreci devam etmektedir.

C25CEMIFA ve C25CEMIIFA karışımlarına bakıldığında 200 çevrimden 300 çevrime geçişte çok az bir artış görülmüştür. Bu ufak artışın ihmal edilebilir seviyede olduğu düşünüldüğünde, UK'li karışımlarda 200-600 çevrim arasındaki 20 ay boyunca işleme derinliklerinin sabit kaldığı görülmektedir. Bu karışımlar içerisinde 20 mm ile C25SRFA en yüksek değeri almıştır.

450 çevrimden (22,5 ay) sonra UK'siz karışımlarda çimento tipinden bağımsız olarak kesitin tamamına klorür işlerken, UK'li karışımlarda ise klorür işleme derinliği, max. işleme derinliğinin yaklaşık yarısı mertebesinde.

C25CEMI ile C25CEMII, C25CEMIFA ile C25CEMIIFA karışımları tüm çevrim sürecinde birbirine çok yakın performans sergilemiştir. C40/50 sınıfı numuneler için klorür işleme derinliği değerleri Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. C40/50 sınıfı betonların klorür işleme derinlikleri

C40/50 sınıfındaki betonlarda klorür işleme derinlikleri, C25/30 sınıfına göre beklendiği gibi daha düşük elde edilmiştir. 200 çevrim sonrasında, C40SR karışımında uçucu kül kullanılmamasına rağmen C25SRFA ile hemen hemen aynı mertebede değer elde edilmesi (~20 mm), dayanımın etkisini göstermesi açısından önemlidir.

C40/50 sınıfı karışımların klorür işleme derinliği değerlerine göre sıralanması C25/30 sınıfı betonlara çok benzemektedir. Mineral katkı kullanılan karışımlarda C25/30 sınıfında olduğu gibi daha düşük klorür işleme derinlikleri elde edilmiştir.

UK'li ve UK'siz karışımlarda en yüksek klorür işleme derinliği C25/30 sınıfında olduğu gibi SR içeren karışımlarda elde edilmiştir.

C40CEMI ile C40CEMII, C40CEMIFA ile C40CEMIIFA karışımları C25/30 sınıfında olduğu gibi birbirine çok yakın performans göstermişlerdir.

C40SR karışımı haricindeki diğer karışımlarda klorür işleme derinliklerinin C25/30 sınıfına göre daha dar bir aralıkta kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla dayanımın yüksek olmasının, bağlayıcı tipinin etkisini bir miktar geri planda bıraktığı söylenebilir. Diğer bir deyişle betonlar yüksek dayanımlı ve dolayısıyla daha geçirimsiz oldukları için bağlayıcı tipinin etkisinin görülmesi, C25/30 sınıfına göre zorlaşmıştır.

50 çevrim sonunda tüm karışımlardaki klorür işleme derinlikleri birbirine yakın değerler almıştır. Bu da yine beton dayanımının yüksek olması nedeniyle bağlayıcı tipinin etkisinin net görülememesine bağlanabilir. Çevrim sayısı arttıkça bağlayıcı tipine bağlı olarak farklılıklar ortaya çıkmıştır.

4. Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada deniz suyuna maruz betonarme yapılarda donatı korozyonuna neden olan klorürün, farklı bağlayıcı tipi içeren betonlara ne miktarda işlediği araştırılmış, elde edilen sonuçlara göre hangi bağlayıcı tipinin seçilmesi gerektiği konusuna açıklık getirilmeye çalışılmıştır. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Uçucu küllü karışımlar, uçucu kül kullanılmayan karışımlara göre klorür işlemeye karşı daha dirençlidir. Mineral katkıların klorür bağlama özelliği ve puzolanik reaksiyon neticesinde azalan geçirimsizlik, klorür işleme derinliğinin düşük değerler almasındaki en önemli etkenlerdir. Hızlı klorür geçirimsizlik testi sonuçları ile literatürde bilinen bu sonuç, gerçek deniz ortamında bekletilmiş örneklerde de gözlenmiştir.

Klorür işlemeye karşı en dirençli betonlar CEM I ve CEM II çimentoların kullanıldığı uçucu küllü karışımlardır. Bu karışımlarda SR tipi çimentoya göre C₃A miktarlarının yüksek olmasının, daha fazla klorür bağlamaya imkân verdiği, böylece direncin arttığı düşünülmektedir.

Klorür işlemeye karşı direnci en düşük betonlar, uçucu kül

kullanılmayan sülfata dayanıklı çimentolu karışımlardır.

SR içeren karışımlar UK'li ya da UK'siz karışımlar içerisinde klorür işlemeye karşı direnci en düşük karışımlardır.

Buna göre klorüre karşı direnç için aşağıdaki sıralama yapılabilir:

CEMIFA ≈ CEMIIFA > SRFA > CEMI ≈ CEMII > SR

Yukarıdaki sonuçlar beton sınıfından bağımsızdır.

Beton dayanımı arttıkça klorür işlemeye karşı direnç artmaktadır. Bu durum bağlayıcı tipinden bağımsızdır. Ayrıca dayanım arttıkça bağlayıcı tipinin klorür işleme üzerindeki etkisi azalmıştır. Diğer bir deyişle düşük dayanımlı betonlarda bağlayıcı tipinin etkisi daha çarpıcı bir şekilde görülmektedir. Buna göre daha yüksek dayanımlı betonların kullanılması durumunda (C50/60 ve üzeri), bağlayıcı tipinin öneminin de azalacağı söylenebilir. Sonuçlar su/bağlayıcı oranının azalması ile artan geçirimsizlikle betonun dayanıklılık özelliğindeki gelişmeyi göstermektedir.

İslanma-kuruma çevrimlerinin ilk aşamalarında çok hızlı bir şekilde klorür işleme söz konusudur. Dolayısıyla maruz kalmanın ilk devreleri çok kritiktir. Sonraki süreçlerde klorür işleme hızı azalmakta hatta bazı karışımlarda hiç artış olmamaktadır. 40 MPa gibi oldukça iyi bir değer üzerinde dayanıma sahip olan tüm betonlar (C25 serisi), sadece 2,5 ay içerisinde 10 ila 20 mm derinliğinde klorür geçirmiştir. Örneğin, yerine yerleştirilen betonun C35/45 sınıfında olması durumunda, laboratuvar ortamında bile en erken 1 haftada erişilebilecek olan bu dayanım mertebesine (40 MPa üzeri), inşaat yerinde daha uzun bir sürede ulaşılabileceği açıktır. Bu zaman zarfında beton klorür etkisine karşı çok hassastır. Dolayısıyla deniz suyuna maruz yapıların özellikle ıslanma-kuruma bölgelerinde kalan kesimleri için erken yüksek dayanıma yönelik tasarım yapılmalıdır.

Uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi mineral katkıları kullanılmadan yalnızca sülfata dayanıklı çimento kullanılması donatı korozyonu açısından risklidir. 43,7 MPa (bkz. Tablo 5) dayanıma sahip olan bir beton, 10 ay gibi kısa bir sürede 37,5 mm'lik bir klorür işleme derinliğine ulaşmıştır ki bu oldukça çarpıcıdır. Dolayısıyla bu tip çimento ile birlikte bir mineral katkı kullanılması oldukça faydalı olacaktır. Mineral katkı yanında beton sınıfını arttırmak, su/bağlayıcı oranını düşürmek, C40/50 ve üzeri beton sınıfını kullanmak ve pas payının mümkün olduğunca büyük tutulması önerilir.

Deniz suyuna maruz yapılarda bağlayıcı tipi ne olursa olsun pas payı mümkün olduğunca fazla olmalıdır. Ülkemizdeki beton sınıflarının mertebesi, mineral katkının tedarik olanakları, uzun yıllara dayalı bir maruz kalma ve erken yaşlarda beton dayanımının düşük olması gibi faktörler düşünüldüğünde, deniz suyu etkisinde özellikle ıslanma-kuruma bölgesinde kalan yapı elemanları için en az 50 mm pas payı kullanılmalıdır. Mi-

neral katkı kullanılmaması durumunda ve pas payı kalınlığı çatlak kontrolü açısından mümkün değilse daha yüksek beton sınıfları kullanılmalıdır.

Literatürde belirtilen, C_3A miktarının düşmesiyle klorür geçirimsizliğinin artması bu çalışmayla doğrulanmıştır. Sülfata dayanıklı çimento içerisinde çok az miktarda yer alan C_3A , ortamdaki klorürlerin tamamını ya da büyük bir kısmını bağlamaya yetmediği için, sülfata dayanıklı çimentonun en kötü performansı sergilemesine yol açmıştır. Bu durum mineral katkı kullanımı ve basınç dayanımından bağımsız olarak gerçekleşmiştir.

Yukarıdaki sonuçlar ıslanma-kuruma etkisinin yoğun olduğu yapı elemanları için geçerli olup, böyle bir etki yoksa ya da örneğin tamamen deniz suyuna gömülü bir yapı elemanı söz konusuysa, maliyeti düşürebilmek için daha ekonomik tasarımlar ve uygulamalar yapılabilir.

Deniz suyuna maruz yapılarla ilgili projelerin şartnamelerinde mutlak bir kriter olarak yer alan sülfata dayanıklı çimento kullanımı bu şartnamelerde zorunlu olmaktan çıkarılmalı,

malzeme tipine bağlı bir tasarım yerine alternatif hammadde kullanımı için önünü açan toplam performans yaklaşımına gidilmesinde büyük fayda bulunmaktadır. Yalın sülfat etkisi için etkili bir çözüm olan sülfata dayanıklı çimento, klorür etkisinin de yer aldığı birleşik bir etki durumunda yetersiz kalmaktadır. Ayrıca bu tip çimento ile mineral katkı kullanılması da yeterli olamamaktadır. Tüm bu gerekçelerle, sadece bağlayıcı tipi açısından bir değerlendirme yapıldığında, C_3A miktarı bağl olarak daha yüksek olan CEM I ve CEM II tipi çimentoların mineral katkıları ile olan kombinasyonlarının kullanılması klorür bağlama açısından önemlidir. Dayanım sınıfı açısından bakıldığında ise yüksek dayanımlı beton sınıflarının sağladığı geçirimsizlik özelliği deniz ortamında uzun ömürlü betonarme yapıların inşası için büyük bir avantajdır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 112M899 numaralı araştırma projesinin bir bölümü olup, yazarlar, sağladığı destek nedeniyle TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

1. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul, 2010.
2. ACI 222.3R-03 (2003). Design and construction practices to mitigate corrosion of reinforcement in concrete structures. Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute.
3. Andrade, C., Alonso, C. & Sarria, J. (2002). Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere. Cement and Concrete Composites, 24, 55-64.
4. Böhni, H. (2005). Corrosion in Reinforced Concrete Structures. Woodhead Publishing, Limited. 262 p.
5. Broomfield, J.P. (2003). Corrosion of steel in Concrete-understanding, investigation and repair. Taylor & Francis e-Library.
6. Polder, R. B. & Peelen W. H. A. (2002). Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. Cement and Concrete Composites, 24, 427-435.
7. TS EN 206 Beton- Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk.
8. ACI 357.R-84, Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures.
9. ACI 201.2R-01, Guide to Durable Concrete.
10. Zhang, M., H., Bremner, W., T., Malhotra, M., V., "The Effect of Portland Cement Type on Performance", Concrete International, January 2003.
11. Gerwick, B., C., "International Experience In The Performance of Marine Concrete", Concrete International, May 1990.
12. Nobuaki Otsuki, Shigeyoshi Nagataki, Kenji Nakashita (1993) Evaluation of the AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials, Construction and Building Materials, Vol 7, Issue 4, Pp 195-201.
13. E Meck, V Sirivivatnanon (2003) Field indicator of chloride penetration depth Cement and Concrete Research, Vol 33, Issue 8, Pp 1113-1117.