



OLİVİN ATIKLARININ BETONDA KULLANIMININ BETONARME DONATISININ KOROZYON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

¹Emre SANCAK, ²Ömer ÇOBAN

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, Isparta

¹emresancak@sdu.edu.tr, ²omer_coban_87@mynet.com

(Geliş/Received: 17.09.2014; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.01.2015)

ÖZET: Bu çalışmada, olivin atıklarının betonda kullanımı ile üretilen betonun, içerisine gömülü betonarme donatısının korozyona karşı koruma etkinliği araştırılmıştır. Bu etkinin araştırılması amacı ile yaygın olarak kullanılan C30 sınıfı beton, hedef basınç dayanımı olarak seçilmiştir. Referans beton ile karşılaştırılmak üzere çimento inceliğine kadar öğütülmüş olan olivin atıklarının (OA) kullanımı ile beton örnekler üretilmiştir. Olivin atıkları (OA) betonda çimentoyla, hacimce %5, %10, %20 ve %40 oranlarında yer değiştirilerek 150x150x150 mm'lik küp örnekler üretilmiş, 7 ve 28 gün 21±1°C'de normal su kürüne tabi tutulmuştur. Kür süreci sonunda OA'lı beton örneklerine sertleşmiş betonun yoğunluğu ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Sertleşmiş betonun yoğunluğu ve basınç dayanımı değerlerinde belirli oranlarda düşüş meydana gelmiştir. Ancak %5, %10 ve %20 oranlarında atık içeren örnekler hedef basınç dayanımı üzerinde dayanıma ulaşmışlardır.

C30 hedef basınç dayanımına ulaştığı belirlenen %5, %10 ve %20 oranlarında OA içeren beton karışımları ile Ø50x100 mm boyutlarındaki kalıplarda çelik donatılı Ø10 mm çapında düz yüzeyli donatılı betonarme (b.a.) örnekler üretilmiştir. Bu örnekler, 14 gün normal kür uygulandıktan sonra b.a. donatısının korozyon dirençlerinin belirlenmesi amacı ile %5'lik NaCl içeren çözelti ortamına alınmış ve bu çözeltide 17 hafta (yaklaşık 120 gün) boyunca her hafta Lineer Polarizasyon metodu uygulanarak Korozyon hızı, Rp, Ecor ve Icor değerleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, çimentonun %5 ve %10'u kadar OA kullanımı ile üretilen beton, çelik betonarme donatısının korozyon hızının, referans örnekler göre azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Beton, Olivin, Endüstriyel Atıklar, Basınç Dayanımı, Lineer Polarizasyon, Donatı Korozyonu

The Effect On Reinforcing Bar Corrosion Properties Of Usage Of Olivine Wastes On Concrete

ABSTRACT: In this study, the protection activity of the reinforcement embedded in the concrete produced by means of using olivine wastes was increased. With the aim of examining this efficiency, target compressive strength was determined as C30 and the concretes with wastes were produced by the use of olivine wastes (OW) ground to compare with the reference concrete. The olivine wastes were replaced with cement in the concrete in volumes of 5%, 10%, 20% and 40% and cube samples in size of 150X150X150 mm were produced. These were subjected to cure in 7 and 28 days in 21±1°C. Following the cure, compressive strength and density tests were performed on the hardened concrete. The values of the density of the hardened concrete and its compressive strength decreased at significant proportions. However, the samples including wastes at the proportions of 5%, 10% and 20% reached to the target compressive strength value. With the concrete mixtures including OW at the proportions of

5%, 10% and 20% reinforced concrete samples (central embedded steel reinforcing bar having a diameter of 10mm) were produced in molds in the dimensions of $\text{Ø}50 \times 100$ mm. To these samples, a normal cure was applied for 14-days and then they were put in the solution including 5% of NaCl to determine corrosion resistances of reinforced concrete included waste. Within this solution, Linear Polarization method was used each week for 17 weeks (nearly 120 days) and the values of the corrosion rate, R_p , E_{cor} and I_{cor} were measured. According to the results of the tests, it has been seen that with the use of OA of 5% and 10% in concrete, the corrosion rate of reinforcement decreased compared to the samples analyzed.

Keywords: Concrete, Olivine Wastes, Compressive Strength, Reinforcing Bar Corrosion

GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnşaat endüstrisinde, en yaygın kullanılan yapı malzemelerinin başında, agrega, su, çimento ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulan beton; yol, sulama kanal kaplamaları, köprüler, barajlar ve konutlar gibi bütün inşaatlarda yaygın kullanılmaktadır (Erdoğan,2003; Erdoğan ve Kurbetçi,2003;Topçu vd.2006; Uygunoğlu, 2008; Şimşek, 2012). Betonarme yapılar, hizmet verdiği müddetçe, deniz suyunda yada buzlanma ile mücadele amacı ile kullanılan buz çözücü tuzlarda fazla miktarda bulunan klorürün etkisinden dolayı çelik donatının paslanması ve betonun parçalanması ile kısa sürede kullanım dışı kalabilmektedir (Erdoğan, 2003). Korozyon, metallerin içinde buldukları ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlara girerek metalik özelliklerini kaybetmeleri olayıdır (Yalçın ve Koç, 1999).

Beton içerisinde bulunan çeliğin korozyon hızı büyük oranda çevre koşullarına bağlı olup; korozyonun oluşabilmesi için oksijen ve nemin bir arada bulunması gereklidir. Klorür iyonu; oksijen ve nemli ortamda başlamış olan korozyonun hızını arttırırken, betonun ıslanma kuruma gibi olaylara maruz kalmasıyla korozyon daha da şiddetlenmektedir. Beton karışımının bileşimi ve pas payı korozyon oluşumunda önemli rol oynar (Ergi vd., 2007).

Betonun özelliklerini iyileştirmek için beton kompozisyonları çeşitli katkılarla geliştirilmiştir. Bunlar arasında, başlangıçta atık bertaraf problemini azaltmak için betona ilave edilen çeşitli endüstriyel atık ürünleri yer almaktadır(Khatri et al.2004). Öncelikle atık bertaraf problemini çözmek için betonda değerlendirilmişlerse de yıllar içinde beton özelliklerine olumlu etkiledikleri görülmüştür. Bunlara kağıt üretiminden ortaya çıkan lignosülfonat, ferrokrom işletmelerinden salınan silis dumanı ve termik santral baca külleri ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi yaygın kullanılan atıklar örnek olarak verilebilir (Millrath, 2003; Khatri et al.2004). Endüstriyel atık olarak da tanımlanabilen bu atıkların depolanması ya da doğaya bırakılması çevre kirliliği dahil olmak üzere çok büyük güçlükleri ve sorunları doğurmaktadır.

Betonarme demirlerinin korozyonunun engellenmesi amacı ile biri CEM I ile diğeri çimento yerine %30 oranında Uçucu Kül (UK) içerecek şekilde hazırlanmış çeşitli klorür konsantrasyonlarındaki iki grup beton örneği üzerinde betonarme demirlerinin korozyon hızlarına etkisini araştıran Asan ve Yalçın (2003), %30 UK ve 2.5 kg/m^3 klorür içeren betonlarda, çelik donatı yüzeyindeki pasifliğin bozulduğunu, ancak aynı aşamaya, CEM I çimentolu betonlarda, 1.5 kg/m^3 klorür içeriği ile ulaşıldığını açıklamışlardır. UK'nun betonarme donatısının korozyonuna karşı olumlu etkisini belirleyen bir diğer araştırmada ise Khatri et al. (2004) sadece normal portland cement içeren 20 mm paspayına sahip referans betonların dayanımı 56 Mpa iken servis ömürleri 1210 gün, % 30 FA içeren betonların 50,5 MPa'lık bir dayanıma sahip olmasına rağmen 1761 günlük, % 65 GGBFS içeren betonların dayanımı; 51 MPa iken 1754 günlük servis ömrüne ulaştıkları belirtilmiştir.

Yalçın ve Ergün (1996) tarafından yapılan bir araştırmada; beton içerisindeki çeliğin korozyonuna asetat ve klorür iyonlarının etkileri araştırılmıştır. Klorür ve asetat içeren karışımlardan oluşan betonlardaki çelik donatının başlangıç korozyon hızları, katkısız karışımla karşılaştırıldığında daha

yüksek bulunmuştur. Korozyon hızları ilk günlerde çok yüksek iken zamanla azalmıştır. Beton korozyon katsayısının, çalışmalarında kullandıkları bütün beton tipleri için $1.1 \times 10^{-3} \text{gün}^{-1}$ olarak alınabileceği belirtilmiştir. Asetat anyonunun klorür iyonları kadar agresif olmadığı dolayısı ile buz çözücü olarak asetatin sodyum klorüre tercih edilmesini önermişlerdir.

Haberal (2010), çalışmasında CEM I 42.5 R çimento ve çimento yerine %15, %30 ve %45 oranlarında uçucu kül (UK) kullanarak beton karışımları hazırlamış ve örnekleri 28 ve 56 gün, dış ortamda ve suda olmak üzere, iki farklı kür uygulamıştır. Sonuç olarak; UK kullanımının basınç dayanımını düşürdüğünü, klor iyon geçirimsizliğini azalttığını, hızlandırılmış korozyon deneyi sonrasında beton içerisindeki donatının korozyona uğradığını, hasar oluşum sürelerinin kullanılan UK'ün miktarına, kür süresine ve tipine göre farklılıklar gösterdiğini, kullanılan UK miktarının artmasıyla da hasar oluşum sürelerinin arttığını belirtmiştir.

Karaboğa (2012), çalışmasında, betona, toplam bağlayıcı miktarının %0, % 1.5, % 3 ve % 5 oranlarında NaCl katılması ile klorür kirlenmesi sağlamıştır. Metakaolin katkısının korozyon direnci üzerindeki etkisini irdelemek amacıyla, bu malzemeyi toplam bağlayıcı miktarının %5 ve %15 oranında çimento ile yer değiştirerek kullanmıştır. Betonların elektriksel direncini ölçerek, metakaolinin yüksek klorür içeriklerinde de aktif korozyonun önlemesi bakımından etkili olduğunu bildirmiştir.

Aköz ve Çakır (2013), yaptıkları çalışmada betonun bazik özelliğe sahip olmasına rağmen çevresel etkiler sebebiyle oluşan korozyonun betonun ara yüzünde aderans kaybına sebebiyet verdiğini, hasarların en aza indirilmesi için betonun basınç dayanımının yüksek, geçirimsizliğinin düşük, örtü betonu kalınlığının yeterli ve sürekli olması gerektiğini bildirmiştir.

Araştırmanın önemi ve kapsamı (Research significance and target)

Bu çalışma ile ulusal ve uluslararası bilimsel ve endüstri çevrelerine katkı sağlayacağı düşünülen, yapılan literatür çalışmalarında daha önce böyle bir araştırmaya ilişkin döküman bulunamayan, öncelikle atıklardan kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması amacı ile maden atıklarından olivin atıklarının (OA) betonda kullanımıyla durabilite özellikleri çerçevesinde korozif ortamdaki donatı korozyonuna karşı, betonun davranışının belirlenmesi amaçlanmıştır. Olivin atıklarının (OA) C30 sınıfı betonu elde etmek bakımından sınır basınç dayanımı değerlerini sağlaması eşik olarak kabul edilmiş, bu çalışma ile mekanik özelliklerde bir gelişme sağlamaktan daha çok durabilite özelliklerine odaklanılmıştır. OA'nın hedef basınç dayanımını düşürmeden korozyonunun engellenmesine katkıda bulunması ana hedeftir.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Materyal (Material)

Çalışmada, çimento, agrega, karışım suyu, olivin atıkları, betonarme çeliği, referans elektrot, karşıt elektrot, NaCl çözeltisi materyal olarak kullanılmıştır. Araştırmada kullanılan materyallerin özellikleri ilgili standartlara uygunluğu dikkate alınarak bu bölümde açıklanmıştır.

Çimento (Cement)

Beton karışımlarında, Isparta Göltaş Çimento Fabrikası'nda üretilen CEM I 42,5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. TS EN 197-1' e uygun olan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 1' de verilmiştir.

Agrega (Aggregate)

Örneklerin üretiminde kullanılan 0-2 mm, 2-4 mm, 4-8 mm aralıklarındaki kırma taş agregaları Isparta Atabey ilçesinden temin edilmiştir. Agregalar, TS 3530 EN 933-1' e göre tane büyüklüğü dağılımı, TS 3529' a göre gevşek-sıkışık birim ağırlık tayini, TS 3526' ya göre özgül ağırlık ve su emme oranı, TS EN 1744-1' e göre organik madde oranı tayini deneyleri yapılarak kullanılmıştır. Karışımda kullanılan agreganın fiziksel özellikleri Çizelge 2' de, karışımda kullanılan agreganın granülometrik dağılımı Çizelge 3.'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çimentonun kimyasal analizi, fiziksel, ve mekanik özellikleri (*Chemical analyses, physical and mechanical properties of the cement*)

Kimyasal Analizler		
Oksit (%)	CEM I 42,5 R	TS EN 197-1
SiO ₂	19.87	(SiO ₂ + CaO) ≥ %50
CaO	63.65	
Al ₂ O ₃	4.11	≅ %6
Fe ₂ O ₃	3.44	≅ %3
MgO	1.61	≤ %5
SO ₃	2.53	≤ %4
Na ₂ O	0.12	(Na ₂ O+ K ₂ O) ≤ %0.6
K ₂ O	0.48	
B ₂ O ₃	-	-
C ₃ S	65.52	C ₃ S+ C ₂ S ≥ %66.7
C ₂ S	6.44	
C ₃ A	5.04	-
C ₄ AF	10.47	-
Cl ⁻	0.004	≤ %0.10
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	3.16	-
Blaine (incelik) modülü (cm ² /gr)	3440	2800-4000
Priz Başlama Süresi (dakika)	155	≥ 60
Hacimsel Genleşme (mm)	0.8	≤ 10
Mekanik Özellikler		
2 günlük basınç dayanımı (N/mm ²)	23.6	≥ 20
7 günlük basınç dayanımı (N/mm ²)	42.1	-
28 günlük basınç dayanımı (N/mm ²)	50.2	≥ 42.5 ≤ 62.5

Çizelge 2. Karışımlarda kullanılan agreganın fiziksel özellikleri (*Physical properties of the aggregate used in mixes*)

Deneyin Adı		0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm	Standart
Birim Ağırlık (kg/dm ³)	Gevşek	1642.83	1533.25	1520.08	TS 3529
	Sıkışık	1841.67	1629.33	1635.25	TS 3529
Özgül Ağırlık (kg/m ³)		2530	2610	2660	TS 3526
Su Emme Oranı (%)		3.43	2.01	0.74	TS 3526
Organik Madde Oranı		Yok	Yok	Yok	TS EN 1744-1

Çizelge 3. Karışımlarda kullanılan agreganın granülometrik dağılımı (*Particle size distribution of the aggregate used in the mixes*)

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)		
	0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm
8	100	100	100
4	100	100	0
2	100	0	0
1	63	0	0
0.5	35	0	0
0.25	25	0	0
PAN	0	0	0

Karışım suyu (Mixing water)

Beton karışım suyu olarak Isparta, Süleyman Demirel Üniversitesi şebeke suyu kullanılmıştır.

Olivin atıkları (Olivine wastes)

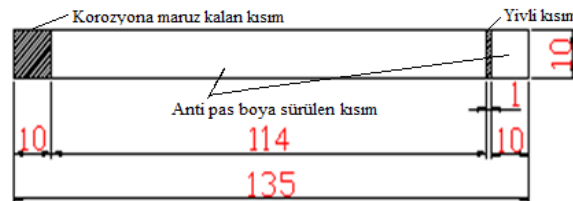
Beton karışımlarında kullanılan çimento ile hacimce yer değiştirilerek kullanılacak olan OA Bursa-Orhaneli yöresi Şetat Madencilik A.Ş.'nin atık sahasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan OA'nın kimyasal özellikleri Çizelge 4' de verilmiştir.

Çizelge 4. OA'nın kimyasal özellikleri (Kanarya, 2010) (*Chemical compounds of olivine*)

Kimyasal Bileşim	% Ağırlık
MgO	43.6-50.3
Fe ₂ O ₃	7 - 9
SiO ₂	36.8-40.2
Al ₂ O ₃	0.2-0.4
Ateş kaybı	0.8-11

Betonarme çeliği (Reinforcing steel)

Korozyon ölçümleri için donatılı beton üretiminde, Ø50/100 mm silindir örneklerde kullanılmak üzere Ø10 mm'lik düz (nervüzsüz) betonarme çelikleri, 135 mm boyunda kesilerek, yüzeyleri temizlenmiş ve bir kenarından çapı 10 mm, boyu 10 mm' lik 392 mm² lik bir silindir alan korozyona uğratılmak üzere boyanmadan bırakılmıştır. Bu alan haricindeki diğer kısımlar üç kat antipas boya ile boyanmıştır. Ayrıca elektronik ölçümlerin yapılması amacıyla donatının diğer ucunda 1mm' lik derinliği ve genişliği olan bir yiv açılmıştır. Açılan yivlere elektriği iletmesi için yumuşak bakır kablo bağlanmıştır. Örneklerde kullanılan betonarme çeliği Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Kullanılan betonarme çeliğinin şeması (*Schematic details of reinforcing bar*)

Betonarme çeliğinin kimyasal özellikleri Çizelge 5.' de verilmiştir.

Çizelge 5. Betonarme çeliğinin kimyasal özellikleri (*The chemical compounds of reinforcing steel bar*)

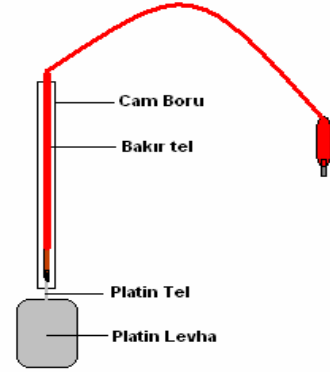
Oksit	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu
(%)	0.13	0.21	0.50	0.023	0.026	0.052

Referans elektrot (Reference electrode)

Doygun kalomel elektrot (SCE) korozyon ölçümleri için referans elektrot olarak potansiyel değeri belirlemek amacıyla seçilmiştir (Şekil 2.).

Karşıt elektrot (Counter electrode)

Karşıt elektrot olarak 200 mm²'lik yüzey alana sahip platin elektrot kullanılmıştır. Platin levhaya bir bakır tel lehimlenerek sabitlenmiştir. Şekil 3'de verilen bakır tel şeffaf bir cam borunun içine alınarak bakır telin çevreyle teması kesilmiştir.

**Şekil 2.** Referans elektrot
(*Reference electrode*)**Şekil 3.**
elektrot (Değirmenci,
2006) (*Counter electrode*)

Karşıt

Korozif Ortam (Corrosive Environment)

Betonarme donatılı örneklerin korozyonunu ölçmek için iletken bir ortam sağlamak ve betonarme silindirik örnekler için korozif bir ortam oluşturmak için % 5'lik NaCl çözeltisi kullanılmıştır.

Yöntem (Method)**Örneklerin hazırlanması ve kodlanması (Samples preparation and classification)**

Bu çalışmada, öncelikle inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan TS EN 206-1'e uygun C30 beton sınıfı, hedef basınç dayanım sınıfı olarak belirlenmiş ve TS 802'e uygun olarak karışımlara girecek malzeme miktarları hesaplanmıştır. Hesaplamalar esnasında çalışmada kullanılacak agrega d_{max} 8 mm seçilmiş ve agrega aralığı Fuller Parabolü prensibine göre hesap edilerek 0-2 mm % 50, 2-4 mm % 20, 4-8 mm % 30 olarak belirlenmiştir. Ardından OA, 0-200 µ aralığına gelinceye kadar bilyeli değirmenle öğütülmüştür. Öğütülen OA, beton tasarımında hacimce %5, %10, %20, %40 oranlarında çimentoyle yer değiştirilerek kullanılmıştır. OA'nın kullanıldığı beton karışımlarının S/Ç (su/çimento) oranı 0.40

seçilmiştir. Tüm malzemeler hazırlandıktan sonra tartılmış ve dikey eksenli beton mikseriyle karışım işlemleri yapılmıştır. Karışımlar 3 adeti 7 günlük, 3 adeti de 28 günlük (mekanik deneyler için) kür koşullarına tabi tutulmak üzere 6 adet referans, 6 adet % 5'lik, 6 adet % 10' luk, 6 adet % 20'lik, 6 adet % 40'lık olivin atıklı olmak üzere toplam 30 adet örnek üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu örneklere yoğunluk, basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Bu deney sonuçlarının paralelinde hedef basınç dayanımı içerisinde yer alan %5, %10 ve %20 OA'lı örneklerden korozyon deney ölçümlerinde kullanılmak üzere; Ø10'luk düz betonarme demir donatılı Ø5/10'luk silindirik örnekler üretilmiştir. Korozyon örnekleri 5 adet referans (katkısız), 5'er adet de diğer ikame oranlarının her birinden ayrı ayrı olacak şekilde toplam 25 adet hazırlanmıştır. Karışımda kullanılan malzeme oranları Çizelge 6' da verilmiştir.

Çizelge 6. m³ beton için karışım oranları (kg) (Concrete mixture proportions for 1m³)

Malzeme Türü ve Oranları	Referans	O-5%	O-10%	O-20%	O-40%
8-4 mm İri Argera (kg/m ³) 30%	503	503	503	503	503
4-2 mm İnce Agregası (kg/m ³) 20%	329	329	329	329	329
2-0 mm İnce agregası (kg/m ³) 50%	797	797	797	797	797
Olivin Atığı	0	22,5	45	90	180
Çimento	475	449	427	379	284
Su	190	190	190	190	190

Örneklerin kodlanması: R ve 0 simgesiyle C30 dayanımında dökülmüş katkısız beton örnekleri, O5, O10, O20 ve O40 ifadeleri, %5, %10, %20 ve %40 oranlarında çimento ile hacimce yer değiştirilerek betona ikame edilen C30 dayanımını hedeflenerek dökülen olivin atıklı beton örnekleri ifade etmektedir.

Sertleşmiş betonun yoğunluğu (Hardened concrete specific gravity)

7 ve 28 gün kür havuzlarında bekletilen sertleşmiş beton örneklerinin TS EN 12390-7' ye göre doygun kuru yüzey (DKY) ağırlıkları belirlenerek Arşimet terazisi yardımıyla yoğunlukları Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} - m_w) - m_{st}]}{p_w} \quad (2.1)$$

$$D = \frac{m}{V} \quad (2.2)$$

Burada;

V: Örnek hacmi, (m³)

m_a: Örneğin havadaki kütlesi, (kg)

m_{st}: Kefenin su içerisindeki görünür kütlesi, (kg)

m_w: Örneğin su içerisindeki görünür kütlesi, (kg)

p_w: Suyun 998 kg/m³ olarak kabul edilen, 20°C sıcaklıktaki yoğunluğu,

D: Örneğin nem ve hacim tayini metoduna bağlı birim hacim kütlesi, (kg/m³),

m: Örneğin deney esnasındaki durumuna bağlı kütlesini, (kg) belirtmektedir.

Basınç dayanımı deneyi (Compression strength on concrete specimens)

7 ve 28 gün kür havuzunda bekleyen beton örnekleri kür havuzundan çıkarılmış ve DKY (doğru kuru yüzey) durumuna getirilerek TS EN 12390-3'e uygun olarak 300 ton kapasiteli basınç dayanımı cihazıyla kırılma yükleri elde edilmiştir. Basınç dayanım değerleri Denklem 2.3 ile hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2.3)$$

Burada;

f_c : Deney örneğinin basınç dayanımı, (N/mm²)

F: Kırılma yükü, (N)

A_c : Uygulama yönüne dik deney örneği kesit ortalama alanını, (mm²) belirtmektedir.

Lineer polarizasyon uygulaması (Linear polarization application)

Korozyon ölçümleri için üretilen örnekler 14 gün normal kür ortamında bekletildikten sonra 17 hafta boyunca %5'lik NaCl ortamına maruz bırakılmışlardır. 17 hafta boyunca belirli zaman aralıklarında Lineer Polarizasyon ölçümüne tabi tutulmuşlardır. Lineer polarizasyon ölçümlerinde, I_{cor} (korozyon akımı), R_p (polarizasyon direnci), $E_{(t=0)}$ (korozyon potansiyeli) ve korozyon hızı sonuçları bulunmuştur. Betonarme donatısı korozyon araştırmalarında Half-cell potential tekniğine karşın daha doğru sonuçlar verdiği; Khatri et al (2004) 'ye göre sağlıklı değerlendirmeler yapılmasını sağlayan polarizasyon direncinden de faydalanılmıştır. Korozyon ölçümleri PAR marka potansiyostat cihazı kullanılarak üç elektrot ölçüm yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Korozyonu ölçümleri için oluşturulan ölçüm düzeneğinde, korozif ve iletken ortam olarak % 5'lik NaCl çözeltisi, karşıt elektrot olarak platin, referans elektrotu olarak da doymuş kalomel elektrot (SCE), çalışma elektrodu olarak silindirik beton örneğe merkezi olarak gömülü olan betonarme donatısı kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Donatı korozyonu belirleme düzeneği (Experimental setup for reinforcement corrosion determination)

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

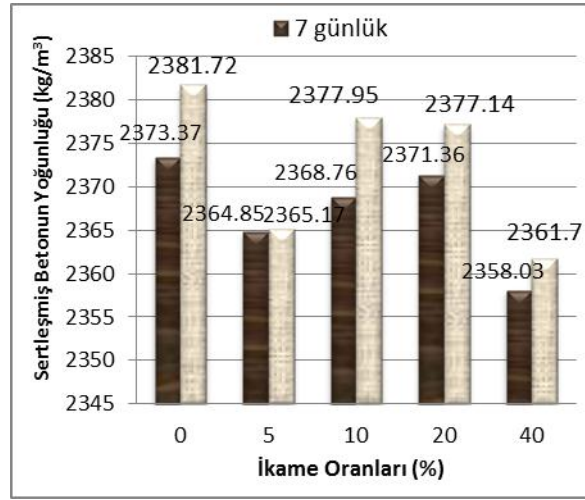
Sertleşmiş betonun yoğunluğu (Hardened concrete specific gravity)

Referans ve OA içeren sertleşmiş beton örneklerin TS EN 12390-7'ye göre bulunan yoğunlukları Şekil 5'de verilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Sertleşmiş betonun yoğunluğu (Hardened concrete specific gravity)

Referans ve OA içeren sertleşmiş beton örneklerin TS EN 12390-7'ye göre bulunan yoğunlukları Şekil 5'de verilmiştir.



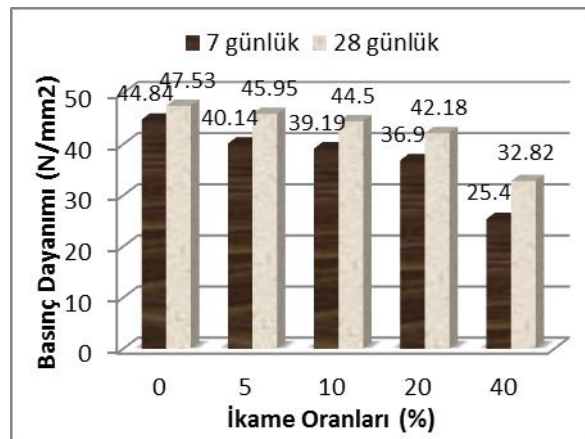
Şekil 5. Sertleşmiş beton örneklerinin yoğunlukları (kg/m³) (Specific gravity of hardened concrete specimens)

OA'lı betonlardan elde edilen değerler, referans örneklerle karşılaştırıldığında 7 günlük %5' lik OA içeren örneklerde yoğunluk %0.36, %10 OA'lı %0.19, %20 OA'lı örnekte; %0.08, %40 OA'lı örnekte %0.65 oranında azalma görülmüştür. 28 günlük değerler için ise, %5 OA'lı örnekte %0.69, %10 OA'lı örnekte %0.15, %20 OA'lı örnekte % 0.19, %40 OA'lı örnekte %0.84 oranında azalma meydana gelmiştir. Buna göre OA miktarı arttıkça genel olarak sertleşmiş betonun yoğunluğunda çok düşük olmakla birlikte bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu azalma olivin atıkların yoğunluğunun (OA: 3.00 g/cm³) çimento yoğunluklarına (3.16 g/cm³) göre daha az bir değere sahip olmasıyla ilgili olabilir.

Benzer olarak Emiroğlu vd., (2011), çalışmalarında yüksek fırın cürufunun %10, %20 ve %30 oranlarında çimentoya ikamesinin referans betona göre sertleşmiş betonun yoğunluğu değerlerini azalttığını bildirmiştir.

Basınç Dayanımı Değerleri (Compressive strength values)

7 ve 28 günlük referans ve OA'lı sertleşmiş beton örnekleri TS EN 12390- 3'e uygun olarak basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuş ve elde edilen değerler Şekil 6'de verilmiştir.



Şekil 6. Sertleşmiş beton basınç dayanımları (N/mm²) (The compressive strength of hardened concrete)

Elde edilen değerler karşılaştırıldığında, referans örneklere (%0) göre OA'lı betonların atık oranı arttıkça basınç dayanımlarında düşüş eğilimi görülmüştür. 7 günlük basınç dayanımlarına göre referans örneklerden, %5 OA içeren betonlarda %10.48, %10 OA içeren örneklerde % 12.60, %20 OA içerenlerde

%17.71, %40 OA içeren betonlarda %43.35 oranında azalma kaydedilmiştir. OA katkı oranları %5, %10, %20, %40 olan 28 günlük örneklerde referans örneklere göre sırasıyla %3.32, %6.37, %11.26, %30.95

dayanım kaybı olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte % 40 OA içeren beton örnekler haricindeki diğer katkı oranları (%5, %10, %20) için hedeflenen basınç dayanımı C30 elde edilmiştir.

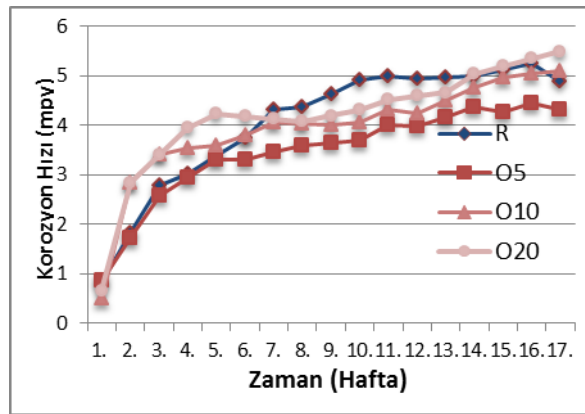
Yiğiter, (2008), çalışmasında UK ve yüksek fırın cürufunu çimentoya %15-30-45-60 oranlarında ikamesinin referans betona göre atık oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerini azalttığını bildirmiştir.

Lineer Polarizasyon Sonuçları (Linear polarization results)

%40 OA'lı örneklerin hedeflenen C30 dayanımının altında kalmaları nedeni ile betonarme çeliği içeren silindirik örnekler O5, O10, O20 karışımları ile üretilmiştir. Üretilen örneklerden elde edilen bulgular bu bölümde verilmiştir.

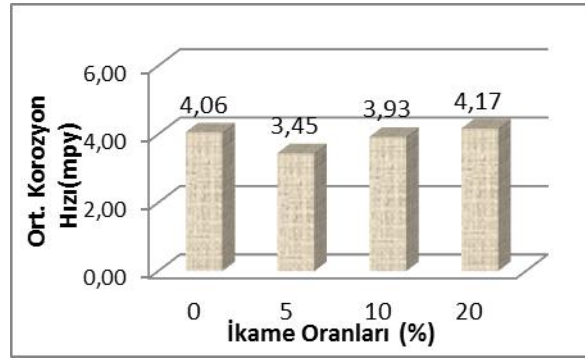
Korozyon hızı sonuçları (Corrosion rate results)

17 hafta boyunca %5 NaCl içeren ortamda korozyona maruz bırakılan referans ve OA'lı örneklerin korozyon hızları ölçülmüş ve ölçümlerle elde edilen deney sonuçları Şekil 7'de, 17 hafta boyunca elde edilen sonuçların aritmetik ortalamaları Şekil 8'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 7. Zamana bağlı korozyon hızı-atık oranı değişimi (Variation of corrosion rate-waste ratio with time)

Şekil 7 incelendiğinde OA içeren örneklerin, referans örneklere göre korozyon hızı bakımından benzer eğilim sergilediği söylenebilir. %5 OA içeren örnekler korozyon hızı açısından referans örneklere göre en iyi performansı göstermiş olup %10 OA içeren örnekler ise %5 OA'lı örneklere göre korozyon hızını arttırmış olmalarına karşın referans örneklere kıyasla iyi bir performans göstermiştir. %20 OA içeren örnekler ise 6. haftadan 13. haftaya kadar referans örneklerden daha iyi performans göstermiş 14. haftadan itibaren referans örneklere göre korozyon hızı artmıştır. OA'lı betonarme korozyon örneklerinin 17 haftalık korozyon uygulama süreci boyunca elde edilen değerlerin ortalama korozyon hızı ölçüm değerleri Şekil 8.'de sunulmuştur.

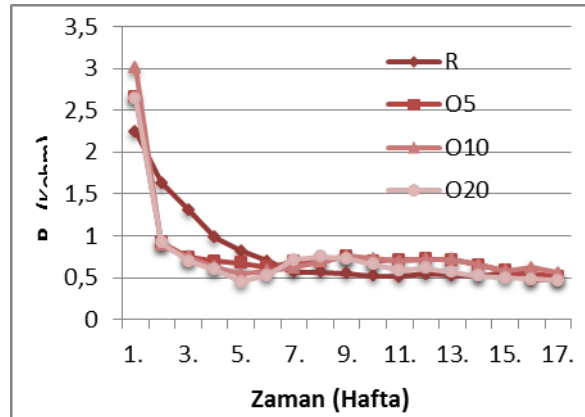


Şekil 8. Örneklerde atık oranına bağlı 17 haftalık ortalama korozyon hızı değerleri
(Figure 3.4. Mean corrosion rate values for 17-week depending on waste ratio used in specimens)

Şekil 8’de referans örneklere (%0) göre OA’nın %5 ve %10 oranlarında kullanımı ile korozyon hızında sırasıyla %15.05 ve %3.20 oranında azalma meydana gelmiştir. %20 OA’nın kullanım oranı için referans örneklere göre korozyon hızında %2.71 oranında artış gözlemlenmiştir. Korozyon hızı açısından %5 ve %10 OA kullanımının korozyon hızını düşürerek betonun durabilitesine olumlu katkı sağlayacağı söylenebilir.

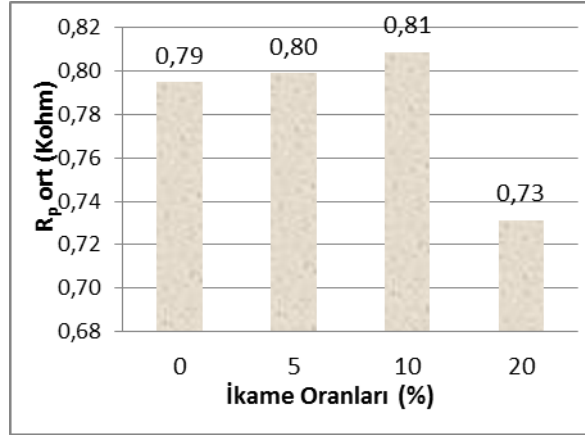
Polarizasyon direnci (R_p) değerleri (Polarization resistance values)

17 hafta boyunca korozyona maruz bırakılan OA’lı örneklerin polarizasyon dirençleri (R_p) ölçülmüş elde edilen deneysel bulgular Şekil 8 zamana bağlı değişimi ifade eden ve Şekil 8’de ise 17 haftalık korozyon süreci sonunda elde edilen ortalamaları belirten grafikler olarak verilmiştir.



Şekil 9. Donatılı örneklerde zamanla polarizasyon direnci (R_p)-atık oranı değişimi (Variation of polarization resistance-waste ratios with time)

Şekil 9 incelendiğinde genel olarak tüm örneklerin polarizasyon dirençlerinin zamana bağlı olarak düştüğü ve birbirine benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir.

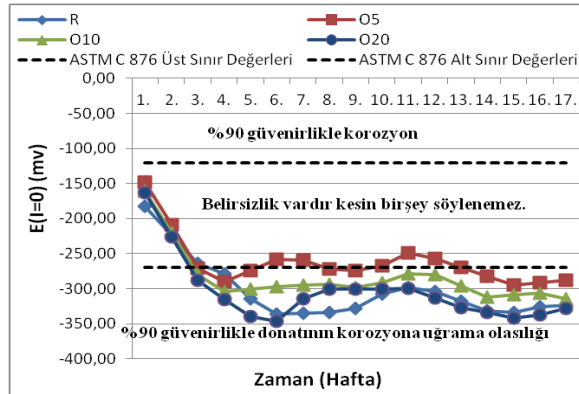


Şekil 10. 17 haftalık ortalama polarizasyon direnci-atık oranı değişimi (R_p) (Mean polarization resistance for 17-week depending on waste ratio)

Şekil 10 incelendiğinde OA'lı örneklerin, referans örneklere göre polarizasyon direncinin büyük bir değişim sergilemediği görülmektedir. OA kullanımı ile polarizasyon direnci değerleri referans örneklere göre %5 OA için %1.27, %10 OA için %2.53 oranında; %20 OA için ise %7.59 oranında azalmıştır.

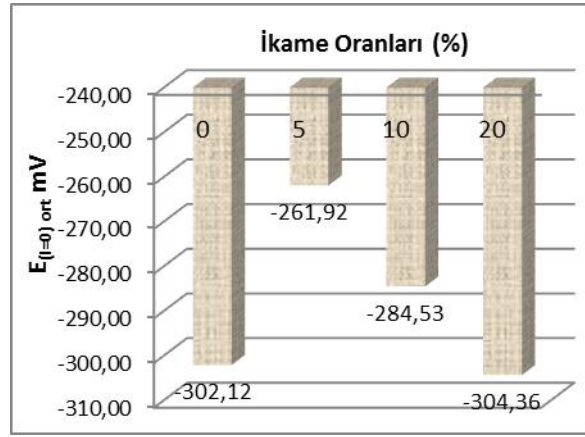
Korozyon potansiyeli ($E_{(t=0)}$) bulguları (Corrosion potential results)

17 hafta boyunca %5 NaCl içeren korozif ortama maruz bırakılan OA'lı orta noktasından donatılı örneklerin korozyon potansiyelleri ($E_{(t=0)}$) potansiyostat cihazı ile ölçülmüştür ve bulgular bu bölümde verilmiştir. Ölçümler sonucunda elde edilen deney sonuçlarına ilişkin grafikler, Şekil 11 ve Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 11. Örneklerde korozyon potansiyeli ($E_{(t=0)}$)-atık oranı ilişkisi (Variation of corrosion potential-waste ratio on specimens)

Şekil 11 incelendiğinde bütün değerler %90 olasılıkla korozyon bölgesinde kalmakla birlikte OA kullanımının referans örneklere göre korozyon potansiyeli ($E_{(t=0)}$) değerlerini, %5 ve %10 oranlarında OA kullanımı durumunda azaltırken, %20 oranında kullanım durumunda ise arttırdığı belirlenmiştir.



Şekil 12. 17 haftalık ortalama korozyon potansiyeli ($E_{(t=0)}$) değişimi (Mean corrosion potential variation for 17-week)

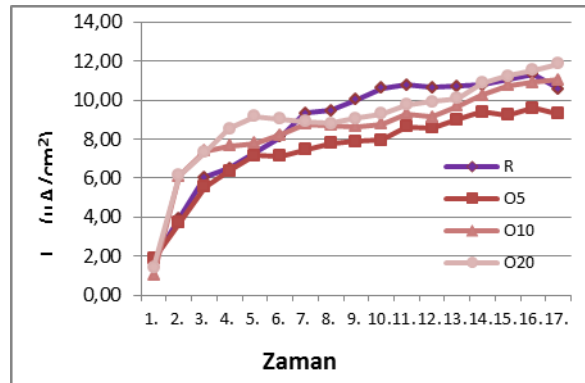
Şekil 12 incelendiğinde olivin atığı kullanımı ile referans örneklere (%0) göre korozyon potansiyeli ($E_{(t=0)}$) değerleri %5 OA için % 13.51 oranında, % 10 OA için %5.82 oranında azaldığı, % 20 OA için ise % 0.74 oranında arttığı belirlenmiştir.

Benzer olarak, Sancak ve Şimşek, (2008), çalışmalarında hafif bims beton ve normal agregalı betonlarda, %10 oranlarında çimentoyla ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılan silis dumanı ve %2 oranında süper akışkanlaştırıcının, %7 NaCl oranında 17 ıslanma-kuruma çevrime sonunda beton örneklerin içindeki çelik donatının korozyon potansiyelini azaltma eğilimi olduğunu bildirmişlerdir.

Keleştemur ve Demirel (2010) ise çalışmalarında ince öğütülmüş pomzayı betonda çimento ile %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilmesiyle üretilen beton örneklerin %3 'lük NaCl çözeltisinde 160 gün boyunca korozyona maruz kalması sonucunda korozyon potansiyelini arttırdığını açıklamışlardır. Aynı çalışmada %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ince öğütülmüş pomza ve % 10 silis dumanını birlikte çimentoyla yer değiştirerek ürettikleri örneklerde ise korozyon potansiyelinin azaldığını bildirmişlerdir.

Korozyon akımı (I_{cor}) bulguları (Corrosion current results)

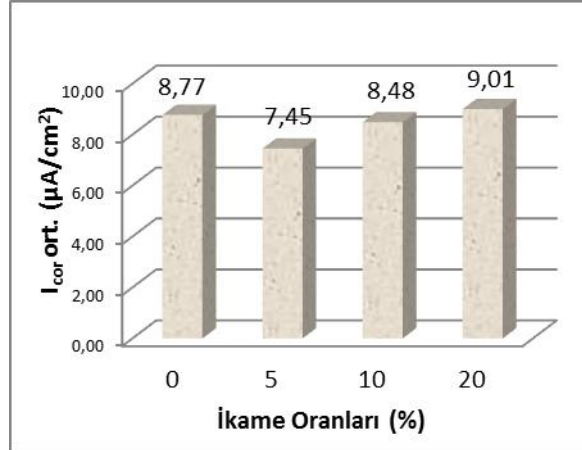
17 hafta boyunca korozyona maruz bırakılan OA'lı örneklerin korozyon akım yoğunlukları (I_{cor}) ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda elde edilen deneysel bulgular Şekil 13, Şekil 14'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 13. Beton örneklerde korozyon akımı (I_{cor})-atık oranı ilişkisi (Variation of Corrosion current-waste ratio on concrete specimens)

Şekil 13 incelendiğinde korozyon süresinin ilk 5 hafta boyunca %5 OA kullanılan örneklerin korozyon akım yoğunluğu değerleri referans örneklerden elde edilen değerlerle paralel değişirken, 7.

haftadan sonra %5, %10 ve %20 oranlarında OA kullanımının korozyon akım yoğunluğunu referans örneklerle göre azalttığı görülmüştür. Korozyon sürecinin 14. haftasından sonra en düşük korozyon akımları sırası ile %5 ve %10 OA kullanılan örneklerde ölçülürken referans örnekler ve %20 OA kullanılan örnekler daha yüksek korozyon akımı değerleri sergilemişlerdir.



Şekil 14. 17 haftalık ortalama korozyon akımı (I_{cor}) –atık oranı değişimi (Variation of mean corrosion current-waste ratio for 17 weeks)

Şekil 14 incelendiğinde OA'nın %5 ve %10 oranlarında kullanımı ile referans örneklerle (%0) göre korozyon akımı (I_{cor}) değerlerinin sırasıyla %15.05 ve %3.31 oranlarında azaldığı gözlenmiştir. % 20 OA kullanımının ise korozyon akımını %2.74 oranında arttırdığı görülmüştür.

Benzer bir sonuç, Baradan ve Yiğiter (2008)'in, çalışmalarında çimento yerine kullanılan %40 UK (uçucu kül) ve %10 silis dumanlı normal beton ile yüksek performanslı betonu %3.5 NaCl çözeltisinde 200 çevrime kadar ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulmasının ardından %40 UK'ün, %10 silis dumanından daha iyi performans göstererek katkısız betonlara göre korozyon akımını azalttığını bildirilmiştir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada olivin atıklarının betonda çimento yerine ikame edilerek kullanımının betonarme donatısının korozyonuna etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

OA oranının artışıyla sertleşmiş betonun yoğunluğunda referans betonun yoğunluğuna oranla yaklaşık %1 oranında azalma meydana gelmiştir.

OA'lı beton örneklerden elde edilen basınç dayanımı değerleri, referans örneklerle göre genel olarak katkı oranı arttıkça azalma eğilimi sergilemişlerdir. Bu azalma eğilimine rağmen %40 OA'lı örneklerin haricindeki (%5,%10 ve %20) örnekler bu çalışmada hedef basınç dayanımı olan C30'un üzerinde kalmışlardır.

17 haftalık korozyon ölçüm süreci boyunca ölçülen korozyon hızı ortalamalarına göre %5-%10 OA'lı örneklerin değerleri, Referans örneklerle göre nispeten düşük kalmıştır. OA'lı örneklerden %20 atık içeren örnekler en yüksek korozyon hızı değerlerine sahiptirler.

OA'lı ve referans örneklerin, %5 NaCl çözeltisine 17 hafta süresince maruz bırakılmalarına bağlı olarak ölçülen polarizasyon dirençlerinin (R_p) zamanın artışına bağlı olarak düşüş eğilimi sergilemiştir. OA'lı örnekler ise ortalama R_p değerleri açısından iyiden kötüye doğru atık içerik oranına göre %10, %5, R, %20 sıralanmıştır(sırası ile 0.81-0.80-0.79-0.73Kohm). OA'nın çimento yerine %5 ve %10 oranlarında kullanımının betonun R_p değerini artırması nedeni ile korozyona karşı OA'lı betonun içerisindeki donatı çeliğini en az, referans beton kadar koruyabilir.

OA'lı ve referans örneklerden elde edilen korozyon potansiyel değerleri ($E_{(t=0)}$) korozyon sürecinin ilk 3 haftasında belirsiz bölgede yer alırken, sonraki haftalarda %90 ihtimalle korozyon olan bölgeye geçmiştir. OA kullanımı referans örneklere göre korozyon potansiyeli ($E_{(t=0)}$) değerlerini, %5 ve %10 oranlarında azaltırken, %20 oranında OA kullanım durumunda ise referans örneğe benzer değerler sergilemiştir. Korozyon potansiyelinin artışıyla korozyon hızı arttığından %5 ve %10 oranında OA kullanımı, korozyon potansiyelini azalttığı için betonun kalıcı olmasına olumlu katkı sağlayacağı söylenebilir.

OA'lı örneklerin, referans örneklere göre korozyon akımı (I_{cor}) değerleri kıyaslandığında; %5 OA için korozyon süresinin ilk 5 hafta boyunca korozyon akım yoğunluğu değerleri referans örneklerden elde edilen değerlerle çok yakın iken, 7. haftadan sonra %5, %10 ve %20 oranlarında OA kullanımının korozyon akım yoğunluğunu referans örneklere göre azalttığı görülmüştür. Korozyon sürecinin 14. haftasından sonra en düşük korozyon akımları sırası ile %5 ve %10 OA kullanılan örneklerde ölçülürken, referans örnekler ve %20 OA kullanılan örnekler, nispeten daha yüksek korozyon akımı değerleri sergilemişlerdir. Korozyon akımının (I_{cor}) artışıyla korozyon hızı da arttığından, %5 ve %10 oranlarda OA kullanımıyla korozyon akımının azalması olumlu bir davranıştır. Bu sayede %5 ve %10 OA içeren betonlarda, betonarme donatısının korozyonu gecikecek ve betonun kalıcılığına olumlu katkı sağlanabilecektir.

Genel bir değerlendirilme yapıldığında, olivin atıklarının betonda %5 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanımının betonarme donatısının korozyonunu genel anlamda olumlu etkilemesi nedeni ile atıkların bertarafı için yeni bir alan ve klinker ihtiyacındaki azalma ile sağlanabilecek enerji tasarrufu beklenebilir. Yapı malzemelerinde durabilite problemlerinin çözülmesine yardımcı olarak yapı sektöründe sürdürülebilirlik temin edilecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, bu çalışmayı finansal olarak 3061-YL-12 nolu proje ile destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi BAP Birimine teşekkür ederler.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

D	Örneğin nem ve hacim tayini metoduna bağlı birim hacim kütlesi
d_{max}	Malzemedeki en büyük tane çapı
$E_{(t=0)}$	Korozyon potansiyeli
f_c	Deney örneğinin basınç dayanımı
I_{cor}	Korozyon akımı
R_p	Polarizasyon direnci
V	Örnek hacmi
\emptyset	Demir donatı çapı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aköz, F., Çakır, Ö., "Betonarme Korozyonu" Beton 2013 Kongresi, İstanbul, s. 162-186, 21-23 Şubat, 2013.
- Asan A. ve Yalçın H. 2003, "Uçucu kül katkısının betonarme demirlerinin korozyonu üzerine etkisi" Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 16(1): 47-54.
- Baradan, B., Yiğiter, H., 2008, "Mineral Katkıların Donatı Korozyonuna Etkisinin Elektrokimyasal Yöntemlerle İncelenmesi", Beton Prefabrikasyon Dergisi, sayı 86, s. 5-15.
- Değirmenci, A., 2006, Silis Dumanı Katkısının Betonarme Çeliği Korozyonuna Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erdoğan, T., Y., 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yay. ve İletişim A. Ş. Yay. 1. Basım, 741s, Semih Ofset Matbaacılık Yayıncılık ve Ambalaj Dağıtım A. Ş., Ankara.

- Erdoğan, Ş., Kurbetci, Ş., 2003, "Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri" Türkiye Mühendislik Haberleri, Cilt 4, Sayı 426, s. 155-120.
- Ergi, E., Bilgin, S., G., Zeybek, M., S., Asan, A., "Endüstriyel Atık Katkılı Çimentoların Beton Dayanımı ve Donatı Korozyonuna Etkileri" 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara s. 311-317, 12-13 Nisan, 2007.
- Haberal, Y., 2010, Uçucu Küllü Betonlarda Klor İyonu Geçirgenliğinin ve Donatı Korozyonunun İncelenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Khatrı, R.P. Sirivivatnanon V., Heeley P., 2004, "Critical polarization resistance in service life determination" Cement and Concrete Research, 34, pp. 829-837.
- Kanarya, A., 2010, Olivin Kalıp Kumlarının Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Karaboğa, F., 2012, Klorür Kirlenmesine Maruz Bırakılmış Metakaolin İçeren ve İçermeyen Beton İçerisindeki Donatının Korozyon Direnci, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Keleştemur, O., Demirel, B., 2010, "Corrosion Behavior of Reinforcing Steel Embedded in Concrete Produced with Finely Ground Pumice and Silica Fume" Construction and Building Materials, v: 24, pp. 1898-1905.
- Millrath, K., 2003, Modifying Concrete Matrices with Beneficiated Dredged Material or Other Clayey Constituents, Columbia University, School of Art and Science, Doctoral Thesis.
- Sancak, E., Şimşek, O., "Influence of Silica Fume Addition on Pumice Concrete on Corrosion Behaviour of Reinforcement Bars", 7th International Congress Concrete: Construction's Sustainable Option: Concrete Durability, Achivement and Enhancement Section, Dundee, Scotland, pp. 237-248, June, 2008.
- Şimşek, O., 2012, Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, 4. baskı, Ankara.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., Karakurt, C., 2006, "Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı" Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, Cilt 9, Sayı 1, s. 59-63.
- TS 3526, 1980, "Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3529, 1980, "Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3530 EN 933-1, 1999, "Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini- Eleme Metodu", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 802, 2009, "Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları" Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010, "Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımının Tayini" Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-7, 2010, "Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Beton Yoğunluğunun Tayini" Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1744-1, 2000, "Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 1: Kimyasal Analiz", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206-1, 2002, "Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk" Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Uygunoğlu, T., 2008, Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yalçın H. and Ergün M, 1996, "The Prediction of Corrosion Rates of Reinforcing Steels in Concrete" Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 10, pp. 1593-1599.
- Yalçın, H. ve Koç, T., 1999, Katodik Koruma, Palme Yayınları, Ankara, 1-2, 269-287.
- Yiğiter, H., 2008, Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.