



Normal ve %4NaCl Çözünürlüklü Kür Edilmiş Düz ve Nervürlü Donatılı Farklı Dayanımlı Betonlar İçin Donatı Aderans Kaybının Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Belirlenmesi

Determination of Reinforcement Adherence Loss by Accelerated Corrosion Test for Normal and 4%NaCl Solubility Cured Flat and Ribbed Reinforced Concretes with Different Strengths

Melek Akgül^{1*}, Orhan Doğan²

¹ Munzur Üniversitesi, Tunceli MYO, İnşaat Programı, 62000, Tunceli, TÜRKİYE

² Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 24/03/2022

Kabul / Accepted: 29/07/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz

Birçok yapı alanında yapı malzemesi olarak ilk sırada tercih edilen betonun, yüksek olan basınç dayanımının aksine, düşük olan çekme dayanımını artırmak ve eğilme gerilmeleri altında gevrek geçmeyi önleyebilmek için çelik çubukların takviyesi ile betonarme sistemler oluşturulmuştur. Betonun sağlamış olduğu yüksek alkalın ortam, betonarme donatısı ile beton arasındaki aderansın sağlanabilmesi ve donatının korozyondan korunabilmesi için betonarme elemanlarda aranan en önemli kriterlerdendir. Geçirgen bir yapıya sahip olan beton, agresif kimyasallara maruz kalması halinde zamanla korozyona uğrar ve beklenen durabiliteyi sağlayamaz. Korozyon, donatının içinde bulunduğu ortam ile kimyasal ve/veya elektrokimyasal reaksiyona girerek metalik özelliklerini kaybetmesidir. Betonarme donatısında kesit kaybına neden olmanın yanında, korozyon; donatı ile beton arasındaki aderansın da azalmasına veya yok olmasına neden olmaktadır. Günümüzde betonarme yapılar, kendi zati ağırlıklarına, servis ve sismik yüklere göre boyutlandırılır. Ancak, analizlerde korozyon dikkate alınmadığından, zamanla donatının aderans ve kesit kaybına uğraması nedeniyle, yapıların depremde hasar görmesine veya yıkılmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, donatıların korozyona bağlı aderans kaybını belirleyebilmek için hazırlanan deney numuneleri, Türkiye'deki mevcut betonarme yapıları temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Parametre olarak 5 farklı beton grubu, 2 farklı donatı türü ve 2 farklı kür şartı değişken alınıp, numuneler hızlandırılmış korozyon deneyine tabi tutulmuş, aderanstaki dayanım değişimi grafikler ve tablolar ile değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Beton, Betonarme, Aderans dayanımı, Donatı korozyonu, Hızlandırılmış korozyon deneyi, Durabilite”

Abstract

Reinforced concrete systems have been created with the reinforcement of steel bars in order to increase the low tensile strength of concrete, which is preferred in the first place as a building material in many construction areas, as opposed to its high compressive strength, and to prevent brittle collapse under the bending stresses. The high alkaline condition provided by the concrete is one of the most important criteria sought in reinforced concrete elements in order to ensure the adherence between the reinforcement and the concrete and to protect the reinforcement from corrosion. Concrete, which has a permeable structure, corrodes over time if exposed to aggressive chemicals and cannot provide the expected durability. Corrosion is the loss of metallic properties by entering into a chemical or electrochemical reaction with the environment in which the reinforcement is exposed. Besides causing cross-section loss in reinforcement, corrosion; it also causes the adherence between reinforcement and concrete to decrease or disappear. Today, reinforced concrete structures are designed according to their self-weight, service and seismic loads. However, since corrosion is not taken into account in the analyses, due to the loss of adherence and cross-section of the reinforcement over time, it causes the structures to be damaged or collapsed in an earthquake. In this study, the test specimens prepared to determine the adherence loss of reinforcements due to corrosion were designed to represent the existing reinforced concrete structures in Turkey. As parameters, 5 different concrete groups, 2 different types of reinforcement and 2 different curing conditions were kept variable, the samples were subjected to accelerated corrosion test, and the change in adhesional strength was evaluated in graphs and tables.

Key Words

“Concrete, Reinforced concrete, Adhesional strength, Reinforcement corrosion, Accelerated corrosion test, Durability”

1. Giriş

Uzun yıllardır inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan beton; genel itibarı ile agrega, su, çimento ve gerektiğinde katkı maddelerinin takviyesi ile elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir (Demir, 2009; Şimşek, 2012). Beton farklı üretim şartlarına kolaylıkla uyum sağlamasına bağlı olarak (Sevim, 2018); yollar, köprüler, barajlar ve konutlar gibi birçok yapı alanında tercih edilir ve her yıl yaklaşık olarak 25 milyar ton üretilmektedir. Başlangıçta plastik kıvamda olup hidrasyon sonucu katılaşıp, sertleşen beton zamanla mukavemet kazanır.

Betonun çekme mukavemeti, basınç mukavemetinin 1/8 ile 1/14'ü arasında bir değer alır (Yüzer vd., 2003). Basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen yükler altında gevrek bir davranış sergileyen betonun istenilen süneklik özelliğine sahip olması betonarme çeliği ile beton arasındaki aderansa bağlıdır. Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının betonarme olarak davranabilmesi için çelik çubuklar ve betonun kenetlenmesi gerekir (Ersoy ve Özcebe, 2018). Kenetlenmeyi sağlayan çelik çubukla beton arasındaki kayma gerilmelerine "Aderans" denir (Güneyisi vd., 2005).

Zararlı dış ortamın varlığı, iyi bir aderansın var olduğu betonarme yapı elemanlarında dahi önemli durabilite sorunlarına sebep teşkil etmektedir. Beton ve betonarme servis ömrü süresince çevrede oluşan yıpratıcı etkiler karşısında beklenen dayanıklılık özelliğine sahip olmalıdır (Çoban, 2014; Baradan ve Aydın, 2013). Betonarme yapı elemanlarındaki önemli durabilite sorunlarından biri de korozyondur (Doğan ve Hamidiye, 2010). Çok üstün mekanik özelliklerine bağlı olarak mühendislik alanında yaygın olarak kullanılan çeliğin korozyona dayanıklılığı çok zayıftır. Beton, çimentonun hidrasyonu sonucu açığa çıkan Ca(OH)_2 nedeni ile çelik yüzeyinde alkalitesi yüksek ve koruyucu bir oksit tabakası oluşturur (Yamaç, 2010). Böylece korozyona karşı dayanıklılığı son derece düşük olan çelikte anodik akım yoğunluğunun kısıtlanması sağlanır, bu olaya alkali pasivasyonu denir (Aköz vd., 2007). Ancak betonun geçirimli olması, ortamda su ve oksijen bulunması, beton üretiminde Cl^- iyonu içeren agregaların ve/veya katkıların kullanılması, gibi parametreler karbonatlaşma ile ortamın pH'nın 11'in altına düşmesine neden olur. Bu olay donatı yüzeyindeki pasif demiroksit tabakasının tahrip olmasıyla başlayan korozyon yıkımına zemin hazırlar (Aköz vd., 2007). Betonarme yapılarındaki korozyon, değişken doğal ortam nedeni ile korozif ortam-beton ve beton-donatı ara yüzeylerinde sürekli olarak meydana gelen elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Çevre-beton-donatı sisteminde, çevrenin çoklu değişen olmasına bağlı olarak kimyasal korozyon oluşur ve betonarmede kimyasal, fiziksel ve mekanik kalite kaybı yaşanır (Çizmecioglu vd., 2010).

Çelik, rutubetli ve yeterince oksijen içeren ortamlarda hızla korozyona uğrar (Özçelik ve Gelişli, 2018). Donatının yüzeyinde oluşan korozyon ürünü, kütlede çok az kayba neden olmasına rağmen, bileşiğin türüne bağlı olarak hacimde %600'e varan artışları ile betonarme elemanın ömrünü dolayısı ile yapının güvenliğini azaltır (Aköz vd., 2007).

Beton basınç etkisinde 2000-4000 μD (10^{-6} Deformasyon) değerinde kısılma oranına sahipken, çekmede kopma uzama oranı ~300 μD mertebesindedir (Yüzer vd., 2003). Gevrek bir malzeme olan betonun çekmede kopma uzama oranının çeliğe göre kısıtlı düzeyde olmasına da bağlı olarak; beton-donatı ara yüzeyinde oluşan korozyon ürünlerinin yaratacağı içsel gerilmeler ve çatlaklar kaçınılmazdır (Li vd., 2009; Xiaojuan vd., 2017; Pehlivan ve Aytekin, 2018).

Donatının çapına bağlı olarak metalde 10-50 μm 'lik kayba neden olan demiroksit, 2-3 cm'lik beton örtünün çatlaması için yeterlidir. Teorikte 10-30 $\mu\text{m}/\text{yıl}$ gibi küçük korozyon hızında dahi beton örtüsünün 1-3 yıl içinde çatlaması söz konusudur. Donatıdaki 10-20 μm gibi çok küçük kayıpların betonda, 0.05-0.1 mm gibi gözle görülebilir genişlikte çatlak oluşumuna neden olmaktadır (Yüzer vd., 2003; Yeğınobalı, 2000; Andrade vd. 1993; Aköz vd., 2000).

Beton-donatı aderansındaki kayıp; ilerleyen süreçte ivme kazanan bir korozyon gelişimi ve devamında yarattığı tahribata bağlı olarak yapının yanal yer değiştirme kapasitesindeki kayıpları doğurur (Göksu ve İlki, 2016; Yüzer vd., 2003). Zararlı dış ortam koşullarına bağlı olarak betonarme çeliğinde görülen korozyonun gelişimini tamamen durdurmak mümkün olmasa da, korozyonun başlama anı ve gelişim hızı gibi iki önemli parametrenin yapının etkili servis ömrü süresince kabul edilebilir limitlerin altında tutmak önemlidir (Çizmecioglu vd., 2010). Mevcut yapılarda korozyon mekanizmasının en önemli kriterleri; yapıda kullanılan malzeme, uygun imalat, inşaat sonrası yeterli koruma ve kür şartlarının yönetmelik esaslarına uygunluğu, yapının yaşı, çevresel ve bölgesel etkenler vb.'dir. Tüm bu kriterlerden en belirleyici olanları elbette ki uygun malzeme seçimi, mineral/kimyasal katkı maddelerinin kullanımı ve yalıtım önlemleridir (Aydın, 2012).

Meydana gelen yıkıcı depremler sonrası yapılan saha incelemeleri, yıkılan veya ağır hasarın raporlandığı yapıların büyük bölümünde donatıların korozyona uğradığını ve beton ile donatı arasındaki aderansın kaybolduğunu göstermektedir (Di Carlo vd., 2017).

Korozyondan etkilenen yapıların hizmet ömrü, donatının beton örtüsünün kaybolması ile karakterize edilmektedir (Yang vd., 2016). Korozyonun başladığı betonarme yapılarda donatı-beton aderansından, beton ve çeliğin mekanik özelliklerinden, donatı en kesit alanından, sargı donatısı etkinliğinden söz etmek ve hatta proje verilerini dikkate almak çok doğru olmamaktadır (Rajput vd., 2019). Ayrıca yapı güvenliği açısından en kritik elemanlardan olan kolonlar içinde korozyon mekanizmalanması ve aderans kaybı kolonların yatay yük altındaki davranışlarını ve alınabilecek önlemleri araştırmak, öncelikle aktif deprem kuşağı içinde yer alan Türkiye gibi birçok ülkede büyük önem arz etmektedir (Doğan, 2009). Yapıda durabilite ve etkili servis ömrü ilişkisi akademik ve ekonomik bir sorun olarak kabul edilmektedir (Doğan ve Akgül, 2020). Öngörülmeden durabilite koşullarına bağlı olarak etkili servis ömrünü tamamlamadan kullanım dışı kalma tehlikesinde olan birçok yapının yıkım, onarım ve yeniden inşa edilmesi inşaat faaliyetlerinin %40'ını oluşturmaktadır (Baradan, 2013; Taşdemir vd., 1999; Şengül, 2011). Yapılarda etkili servis ömrü, ciddi

korozyon hasarları sebebiyle ekonomik ve teknik olarak öngörülenden çok daha erken sona ermektedir (Aydın, 2012; Çizmecioğlu vd., 2010).

Betonarme aderansın da betonun basınç dayanımı, donatı türü ve farklı çevre koşulları değişken birer parametredir. Betonun basınç dayanımı, donatı türü ve kür koşullarının ayrı ayrı ele alındığı farklı çalışmalar olsa da çoklu fonksiyonlar olarak değerlendirildiği çalışma sınırlı sayıdadır. Bu çalışmada beton grubu ve betonarme çeliğinin yanı sıra kür şartları ve korozyon periyodunun aderans üzerindeki etkisinin tespiti amaçlanmıştır. 5 farklı beton grubu, 2 farklı betonarme çeliği ve 2 farklı kür şartlarının esas alındığı 5 farklı hızlandırılmış korozyon periyoduna bağlı aderans deneyleri gerçekleştirilmiş, donatılı ve donatısız beton numunelerden elde edilen fiziksel ve mekanik veriler grafik ve tablolar ile yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Method

2.1. Materyal

Çalışma kapsamında donatılı ve donatısız beton numunelerin üretiminde kullanılan CEM I 42.5 R Portland Çimentosu fabrika verileri Tablo 1'de yer almaktadır (TS EN 197-1, 2012).

Tablo 1. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

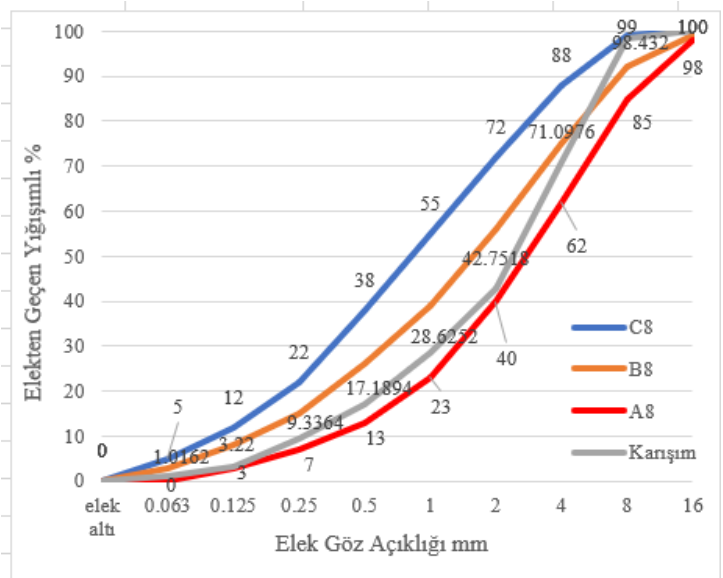
Kimyasal bileşim (%)	SiO ₂	16.95	Fiziksel ve mekanik özellikler	Blaine (cm ² /g)	3572
	Al ₂ O ₃	3.98		Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3.12
	Fe ₂ O ₃	3.52		Piriz başı (dakika)	178
	CaO	65.53		Piriz sonu (dakika)	228
	Na ₂ O	0.20		2 günlük dayanım (MPa)	28.1
	SO ₃	2.94		7 günlük dayanım (MPa)	40.1
	K ₂ O	0.95		28 günlük dayanım (MPa)	50.5
	MgO	1.51			
	Cl ⁻	0.02			
	Kızdırma kaybı	4.05			
	Çözünmeyen kalıntı	0.43			

Numunelerin üretiminde kullanılan agregaya karışımı; kırma taş 1 (KT1) ve kırma taş 2 (KT2) olmak üzere 2 farklı agregadan hazırlanmıştır. Beton karışımı için agregalar üzerinde agregaya uygunluk deneyleri yapılmıştır. Karışımda kullanılan agreganın granülometrik dağılımı Şekil 1'de elek analizi verileri Tablo 2'de verilmiştir. (TS 3526, 1980; TS EN 933-1, 2012).

Karışımda TS 802'ye uygunluk ve standartta belirtilen en büyük tane boyutu (D_{max}) 8,0 mm olan beton için gradasyon eğrisi 3. Bölge (A-B arası) hedeflenmiştir. Agregaya tane yoğunluğu KT1 ve KT2 için sırası ile 2.49 ve 2.63 gr/cm³'tür (TS 802, 2016). Çalışmada karışım suyu olarak, Kırıkkale Üniversitesi Merkez Kampüs şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 2. Agregaya Elek Analizi

Elek göz açıklığı (mm)	Elekten Geçen % (Yığışlımlı)	
	KT 1	KT 2
16	100.000	100.000
8	100.000	95.100
4	100.000	9.680
2	60.755	4.495
1	40.710	2.945
0.5	24.375	1.920
0.25	13.050	1.445
0.125	4.380	0.755
0.063	1.405	0.190
Toplama Kabı	0.000	0.000



Şekil 1. Karışımda kullanılan agreganın granülometri eğrisi

Donatılı beton numunelerin üretiminde kullanılmak için düz (nervüzsüz) ve nervürlü olmak üzere TSE 708'e uygun Ø8'lik betonarme çeliği temin edilmiştir. Aderans deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan düz ve nervürlü betonarme çeliği gerekli boyutlarda kesilmiş ve aderans deneylerine uygunluğu sağlanmıştır (Şekil 2) (TS 708, 2016).

Agresif kür ortamı hazırlamak ve donatılı beton numunelerde hızlandırılmış korozyon deneylerinin uygulanmasında kullanılmak üzere %4'lük sanayi tipi NaCl çözeltisi hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan KT1, KT2, CEM I 42.5R Portland Çimentosu, betonarme çeliği genel görüntüsü Şekil 2'de yer almaktadır.



Şekil 2. KT1, KT2, CEM I 42.5 R portland çimentosu, betonarme çeliği genel görünümü

2.2. Metot

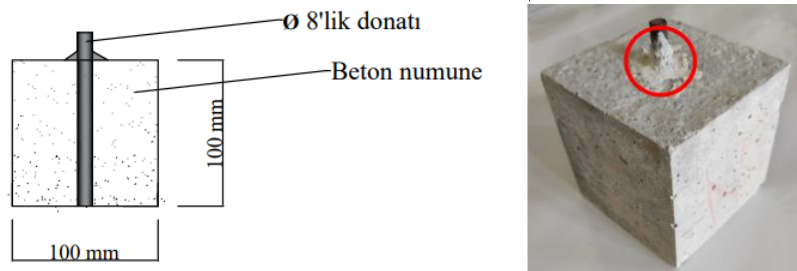
2.2.1. Numune üretimi, kodlaması ve kür şartları

En büyük agrega tane boyutu seçimi; beton işlenebilirlik ve numune boyutları dikkate alınarak D_{max} 8 mm olarak belirlenmiş, tane dağılımı tespitinde TS 802 belirtilen D_{max} 8 mm gradasyon eğrisinde 3 numaralı bölge hedeflenerek KT1 %68, KT2 %32 oranlarında olacak şekilde karışım tasarımı hazırlanmıştır. Su miktarı ve kıvam tayini bu çalışmada donatılı beton numunelerde donatı dikiminin gerçekleştirilecek olmasına bağlı olarak büyük önem arz etmektedir. Su/Çimento oranı; TS 802'de hedeflenen karakteristik silindir basınç dayanımı ($f_{ck, sil}$) ve deneylerin laboratuvar ortamında gerçekleştirileceği göz önüne alınarak hava sürüklenmemiş, katkısız ve artan basınç dayanımına ters orantılı olarak azalan su/çimento (S/Ç) oranı ön çalışmalar ile desteklenerek tayin edilmiştir. Beton karışım hesabında hava miktarı %3 alınmıştır. 5 farklı beton karışımı için 1 m³ beton üretimine esas oluşturan malzeme ve oranları Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 3. 1 m³ beton için karışım tasarımı (kg/m³)

Beton Grubu	S/Ç	Agrega (kg)		Su (kg)	Çimento (kg)	Toplam (kg)
		KT1 (0-4 mm)	KT1 (4-8 mm)			
A	0.99	1086.14	509.91	263.57	256.57	2116.18
B	0.88	1068.52	501.64	263.42	288.64	2122.21
C	0.79	1050.46	493.16	263.26	321.52	2128.39
D	0.69	1024.86	481.14	263.03	368.12	2137.15
E	0.61	998.34	468.69	262.80	416.39	2146.23

Her beton grubu için üretilen donatılı beton numuneler 100*100*100 mm ayrıtlı olup inşaat çeliğinin (Ø8 düz ve Ø8 nervürlü) 100 mm'lik kısmı betona gömülü olarak şekilde tasarlanmıştır. Korozyon performansının gerçekleşmesi ve tespitinde önemli bir adım olarak kabul edilen ve 28 günlük kür süresinde korozyonun sadece betonun geçirimsizlik özelliğine bağlı olarak ilerlemesi ve sadece beton içinde kalan donatının korozyona uğramasını sağlamak amacı ile beton yüzeyi ve donatı temas bölgesi epoksi ile yalıtılmıştır (Şekil 3). Üretilen küp numunelerde kodlamada; beton grubu, kür şartları, donatı türü ve korozyona uğrama periyodunu temsil edecek şekilde yapılmıştır (Tablo 4).



Şekil 3. Donatılı beton numunelerde donatı tasarımı

Tablo 4. Numune kodlama verileri

Beton Grubu		Kür Koşulları		Betonarme Çeliği		Korozyon Süresi	
Kod	Özellik	Kod	Özellik	Kod	Özellik	Kod	Özellik
A	$f_{ck, sil}$	%4	%4 NaCl	Ød	Ø8 düz	P ₀	0 saat
B	$f_{ck, sil}$	%0	%0 NaCl	Øn	Ø8 nervürlü	P ₆	6 saat
C	$f_{ck, sil}$					P ₁₂	12 saat
D	$f_{ck, sil}$					P ₂₄	24 saat
E	$f_{ck, sil}$					P ₃₆	36 saat
						P ₄₈	48 saat

Donatılı (düz ve nervürlü Ø8) ve donatısız numuneler; 5 farklı beton grubu için her beton grubunda 36 adet (12 adet donatısız, 24 adet donatılı) olmak üzere toplam 180 adet 100*100*100 mm ayrıtlı küp numuneler olarak üretilmiştir. Numunelerin yarısı %4 NaCl içeren agresif su küründe, diğer yarısı 20 ± 2 °C'de kirece doymun su küründe 28. deney gününe kadar kür edilmiştir (Şekil 4) (TS EN 12390-2, 2019).



Şekil 4. Donatılı ve donatısız beton numunelerin üretimi ve kürü

2.2.2. Deneysel çalışmalar

Donatısız 100*100*100 mm'lik küp numunelerde 28. deney gününde sertleşmiş beton yoğunluğu ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donatılı küp numunelerde hızlandırılmış korozyon deneyi uygun olarak gerçekleştirilmiş, deney periyodu yapılan ön çalışmalar ışığında; 0 saat (şahit numune), 6, 12, 24, 36 ve 48 saat olacak şekilde uygulanmıştır. Korozyon deneyi sonrası tüm numune setlerinde push-out aderans deneyleri ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Sertleşmiş beton yoğunluğu ve beton basınç dayanımı deneyi

28. deney gününde kür havuzundan alınan numunelerin yüzeyi havlu ile kurutulmuş doymun yüzey kuru ağırlığı, Arşimet terazisi yardımıyla numunenin su içinde asılı ağırlığı, (105 ± 2) °C'de hava dolaşımı etüvde 24 saat aralıklı ard arda ölçümler arası % 0.2'den daha az kütle değişimine kadar bekletilip oda sıcaklığında soğuması sonrası ağırlığı tespit edilmiştir. Sertleşmiş beton yoğunluğu (D), Denklem 1 ve 2 aracılığı ile hesaplanmıştır (TS EN 12390-7, 2019).

$$V = \frac{m_a - [(m_{st} - m_w) - m_{st}]}{P_w} \quad (1)$$

$$D = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2 için;

V: Numune hacmi, (m³)

m_a: Numunenin havadaki kütlesi, (kg)

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

m_w: Numunenin su içerisindeki görünür kütlesi, (kg)

p_w: Suyun 20°C sıcaklıktaki yoğunluğu, (1000 kg/m³ alınmıştır)

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

28 gün iki farklı kür havuzunda olgunlaşan 100*100*100 mm donatısız küp numunelerin basınç dayanımı verileri TS EN 12390-3'e uygun olarak 300 ton kapasiteli cihaz yardımı ile sabit yükleme altında elde ve Denklem 3 ile hesaplanmıştır. Basınç deneyi ve numune örneklerine dair görseller Şekil 5'te yer almaktadır (TS EN 12390-3, 2003).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Denklem 3 için;

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

F: Kırılma yükü, (N)

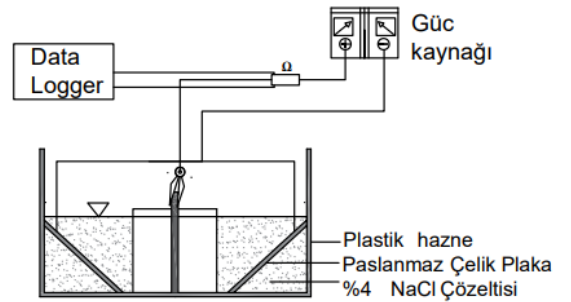
A_c : Uygulama yönüne dik deney numunesi kesit ortalama alanını, (mm²) belirtmektedir.



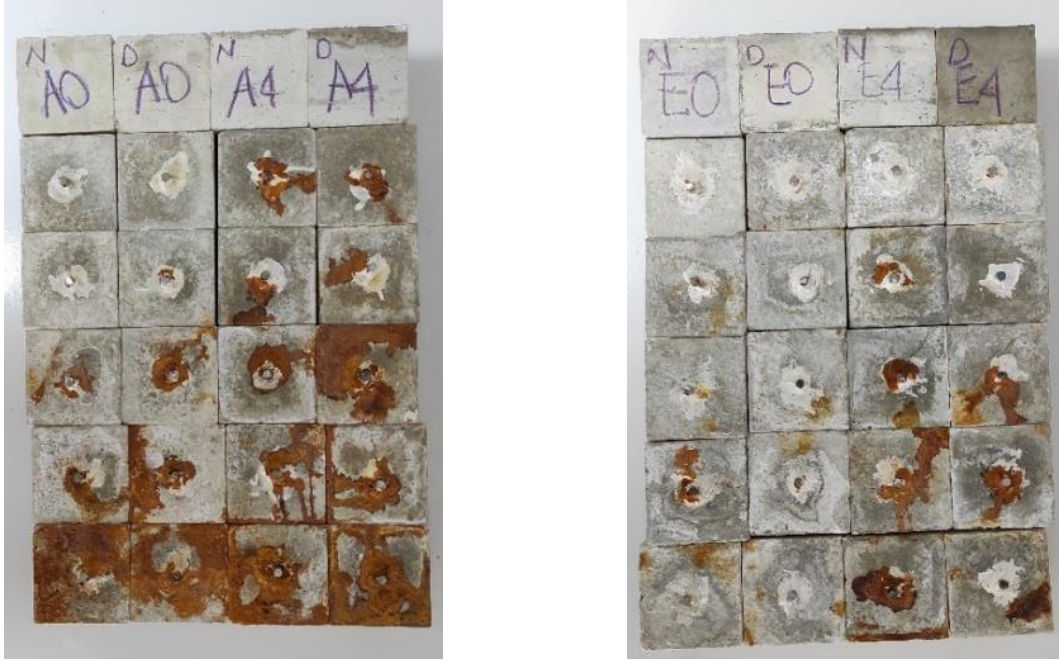
Şekil 5. Basınç deneyi ve numune örnekleri

Hızlandırılmış korozyon ve aderans deneyi

Hızlandırılmış korozyon deneyi betonun geçirimsizlik özelliği hakkında dolaylı olarak bilgi veren bir yöntemdir. Bu deney düzeneği doğru akım kapasiteli bir güç kaynağı, verilerin toplanmasında kullanılan bir data logger, içerisinde % 4'lük NaCl çözeltisi ve iki adet paslanmaz çelik plaka bulunan bir plastik kap ve deney numunesinden oluşmaktadır. Deney düzeneği Şekil 6'da verilmiştir ve benzer çalışmalarda kullanılan deney düzenekleri ile eşdeğer özelliktedir (Topçu ve Boğa, 2007; Al-Zahrani vd., 2002; Güneysi vd., 2005). Kullanılan devrede donatı çubuğu anot, kullanılan plakalar katodu temsil ederken NaCl çözeltisi de elektrolit olarak kullanılmıştır. Yapılan ön çalışmalar ışığında sistemde sabit 20 volt gerilim kullanımı uygun görülmüştür. Deney düzeneğinde doğru akım güç kaynağına paralel bağlı numunelerde 0, 6, 12, 24, 36 ve 48 saatlik periyotlar izlenerek hızlandırılmış korozyon uygulanmış ve her bir kanaldan geçen korozyon akımı değerleri 2 dakikalık veri sıklığı ile data logger tarafından toplanmıştır (Topçu ve Boğa, 2008). Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası numune genel görünümü Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 6. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneği



A.%0.Øn.P ₀	A.%0.Ød.P ₀	A.%4. Øn.P ₀	A.%4.Ød.P ₀
A.%0.Øn.P ₆	A.%0.Ød.P ₆	A.%4. Øn.P ₆	A.%4.Ød.P ₆
A.%0.Øn.P ₁₂	A.%0.Ød.P ₁₂	A.%4. Øn.P ₁₂	A.%4.Ød.P ₁₂
A.%0.Øn.P ₂₄	A.%0.Ød.P ₂₄	A.%4. Øn.P ₂₄	A.%4.Ød.P ₂₄
A.%0.Øn.P ₃₆	A.%0.Ød.P ₃₆	A.%4. Øn.P ₃₆	A.%4.Ød.P ₃₆
A.%0.Øn.P ₄₈	A.%0.Ød.P ₄₈	A.%4. Øn.P ₄₈	A.%4.Ød.P ₄₈

E.%0.Øn.P ₀	E.%0.Ød.P ₀	E.%4. Øn.P ₀	E.%4.Ød.P ₀
E.%0.Øn.P ₆	E.%0.Ød.P ₆	E.%4. Øn.P ₆	E.%4.Ød.P ₆
E.%0.Øn.P ₁₂	E.%0.Ød.P ₁₂	E.%4. Øn.P ₁₂	E.%4.Ød.P ₁₂
E.%0.Øn.P ₂₄	E.%0.Ød.P ₂₄	E.%4. Øn.P ₂₄	E.%4.Ød.P ₂₄
E.%0.Øn.P ₃₆	E.%0.Ød.P ₃₆	E.%4. Øn.P ₃₆	E.%4.Ød.P ₃₆
E.%0.Øn.P ₄₈	E.%0.Ød.P ₄₈	E.%4. Øn.P ₄₈	E.%4.Ød.P ₄₈

Şekil 7. Hızlandırılmış korozyon deneyi sonrası numune genel görünümü

Hızlandırılmış korozyon deneyleri yapıldıktan sonra tüm numune setlerine aderans deneyleri uygulanmış, deney verileri ile aderans dayanımı hesaplanmıştır (Denklem 4). Hızlandırılmış korozyon sonrası aderans deneyi uygulanan numunelerin genel görünümü ve iç yapısı Şekil 8’de verilmiştir.

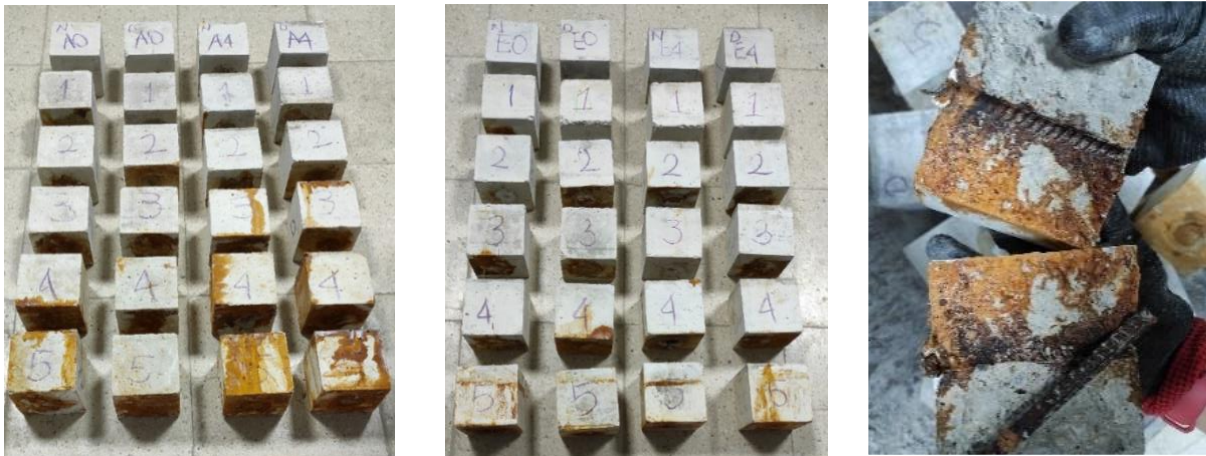
$$\tau = \frac{\text{Aderans Kuvveti}}{\pi \cdot \phi \cdot l} \quad (4)$$

Denklem 4 için;

τ : Aderans dayanımı,

ϕ : Donatı çapı

l : Aderans boyu (betona gömülü donatı uzunluğu)



Şekil 8. Aderans deneyi sonrası numune genel görünümü

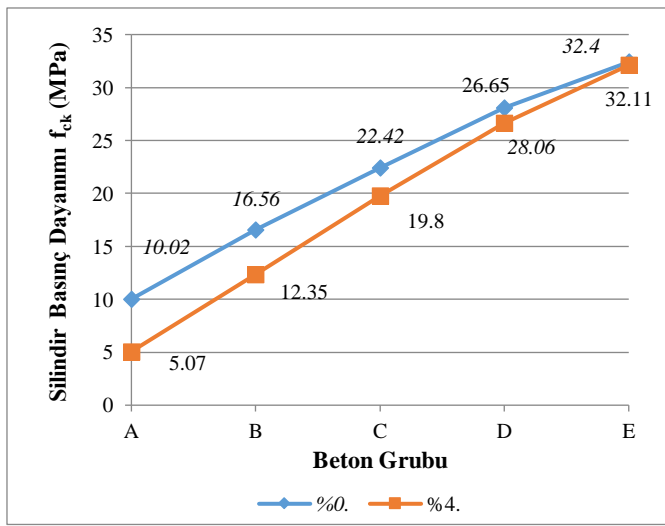
3. Bulgular ve Tartışma

Bu deneysel çalışmada donatılı ve donatısız beton numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

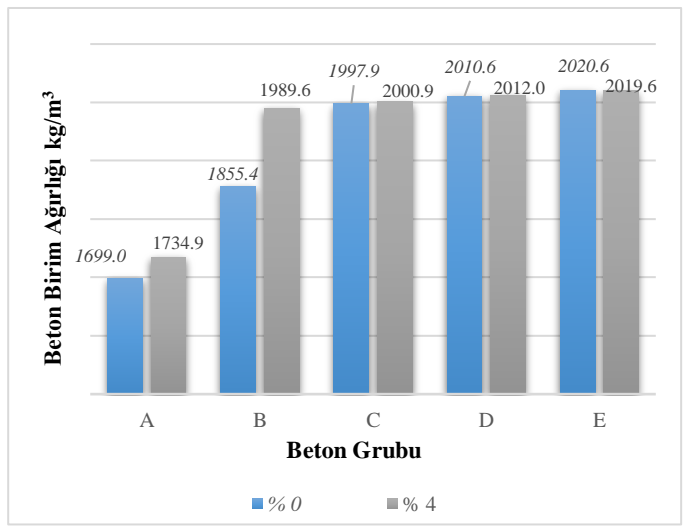
3.1. Sertleşmiş beton birim ağırlık ve basınç dayanımı deneyi sonuçları

5 farklı beton grubu için yapılan 28. gün basınç dayanımı verileri her beton grubu için 6 adet (3 adet standart kür, 3 adet %4 NaCl içeren kür) olarak yapılmıştır. Her grupta elde edilen verilerin ortalaması MPa olarak hesaplanıp Şekil 9'da grafiksel olarak verilmiştir. Tüm beton sınıflarında basınç dayanımı verileri, standart kür edilen numunelerde daha yüksek değerlerde seyretmektedir. Standart kür uygulanan A, B, C, D ve E beton grubu numunelerin kaydedilen basınç dayanımı değerleri, yine aynı grupların %4 NaCl kür ortamında kür edilen numunelerinin basınç dayanımı değerleri ile kendi içlerinde kıyaslandığında; sırasıyla %49.40, %25.42, %11.69, %5.02, %0.89 azalan oranlar ile kaydedilmiştir (Şekil 9).

Sertleşmiş beton birim ağırlığını %4 NaCl etkisi A ve B düşük dayanımlı betonlarda %7.23'lerde artırırken, C, D ve E beton gruplarında ihmal edilecek düzeyde %1'lerde artırdığı görülmektedir. Standart kür edilen numuneler kıyaslandığında A beton grubu ile E beton grubunun beton basınç dayanımı %223.42 artarken sertleşmiş birim ağırlığının %18.92 oranında arttığı görülmektedir. Betonun basınç dayanımının 10.02 MPa'dan 32.40 MPa çıkması ile beton basınç dayanımındaki artış oranının (%223.42) sertleşmiş betonun birim ağırlığındaki artış oranına (%18.92) göre değerlendirmesi yapıldığında (%223.42 / 18.92) kazanımın 11.81 kat olduğu görülmektedir (Şekil 9, 10).



Şekil 9. Farklı beton grubu için standart (%0) ve %4 NaCl kür şartlarına bağlı silindirik basınç dayanımı



Şekil 10. Farklı beton grubu için standart (%0) ve %4 NaCl kür şartlarına bağlı sertleşmiş beton yoğunluğu

3.2. Hızlandırılmış korozyon ve aderans deneyi sonuçları

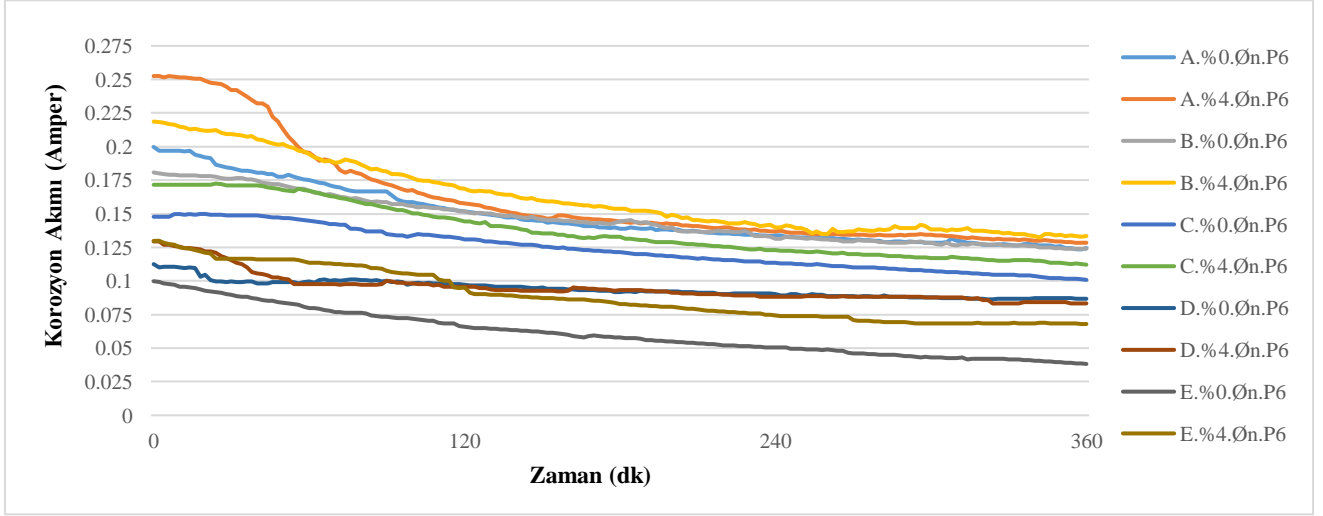
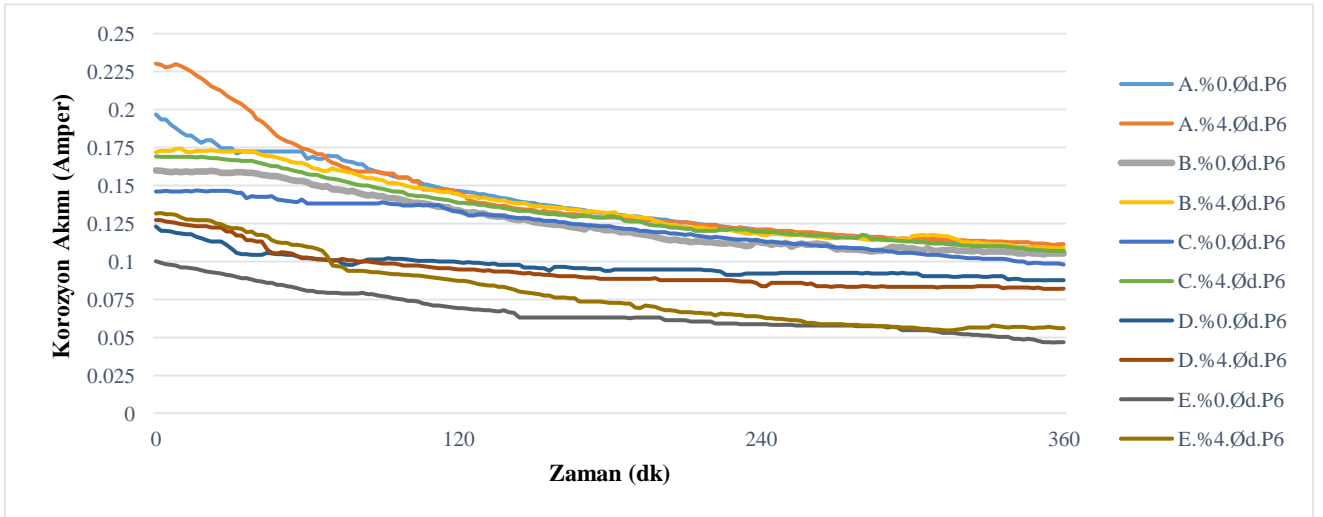
Tüm beton sınıflarına uygulanan hızlandırılmış korozyon deneyi, her grupta şahit numune (0) ve 6, 12, 24, 36 ve 48 saatlik periyotlar ile korozyona uğratılan numunelerin 2 dakika aralıklı verilerinden oluşmaktadır. P₆ (6 saat) periyodunda elde edilen korozyon akımı ve zaman ilişkisi düz ve nervürlü donatılar için Şekil 11 ve 12'de verilmiştir. Beton sınıfları arasında en düşük basınç dayanımlı olan A grubu betonun tüm korozyon periyotlarında korozyona başlangıç akımı en yüksek düzeydedir. Korozyon akımı ve zamanın ilişkilendirildiği grafiklerde %4 NaCl kür ortamındaki numunelere uygulanan korozyona uğratma akım değerleri, aynı gruptaki standart kür (%0) uygulanan numunelere göre daha yüksektir. Korozyon deneyi verilerine bakıldığında, beton basınç dayanımı yüksek olan E grubu beton numunelerinde donatının korozyon başlangıç akım değeri diğer beton gruplarına göre en düşük değerdedir.

%0 kür ortamındaki nervürlü donatılı numunelerin P₆ periyodundaki korozyon başlangıç akım değeri A grubu betonda yaklaşık 0.20, E grubu betonda yaklaşık 0.10 olarak kaydedilmiştir. Bu veriler ışığında sadece beton sınıfının değişmesi ile A ve E beton grubu arasındaki değişim %50.03 oranında azalma ile hesaplanmıştır. Benzer şekilde, %4 kür ortamındaki nervürlü donatılı numunelerin P₆ periyodundaki korozyon başlangıç akım değeri A grubu betonda yaklaşık 0.25, E grubu betonda yaklaşık 0.13'tür. Yani %48.58 oranında azalma söz konusudur.

Beton dayanımı az olan beton gruplarında, agresif olmayan ortamlarda dahi korozyon başlangıç akım değerinin yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, tüm beton gruplarında korozyon akım değerinin 6 saat sonrasında yaklaşık 1/2 ile 2/3 oranlarında azaldığı görülmüştür. A, B, C, D ve E grupları için tüm periyotların (P₆, P₁₂, P₂₄, P₃₆, P₄₈) başlangıç akım değerlerinin ortalaması Tablo 5'te verilmiştir.

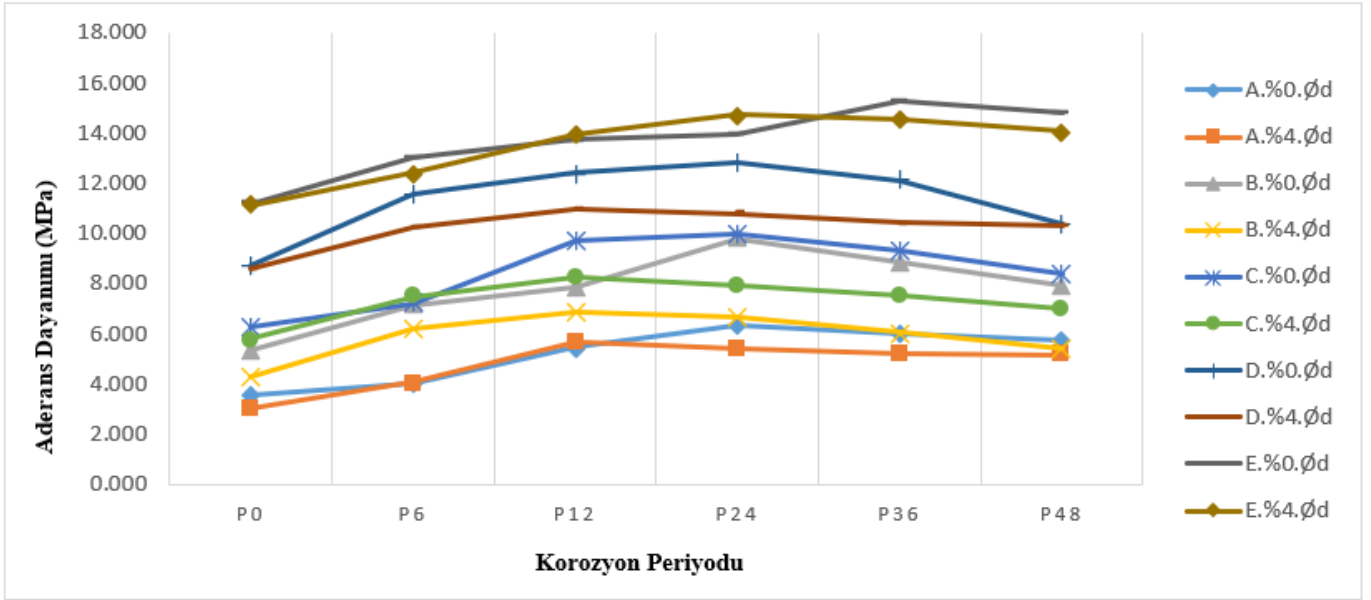
Tablo 5. Ortalama korozyon başlangıç akım değerler (Amper)

A.%0.Øn	0.1959	B.%0.Øn	0.1850	C.%0.Øn	0.1400	D.%0.Øn	0.1380	E.%0.Øn	0.0993
A.%0.Ød	0.1992	B.%0.Ød	0.1509	C.%0.Ød	0.1398	D.%0.Ød	0.1250	E.%0.Ød	0.0980
A.%4.Øn	0.2463	B.%4.Øn	0.2219	C.%4.Øn	0.1592	D.%4.Øn	0.1467	E.%4.Øn	0.1312
A.%4.Ød	0.2327	B.%4.Ød	0.1794	C.%4.Ød	0.1531	D.%4.Ød	0.1347	E.%4.Ød	0.1283

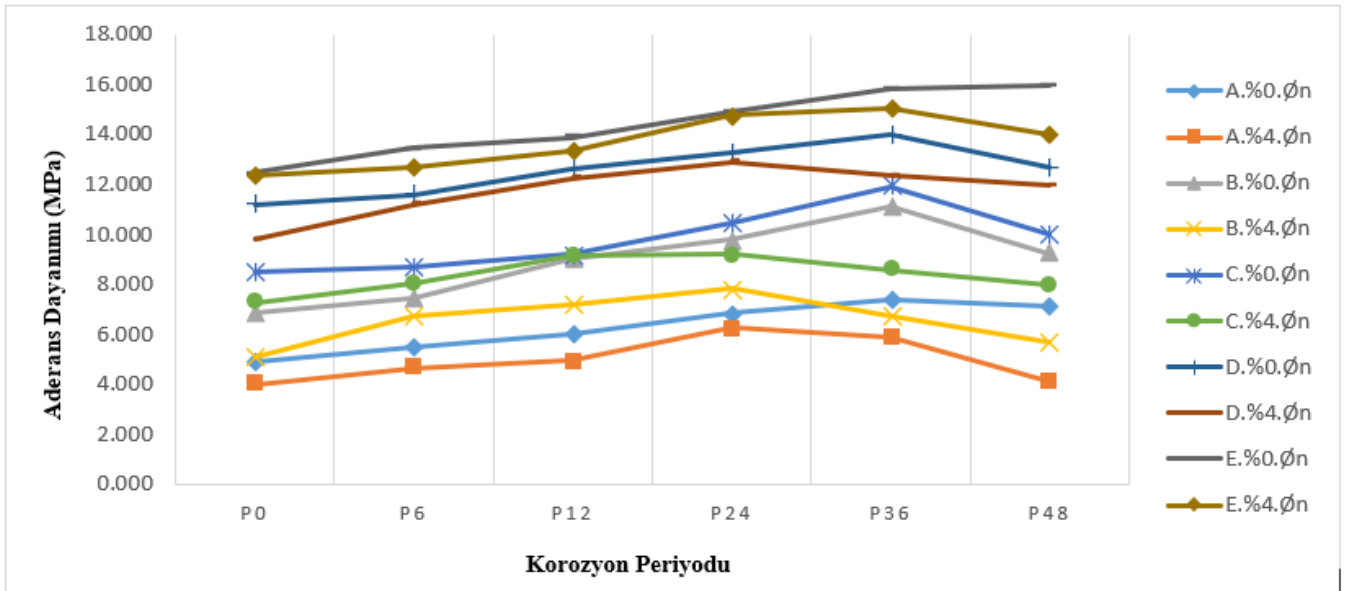
**Şekil 11.** Nervürlü donatılı numunelerde P₆ periyotlu (6 saat) hızlandırılmış korozyon - zaman ilişkisi**Şekil 12.** Düz donatılı numunelerde P₆ periyotlu (6 saat) hızlandırılmış korozyon - zaman ilişkisi

Korozyona bağlı aderans değişimi

5 farklı periyotta korozyona uğratılan ve hiç korozyona uğratılmayan (şahit) donatılı numuneler üzerinde push-out deneyi ile aderans dayanımı (MPa) verileri elde edilmiş ve Şekil 13 ve 14'te verilmiştir. En yüksek aderans değerleri basınç dayanımı en yüksek olan E grubu betona ait numunelerden elde edilmiştir. Basınç dayanımı en düşük olan A beton grubu için aderans değerleri de tüm periyotlarda en düşük düzeydedir. Aderans verilerinden anlaşılacağı üzere korozyonun her beton grubunda değişmekle birlikte önce artan sonrasında ise azalan bir eğri takip etmesi önemli bir veridir. Bu durum, değişen korozyon periyotlarında korozyona bağlı donatıdaki hacimsel genişlemeye bağlı olarak beton-donatı ara yüzündeki basıncın artması ile aderans dayanımının yükselmesi, zamanla donatı yüzeyinde oluşan pas kalınlığının (ürünlerinin) artmasıyla da aderansın zayıflaması şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 13. Düz donatılı numunelerde korozyon periyodu (P) aderans verileri (MPa)



Şekil 14. Nervürlü donatılı numunelerde korozyon periyodu (P) aderans verileri (MPa)

Şahit numunenin (0 saat, korozyonsuz) başlangıç aderans dayanımı ile (τ_{k0}), diğer numunelerin maksimum (τ_{max}) aderans değerleri arasındaki artış farkı değerlendirilmiştir (Tablo 6). Nervürlü donatılara kıyasla, düz donatılı beton numunelerde, daha düşük olan başlangıç aderansının daha hızlı arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun aksine, "*" ile işaretlenmiş nervürlü donatılı numunelerde aderans değişiminin daha yüksek olduğu numuneler görülmüştür. P₂₄-P₃₆ aralığında (24-36 saat aralığında) numunelerin aderans dayanımının (τ_{max}) maksimumuna ulaştığı görülmüştür.

Tablo 6. P₀ periyoduna göre aderans değişimi $\Delta\tau$ (%)

Numune Kodu	Max aderans (τ_{\max})'ın periyodu (P _{max})	Aderans artışı % ($\Delta\tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{k0}}{\tau_{k0}} \times 100$)
A.%0.Øn	P ₃₆	50.32
A.%0.Ød	P ₂₄	78.43
A.%4.Øn	P ₂₄	55.92
A.%4.Ød	P ₁₂	86.33
B.%0.Øn	P ₃₆	62.34
B.%0.Ød	P ₂₄	82.40
B.%4.Øn	P ₂₄	53.55
B.%4.Ød	P ₁₂	60.82
C.%0.Øn	P ₃₆	40.36
C.%0.Ød	P ₂₄	59.08
C.%4.Øn	P ₂₄	26.72
C.%4.Ød	P ₁₂	42.21
D.%0.Øn	P ₃₆	24.94
D.%0.Ød	P ₂₄	46.72
D.%4.Øn	P ₂₄	31.46*
D.%4.Ød	P ₁₂	27.20*
E.%0.Øn	P ₄₈	27.66
E.%0.Ød	P ₃₆	36.20
E.%4.Øn	P ₃₆	22.12
E.%4.Ød	P ₃₆	30.68

P_{max}: Aderansın maksimum olduğu (τ_{\max}) korozyona uğratılma periyodu

*: Nervürlü donatılı numunelerde $\Delta\tau$ 'nin, nervürsüz (düz) donatılı numunelerin $\Delta\tau$ değerinden fazla olduğu durumlar.

4. Sonuç

Betonarme yapıların güvenliğini ve servis ömrünü etkileyen en önemli faktörlerden biri betonarme çeliğindeki korozyondur. Betonarme binalarda donatı korozyonu, taşıyıcı elemanları ve yapısal sistemin bütününe olumsuz etkiler. Her ne kadar yeni inşa edilen yapılar için yönetmelik esas ve uygulamaları söz konusu olsa da mevcut betonarme binaların birçoğu düşük performanslı beton kullanımı, yapım ve tasarım hataları nedeniyle deprem yükleri altında düşük yapısal performans göstermektedir. Bu performansta göz ardı edilen gizli parametre, korozyonun yarattığı durabilite sorunudur. Korozyon, donatıdaki kesit kaybı nedeniyle betonarme yapıların stabilitesini olumsuz yönde etkiler.

Bu çalışmanın verilerine göre; betonarmede betonun S/Ç oranı, basınç dayanımı, kür şartları ve kullanılan donatının türü önemli birer parametredir. Farklı beton sınıfları, donatı türleri ve kür şartları değişken alınarak yapılan bu çalışmada, betonarme yapılarda korozyon nedeniyle aderans üzerinde etkili olan, imalat reçetesi, kür şartları ve yapının servis ömrü süresince maruz kalması muhtemel olan zararlı dış etkiler rol model alınmıştır. Hali hazırda Türkiye'de var olan birçok yapıyı temsil etmek amacıyla C5-C30 bandında değişken dayanımlarda beton ile farklı donatı (düz ve nervürlü) kullanılarak gerekli deneysel çalışma ve değerlendirmeler yapılmıştır.

Ülkemizde korozyona maruz kalmış mevcut betonarme yapıların kapsamlı değerlendirilmesine olanak sağlayacak yöntem ve modeller yönetmeliklerde yer almamakla beraber, korozyonun etkisi yalnızca donatı çapındaki azalma olarak değerlendirilmektedir. Birçok korozyon deneyi, donatı ağırlık kaybının donatının tüm yüzeyinde eşit gerçekleşmemesi ve lokal bir kesitinde oluşması durumunda, donatıdaki dayanım kaybının aderans göçmesi yerine donatı kopması şeklinde neticelendirmektedir.

Yapılan bu deneysel çalışmanın sonucunda;

- Standartlara uygun kür edilen 10.02 ve 32.40 MPa aralığındaki 5 grup farklı beton numunelerin basınç dayanımlarının, aynı grupların %4 NaCl kür ortamında kür edilen numunelere kıyasla, basınç dayanımındaki artışın aksine, %49.40-0.89 oranlarında daha yüksek gerçekleştiği, beton dayanımının 32.40 MPa çıkması ile NaCl etkisinin minimize olduğu görülmüştür.

- Düşük dayanımlı A ve B beton gruplarında, %4 NaCl'nin sertleşmiş beton birim ağırlığını %7.23'lerde artırdığı, normal dayanımlı C, D ve E beton gruplarında ihmal edilecek düzeyde %1'lerde olduğu görülmüştür. Standart kür edilen numuneler kıyaslandığında A beton grubu ile E beton grubunun beton basınç dayanımı %223.42 artarken sertleşmiş birim ağırlığının %18.92 oranında arttığı görülmüştür. Betonun basınç dayanımının 10.02 MPa'dan 32.40 MPa çıkması ile artış oranının, sertleşmiş betonun birim ağırlığındaki artış oranına kıyaslandığında kazanımın 11.81 katı olduğu görülmüştür.
- Hızlandırılmış korozyon deneylerinde beton sınıfları arasında 10.02 MPa dayanımlı A grubu betonda, tüm periyotlar için korozyon başlangıç değeri en yüksektir. Korozyon akımı ve zamanın ilişkilendirildiği grafiklerde %4 NaCl kür ortamındaki numunelere uygulanan korozyona uğratma akım değerleri, aynı gruptaki standart kür uygulanan numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Korozyon deneyi verilerine bakıldığında, beton basınç dayanımı 32.40 MPa olan normal dayanımlı beton donatısındaki korozyon başlangıç akım değerinin, daha düşük diğer beton gruplarına göre daha az olduğu görülmüştür. P₆ (6 saat) periyodunda standart kür (%0) uygulanan nervürlü donatıdaki korozyon başlangıç akım değeri A grubu numunelerde yaklaşık 0.20 iken E grubu numunelerde yaklaşık 0.10'a düşerek iki beton sınıfı arasında %50.03 oranında fark oluşturduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, %4 NaCl çözeltide bekletilen A ve E grubu numuneler arasındaki geçişte A grubu için 0.25, E grubu için 0.13 değerini alarak %48.58 oranında bir azalma ile kaydedilmiştir.
- Beton dayanımı az olan beton gruplarında, agresif olmayan ortamlarda dahi korozyon başlangıç akım değerinin yüksek olduğu görülmüştür.
- Aderans deneyi verileri ışığında en yüksek aderans değerleri; 32.40 MPa basınç dayanımına sahip E grubu numunelerden elde edilmiştir. Basınç dayanımı düşük olan beton grupları için aderans değerleri de tüm periyotlarda en düşük düzeydedir. Hızlandırılmış korozyon deneylerinde, aderans ve korozyon değerlerinin her beton grubunda değiştiği, küçük periyotlar için arttığı, ancak periyot süresinin artması ile bu değerlerin düştüğü görülmüştür. Bu durum, değişen korozyon periyotlarında korozyona bağlı donatıdaki hacimsel genleşmeye bağlı olarak beton-donatı ara yüzeyindeki basıncın artması ile aderans dayanımının yükselmesi, zamanla donatı yüzeyinde oluşan pas kalınlığının artmasıyla da aderansın zayıflaması şeklinde yorumlanmıştır.
- Nervürlü donatılara kıyasla, düz donatılı beton numunelerde, daha düşük olan başlangıç aderansının daha hızlı arttığı gözlemlenmiştir. P₂₄-P₃₆ aralığında (24-36 saat aralığında) tüm numunelerin aderans dayanımının maksimuma ulaşmaktadır.

Sonuç olarak, düşük dayanımlı betonlarda korozyona bağlı aderans kaybının yüksek olduğu, %4 NaCl içeren çözeltide bu etkinin daha da arttığı görülürken, beton basınç dayanımının artması ile bu etkilerin azaldığı ve hatta C30 üzeri betonda bu etkilerin ihmal edilir dereceye düştüğü tespit edilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak, farklı çözünürlükte ve farklı çözeltilerde farklı dayanımlardaki betonların, kılcal ve kütlece su emme oranları ile beton basınç ve düz ve nervürlü donatılardaki aderans dayanımı değişimlerinin araştırılmasına yönelik yapılacak çalışmalar bu çalışmanın kapsamını ve etkisini mümkün kılacaktır.

Referanslar

Aköz, F., Yüksel, Y., Yüzer, N., Yılmaz, T., Doran, B. (2007). Betonarme deniz yapılarında korozyon hasarının tespiti. 6. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, 235-242, İzmir, Türkiye.

Aköz, F., Zorbozan, M., Yüzer, N., (2000). Betonarme yapılarda korozyon hasarının tespiti onarım için öneriler. Metal Dünyası, 89, 25-28.

Al-Zahrani, M. M., Al-Dulaijan, S. U., Ibrahim, M., Saricimen, H., Sharif, F. M. (2002). Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete. Cement and Conc. Composite, 24,127-137. ISSN 0958-9465, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00033-6).

Andrade, C., Alonso, C., Molina, F.J., (1993). Cover Cracking as a Function of Bar Rebar Corrosion: Part I-Experimental Test. Materials and Structures, 26, 453-464.

Aydın, Ö. (2012). Beton yapılarda donatı korozyonunun önlenmesine yönelik tedbirlerin araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Baradan, B., Aydın, S. (2013). Betonun Dürabilitesi (Dayanıklılık, Kalcılık), Hazır Beton Yayınları. 54-68.

Çizmeçioğlu, Z., Çelik, A., Yıldız, K., Aydın, Ö. (2010). Kentsel dönüşümün en önemli gerekçelerinden biri olan fakat gözardı edilen faktör "korozyon". Mimar ve Mühendis Dergisi, 57, 114.

Çoban, Ö. (2014). Krom ve olivin atıklarının betonda kullanımının durabilite özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

- Demir, İ. (2009). Aynı oranlarda ikame edilen silis dumani ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 1 (2), 1-7. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/umagd/issue/31543/345668>
- Di Carlo, F., Meda, A., Rinaldi, Z. (2017). Numerical evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns, *Engineering Structures*, 153, 264-278. doi:10.1016/j.engstruct.2017.10.020
- Doğan, M. (2009). Betonarme yapılarıdaki deprem hasarlarına korozyonun etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22 (1), 147-168 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/30154/325411>
- Doğan, O., Akgül, M. (2020). Donatı korozyonunun betonarmenin durabilite ve aderansına etkisi. *Anadolu 5. Uluslararası Uygulamalı Bilimleri Kongresi*, 26 - 27 Aralık, Diyarbakır.
- Doğan, O., Hamidiye, F. (2010). An experimental investigation of binding types of reinforcing steel rebars subjected to aggressive solutions under cathodic protection against corrosion. *International Journal of Physical Sciences* 5(17), 2605-2610
- Ersoy, U., Özcebe, G.(2018). Betonarme. Evrim Yayınevi ve Bilg. Dağıtım. 8. Baskı İstanbul.
- Göksu, C., İlki, A. (2016). Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Corroded Deformed Reinforcing Bars, *ACI Structural Journal*, 113 (5), 1053-1064. doi:10.14359/51689030
- Güneyisi, E., Özturan, T., Gesoğlu, M. (2005). A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions, *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 449-461, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.05.006>
- Li, J. B., Gong, J. X., Wang, L. C. (2009). Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket, *Construction and Building Materials*, 23 (7), 2653-2663. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.01.003
- Özçelik, E., Gelişli, K. (2018). Betonarme yapılarda jeofizik yöntemlerle beton kalitesi ve yapı donatı durumunun araştırılması. *Uygulamalı Yerbilimleri Dergisi Cilt: 17, No: 1, 2018 (1-11)*
- Pehlivan, H., AYTEKİN, M. (2018). Yumuşak betonarme çeliğinin beton boşluk suyu ve nacl çözeltisi içerisinde korozyon davranışının incelenmesi. *NWSA, Physical Sciences* ISSN: 1308 7304, ID: 2019.14.2.3A0089, <http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2019.14.2.3A0089>
- Rajput, A. S., Sharma, U. K., Engineer, K. (2019). Seismic retrofitting of corroded RC columns using advanced composite materials, *Engineering Structures*, 181, 35-46. doi:10.1016/j.engstruct.2018.12.009
- Sevim, Ö. (2018). Yüksek kompasiteli çimento bağlayıcı sistemler için uçucu kül tane boyut dağılımlarının optimizasyonu. *Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.*
- Şengül, Ö. (2011). Klor iyonu etkisindeki betonarme yapı elemanlarının dayanıklılığı için olasılığa dayalı tasarım. *Teknik Dergi*, 22 (107), 5409-5423. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/12752/155197>
- Şimşek, O., 2012. *Beton ve Beton Teknolojisi*. Seçkin Yayıncılık, 4. Baskı, Ankara.
- Taşdemir, M.A., Özkul, M.H. ve Atahan, H.N. (1999). Türkiye'deki Son Depremler ve Beton, II. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, 9-20, Adana, Türkiye.
- Topçu, İ.B., Boğa, A.R. (2007). 7. Ulusal Beton Kongresi, 301-311, İstanbul, Türkiye.
- Topçu, İ.B., Boğa, A.R. (2008). Betonarmeye donatı ve beton arasındaki aderansa korozyonun etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi*, .XXI (1), 23-38.
- TS EN 197-1. (2012). Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 206+A2 .(2021). Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk.
- TS 3526. (1980). Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 933-1. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS 802. (2016). Beton karışım tasarımı hesap esasları. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS 708. (2016). Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS EN 12390-2. (2019). Sertleşmiş betonun test edilmesi Mukavemet testleri için numunelerin yapılması ve kürlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS EN 12390-7. (2019). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7 : Sertleşmiş betonun yoğunluğunun tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.

TS EN 12390-3. (2003). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri. Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini.

Xiaojuan, Liu, Huanjun, Jiang, Liusheng, He, (2017). Experimental investigation on seismic performance of corroded reinforced concrete moment-resisting frames, *Engineering Structures*, 153, 639-652, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.034>.

Yamaç, S. (2010). Silis dumanı katkılı betonda klorür etkisinde korozyon oluşumu. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Yang, S. Y., Song, X. B., Jia, H. X., Chen, X. ve Liu, X. L. (2016) Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar, *Construction and Building Materials*, 121, 319-327. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.002

Yeğınobalı, A. (2000). Betonda Çelik Donatı Korozyonu. *Hazır Beton Yayınları*, 41, 54-57.

Yüzer, N., Aköz, F., Özhendekçi, N. (2003). Korozyon nedeni ile beton örtüyü çatlatan donatıdaki kesit kaybının belirlenmesi. *Teknik Dergi*, 14(2):2923-2934.