Korozif Ortam Şartlarına Maruz Bırakılmış Betonun Mekanik Özelliklerinin İrdelenmesi

Mert Ali Cengiz[1], Kerem Peker[2], Lütfullah Gündüz[3]*
[1]İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
[2]Erdemli Proje ve Müşavirlik San. Tic. Ltd. Şti, İstanbul, Türkiye
[3] İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
**İletişimden sorumlu yazar: mcengiz@erdemli-group.com*

Özet

Beton yüzeylerde kimyasalların aşındırıcı etkisini azaltmak ve betonun mekanik özelliklerini korumak için çeşitli önleme yöntemleri kullanılabilir. Kimyasal ortam etkisine maruz kalan betonun kimyasal bozulmasının incelenmesine yönelik bir dizi deneysel çalışma programı oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında, eşdeğer karışım oranlarına sahip olarak hazırlanan beton numunelerinin, dış katmanları yüzeyden uygulanabilen korozyona dayanıklı 3 farklı türde malzeme ile kaplanmasıyla test örnekleri hazırlanmıştır. Daha sonra bu test örnekleri, laboratuvar ortamında farklı orijinlerde kimyasal bozulma şartlarının oluşturulduğu ortamlara maruz bırakılarak, beton test örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki değişimler deneysel olarak analiz edilmiştir. Analizlerden elde edilen bulgularda, beton test örnekleri yüzeylerine uygulanan farklı türlerdeki korozyon önleyici malzemelerin kimyasal bozulma etkileşimleri sonrası betonun teknik özelliklerine ne ölçütlerde etki ettiği ve beton örneklerini korozyona karşı dirençli hale getirmede ne kadar etken olduğu sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında test örnekleri üzerinde basınç dayanımı, kütle kaybı, ultrases geçiş hızı ve yüzey elektriksel direnç testleri yapılmıştır. 150x150x150 mm^3 boyutlarında tasarlanan kübik beton numuneler, hızlandırılmış kimyasal ortam koşullarında simüle edilerek ve farklı karışım oranlarında sülfürik asit, hidroklorik asit ve sodyum hidroksit içeren deney havuzlarında kimyasal etkiye maruz bırakılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kimyasal bozulma, beton, korozyon önleyici malzeme, yüzey uygulama, analiz

Giriş

Çeşitli endüstriyel süreçlerde beton yüzeylere etki edebilecek korozif ortam etkisini azaltmak ve betonun mekanik özelliklerini koruyabilmek için çeşitli koruma yöntemleri mevcuttur. Betonda fiziksel bozulmalar; erozyon, aşınma, çatlaklar, tuz çiçeklenmeleri, donma ve diğerleri gibi zamanında onarılması zor olan faktörler nedeniyle meydana gelir (Neville, 2012). Çiçeklenme, tuz çözeltilerinin ve donma sıcaklıklarının eş zamanlı hareketi nedeniyle beton veya harç yüzeyinde oluşan aşınmadan kaynaklanır (Neville, 2012). Bu fiziksel etki sırasında, agregalar gözle görülür şekilde ortama maruz kalır. Parçalanma, betonun küçük parçalara veya parçacıklara ayrılmasını ifade eder. Betonda biyolojik bozulmalar; mikrobiyal organizmaların büyümesi sadece betonun dayanıklılığını ve güvenilirliğini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda estetik görünümünü de değiştirir (Dubosc, et.al. 2001). Biyolojik bozulma sorunlarını çözmenin altyapıyı ve hizmet ömrünü korumak için yılda milyarlarca dolara mal olduğu tahmin edilmektedir. Mikrobiyal olarak etkilenen korozyon (MIC), deniz ortamlarına maruz kalan betonun bozulması söz konusu olduğunda önemli özelliklere sahiptir. Betondaki mikrobiyal saldırılar, gözenekliliği nedeniyle koruyucu tabakasını yok eder, bozucu malzemeleri betona taşır, dökülme ve çatlamayı hızlandırır ve böylece yapının ömrünü en aza indirir (Sanchez-Silva & Rosowsky, 2008).

Betonda kimyasal bozulmalar; alışılmadık pH seviyeleri, asit yağmuru, karbonatlaşma, klorür ve sülfatların varlığı gibi çeşitli agresif koşullara maruz kaldığında meydana gelir ve bu durumlar betonda yapısal bütünlüğün önemli ölçüde kaybolmasına yol açar. Taze beton, çimentonun hidratlaşması sırasında alkali hidroksitlerin oluşumu nedeniyle genellikle alkalidir (Hewlett, 2003). Bununla birlikte, klorürler ve sülfatlar deniz suyu gibi kaynaklardan sızdığında, yükselen pH seviyeleri düşebilir ve betonun bozulmasına veya çürümesine neden olabilir (Mehta, 2000).

Bu çalışma kapsamında, eşdeğer karışım oranlarına sahip olarak hazırlanan beton numunelerinin, dış katmanları yüzeyden uygulanabilen ve korozif ortam şartlarına dayanım sağlayan üç farklı türde korozyon önleyici malzeme ile kaplanmasıyla test örnekleri hazırlanmıştır. Daha sonra bu test örnekleri,

laboratuvar ortamında farklı orijinlerde kimyasal bozulma şartlarının oluşturulduğu ortamlara maruz bırakılmıştır. Beton test örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki değişimler deneysel olarak analiz edilmiştir. Boyutları 15x15x15 cm^3 olarak tasarlanan kübik numuneler çeşitli karışım oranlarında sülfürik asit, hidroklorik asit ve sodyum hidroksit içeren deney havuzlarında kimyasal etkiye maruz bırakılmıştır. Beton test örnekleri üzerinde basınç dayanımı deneyi, kütle kaybı deneyi, ultra ses deneyi ve yüzey elektriksel direnç deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel bulgulardan, korozyon önleyici malzeme türlerinin betonun fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi detaylı olarak irdelenmiş ve beton durabilitesi açısından teknik verilere ışık tutulmaya çalışılmıştır.

Materyal ve Metot

Numune Betonu

Çalışma kapsamında; 150x150x150 mm^3 boyutlarındaki C30/37 dayanım sınıfına sahip 104 adet beton numunesi, standartlara uygun olarak İzmir bölgesinde faaliyet gösteren Sarnıç Mendeş Grup Beton'a ait hazır beton santralinde hazırlanmıştır. Bu dayanım sınıfındaki beton, minimum 30 MPa silindir dayanımı ve minimum 37 MPa küp dayanımı sağlayan bir karışım oranına sahiptir. Beton karışımında, Portland çimentosu, doğal ve kırma taş esaslı agrega ve su kullanılmıştır. Agrega içeriği, betonun hacminin yaklaşık %60-75'ini oluşturmakta olup, ince agrega (kum) ve iri agrega (çakıl veya kırmataş) olmak üzere iki şekildedir. Tane boyutu aralığı, ince agregada 0-4 mm ve iri agregada 4-16 mm veya 4-22 mm arasında değişmektedir. Agregaların tane boyut dağılımı, gradasyon eğrisi ile kontrol edilerek betonun işlenebilirliği ve sıkışma özellikleri optimize edilmiştir. Su/çimento oranı ise 0,45-0,50 aralığında tutulmuş, dayanım ve geçirimsizlik özellikleri dengelenmiştir. Beton test örneklerinin hazırlanmasında herhangi bir donatı çubuğu kullanılmamıştır.

Korozyon Önleyici Malzemeler

Çalışma kapsamında korozif ortam şartlarına maruz bırakılacak beton test örneklerinin korozif etkiye dayanıklı korozyon önleyici malzemeler ile kaplanması amacıyla 3 farklı türde korozyon önleyici malzeme kullanılmıştır. Beton numuneleri yüzeyden sürme yöntemiyle bu malzemeler ile kaplanmış olup, tüm çalışma boyunca K1, K2 ve K3 olarak kodlanmıştır:

K1: Bitüm bazlı korozyon önleyici malzeme,
K2: Solventsiz epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme
K3: Poliaspartik epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme

Bitüm bazlı korozyon önleyici malzeme (K1); genellikle endüstriyel uygulamalarda su yalıtımı, korozyon öncesi koruma ve sızdırmazlık için kullanılan bitüm esaslı bir üründür. Bitüm bazlı korozyon önleyici malzemeler, doğada petrol türevi doğal bitümler veya rafinerilerde petrol damıtımı sonucu elde edilen işlenmiş ağır hidrokarbonlar olarak bulunur. Yüksek su geçirmezlik özelliği sayesinde, suyun sızmasını engelleyen bir bariyer oluşturur ve özellikle dış mekân uygulamalarında, suya maruz kalan alanlarda etkili bir koruma sağlar. Doğal haliyle koyu kahverengi veya siyah renkte, viskoz ve yapışkan bir yapıya sahiptir. Malzemenin yoğunluğu 1.01–1.06 g/cm^3 arasında olup, doğal bitüm için bu değer 1.0 g/cm^3 ile 1.2 g/cm^3 arasında değişebilir. Bitümün kullanım alanına ve formülasyonuna göre uyarlanarak yalıtım ve koruma amaçlı etkin bir özellik malzemeye kazandırılabilir (Jain & Morrison, 2015).

Solventsiz epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme (K2); genellikle beton zeminlerin korunması, dayanıklılığının artırılması ve boyanması amacıyla kullanılan, solvent içermeyen, epoksi bazlı bir astar ürünüdür. Beton ve harç yüzeylerde mükemmel yapışma gücü sağlarken, dayanıklı ve koruyucu bir tabaka oluşturur. Çeşitli kimyasal maddelere, asidik ve alkali çözeltilere karşı yüksek direnç gösteren epoksi astar, bu nedenle endüstriyel alanlarda güvenle tercih edilir. Genellikle iki bileşenli bir yapıya sahiptir ve uygulamadan önce reçine (A bileşeni) ile sertleştirici (B bileşeni) karıştırılarak kullanılır. Yoğunluk açısından, bu malzemelerin karışım sonrası yoğunluğu genellikle 1.4–1.6 g/cm^3 arasında değişir. Bileşenler ayrı ayrı ele alındığında, reçine (A bileşeni) yüksek viskoziteye (5000–9000 cP), sertleştirici (B bileşeni) ise daha düşük viskoziteye (200–500 cP) sahiptir. Karışım sonrası homojen bir kıvam elde edilir, bu da uygulama kolaylığı sağlar. Solventsiz epoksi bazlı malzemeler, metal, beton ve diğer yapı malzemelerinde güçlü bir yapışma sağlayarak korozyona karşı uzun ömürlü bir koruma sunar (Zou, Chen, & Tang, 2020).

Poliaspartik epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme (K3); genellikle ahşap, metal ve diğer yüzeyleri korumak ve amacıyla kullanılan yüksek kaliteli bir vernik türüdür. Bu vernik, özellikle dayanıklılık, koruma ve estetik sunmak için formüle edilmiştir. Poliaspartik epoksi bazlı korozyon

önleyici malzemeler, genellikle iki bileşenli (reçine ve sertleştirici) bir yapıya sahip olup, hızlı kürleşme ve yüksek kimyasal dayanıklılık sunar. Bu malzemeler, sıvı veya yarı akışkan formda bulunur ve uygulama öncesinde bileşenlerin karıştırılmasıyla homojen bir karışım elde edilir. Reçine, viskoz bir sıvı formunda olup genellikle yoğunluğu 1.2–1.4 g/cm³ arasında değişir, sertleştirici ise daha düşük yoğunluğa sahip olup 1.0–1.2 g/cm³ arasında olur. Karışım sonrası ürünün yoğunluğu 1.3–1.5 g/cm³ arasında değişir. Poliaspartik epoksi bazlı malzemeler, düşük viskoziteye sahip oldukları için kolayca uygulanabilir ve genellikle 1000–3000 cP arasında bir viskoziteye sahiptir. Bu özellikler, malzemenin endüstriyel ve dış mekân projelerinde güçlü bir koruma sağlayarak uzun ömürlü ve dayanıklı bir kaplama oluşturmasına imkân tanır (Liu & Zhang, 2020).

Korozif Etki Amaçlı Kullanılan Kimyasal Malzemeler

Çalışma kapsamında korozif etki amaçlı 3 farklı kimyasal malzeme kullanılmıştır. Bunlar: sülfürik asit (H_2SO_4), hidroklorik asit (HCl) ve sodyum hidroksit (NaOH)'dir.

Sülfürik asit, güçlü bir asit olup, endüstriyel ve kimyasal işlemlerde yaygın olarak kullanılır. Renksiz ve yağlı kıvamda olan saf sülfürik asit, 1.84 g/cm³ yoğunluğa sahip olup, kaynama noktası 337°C civarındadır. Donma noktası ise yaklaşık -10°C'dir. Saflık derecesi ise %95-97 aralığındandır. Su ile karıştırıldığında güçlü bir ekzotermik reaksiyon meydana gelir, bu da çözünme sırasında ısı açığa çıkmasına neden olur. Sülfürik asit, metallerle ve bazı organik bileşenlerle şiddetli reaksiyonlar vererek aşındırıcı bir etki gösterir. Ayrıca, yüksek reaktivitesi nedeniyle, metal oksitleri, bazları ve diğer inorganik bileşenlerle de reaksiyona girer. Saf sülfürik asidin kokusu genellikle yoktur, ancak düşük konsantrasyonlarda asidik bir koku yayabilir. Endüstriyel alanlarda, gübre üretimi, petrokimya işlemleri, metal temizliği, su arıtma ve kimyasal sentez gibi birçok farklı alanda kullanılır. Ancak, bu asit deriye temas ettiğinde ciddi yanıklara yol açabilir ve metallerle korozyona neden olabilir, bu yüzden dikkatli kullanılmalı ve saklanmalıdır (Lee, 2017).

Hidroklorik asit, güçlü bir asit olup genellikle su içinde çözünmüş formda bulunur ve birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılır. Kimyasal formülü HCl olan bu madde, genellikle renksiz bir çözelti olarak bulunur ve yoğunluğu %37'lik çözeltisiyle 1.19 g/cm³'tür. Kaynama noktası yaklaşık 110°C olan hidroklorik asit, saf formda 85°C'de kaynar. Asidik özellikleri güçlü olup, pH değeri saf çözeltisi için 1 civarındadır ve su ile karıştığında iyonlaşarak H^+ (proton) ve Cl^- (klorür) iyonları oluşturur. Kimyasal olarak, metallerle, oksitlerle ve karbonatlar ile reaksiyona girer, bu da hidrojen gazı ve tuzların oluşmasına yol açar. Hidroklorik asit, aynı zamanda oldukça aşındırıcıdır; deriyle teması ciddi yanıklara sebep olabilir ve metal yüzeylerde korozyona yol açar. Ayrıca, keskin bir kokusu vardır ve yüksek konsantrasyonlarda bu koku daha da güçlü hale gelir. Endüstriyel kullanımlarda temizlik, su arıtma, kimyasal sentez, gübre üretimi ve ilaç sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, bu güçlü asit, dikkatli kullanılmalı ve uygun güvenlik önlemleriyle işlenmelidir (Smith & Garrison, 2019).

Sodyum hidroksit, güçlü bir baz olup, endüstriyel ve laboratuvar uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir kimyasal bileşiktir. Beyaz, kokusuz, sert ve kırılgan bir katı formda bulunur. Su ile karıştırıldığında çözeltisi son derece aşındırıcı ve alkalin hale gelir. Sodyum hidroksitin yoğunluğu, katı formda 2.13 g/cm³'tür, çözeltilerinin yoğunluğu ise yaklaşık 1.53 g/cm³ civarındadır. Katı sodyum hidroksit kaynamaz, fakat çözeltisinin kaynama noktası 140–150°C civarındadır. pH değeri 12–14 arasında olan bu bileşik, güçlü bazik özellik gösterir ve suya karıştırıldığında hidroksit iyonu (OH^-) salar. Çözünme işlemi sırasında ısı açığa çıkar. Deriyle teması ciddi yanıklara yol açabileceği için dikkatli kullanılmalıdır. Sabun yapımı, kâğıt endüstrisi, su arıtma ve kimyasal sentez gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır. Bu bileşik, birçok endüstriyel süreçte önemli bir rol oynar ve çeşitli kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesini sağlar (Carlson & Hugdes, 2020).

Uygulanan Analiz Metodu

Çalışmada karşılaştırma yapabilmek ve kullanılacak farklı tip korozyon önleyici malzeme türevlerinin, beton kimyasal bozulmalarını önlemedeki etkinliklerini belirleyebilmek için; öncelikle referans alınacak, yüzeyi korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış kontrol numuneleri (N0*) hazırlanmıştır. Çalışmada temel yaklaşım; farklı türde korozyon önleyici malzemelerin, betonda meydana gelebilecek kimyasal bozulmalar durumunda betonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerine ne oranda katkı sağlayabileceği, farklı oranlarda kimyasal ortam koşullarına maruz kalmış beton için uygulama yapılması planlanan yüzey kaplamalarında, kullanması gereken malzeme türevinin belirlenebilmesi gibi teknik değerlendirmelere ışık tutabilecek bulguların elde edilebilmesidir. Bu etkenlerin araştırılması için referans kontrol numuneleri ile birlikte toplamda 104 adet 15x15x15 cm^3 boyutunda ve C30/37 dayanım sınıfına sahip kübik beton numuneleri hazırlanmıştır. Beton test

numunelerinin kalıplanması işlemi 20±2°C sıcaklıkta, rüzgârdan ve nem kaybından korunacak bir ortamda gruplar halinde tamamlanmıştır. Kalıplanmış numuneler 1 gün sonra kalıplardan çıkarılmış olup, TS EN 12390-1 (2013) standardında göre beton numuneleri kalıptan çıkarıldıktan sonra ilk 7 gün boyunca su ortamında kürlemeye devam edilmiştir. 7 günlük kür sürecini tamamlayan beton numuneler oluşturulan kür havuzlarından alınarak daha sonra kurumaya bırakılmıştır (Şekil 1).

Şekil 1. Analizlerde kullanılacak beton örneklerinden genel bir görünüm

Beton numuneleri kendi arasında gruplandırılarak her bir grup test örneği sonrasında yüzeyleri korozyon önleyici malzemeler ile kaplanmış, aşağıda belirtilen kodlama sistemiyle etiketlenmiş olup, kaplama malzemesin kuruması için uygun ortam koşulları sağlanmıştır (Şekil 2). Kodlama sistemi;

N0: Yüzeyi korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış kontrol numunesi
N1: Yüzeyi Bitüm bazlı korozyon önleyici malzeme (K1) ile kaplanmış numune
N2: Yüzeyi Solventsiz epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme (K2) ile kaplanmış numune
N3: Yüzeyi Poliaspartik epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme (K3) ile kaplanmış numune

Şekil 2. Beton örneklerinin korozyon önleyici malzeme ile kaplanmasına ait genel bir görünüm

Beton örneklerin yüzeyi korozyon önleyici malzemeler kaplama işlemi tamamlandıktan sonra, 3 ayrı çözelti ortamı hazırlanmıştır. Çalışması kapsamında; Sülfürik Asit, Hidroklorik Asit ve Sodyum Hidroksit gibi kimyasalların farklı karışım oranı kombinasyonlarında hazırlanan çözelti 3 farklı deney havuzları içerisinde hazırlanmıştır. Çözeltilere ait Tablo 1'de verilen karışım oranlarında Sülfirik Asit ve Hidroklorik Asit, aşırı ısınma ve sıçrama hali olmaması için gerekli güvenlik önlemi (koruyucu gözlük, eldiven, laboratuvar önlüğü ve sürekli ve iyi bir şekilde havalandırılabilen ortam şartlarında) tedbirleri de alınarak saf suyla ince ve yavaş bir akma halinde seyreltilmiştir. Ardından çözeltilere

sodyum hidroksit eklenmiştir. Sodyum Hidroksitin eklenmesi esnasında çözelti homojen bir dağılım gerçekleştirebilmesi amacıyla sürekli olarak karıştırılmıştır.

Sülfürik asit (H_2SO_4), hidroklorik asit (HCl) ve sodyum hidroksit (NaOH)'den oluşturulan deney havuzları içerisindeki çözeltilerinin beton numuneleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, yüzeylerine korozyon önleyici malzemeler sürülmüş beton test numuneleri daldırma yöntemiyle bu kimyasal ortamlara maruz bırakılmıştır (Şekil 3). Daldırma yöntemi, beton numunelerinin tamamen kimyasal çözelti içerisinde kalacak şekilde belirli bir süre boyunca sıvıya batırılması esasına dayanır. Bu süreçte, çözeltiler numunelerin yüzeyine ve iç yapısına etki ederek kimyasal reaksiyonların oluşumunu sağlar. Hazırlanan numuneler, her bir çözeltinin belirlenen konsantrasyonunda ve sabit sıcaklıkta 28 gün bekletilmiş, bu aralıklarla numuneler çözeltilerden çıkarılarak kütle kaybı, basınç dayanımı, ultrasonik ses geçiş hızı ve yüzey elektriksel direnç değerlerindeki değişiklikler incelenmiştir (Şekil 4). Bu yöntem sayesinde betonun agresif kimyasal ortamlardaki dayanıklılık performansı ve bozunma mekanizmaları, korozyon önleyici malzemelerin betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, betonun uzun ömürlülüğünü artırmaya yönelik iyileştirme çalışmalarına ışık tutmaktadır.

Tablo 1. Test için hazırlanan numune grupları ve çözelti hazırlamada karışım oranları

AD	ÇÖZELTİ	KARIŞIM ORANI(%)			
		Sülfirik Asit (hacim/çözelti)	Hidroklorik Asit (hacim/çözelti)	Sodyum Hidroksit (ağırlık/ çözelti)	Su (hacim/çözelti)
Kontrol Numunesi (N0)	H0*	0 %	0 %	0 %	0 %
	H1*	1 %	5 %	0,5 %	94 %
	H2*	2,5 %	2,5 %	0,5 %	95 %
	H3*	5 %	1 %	0,5 %	94 %
Bitumastic 300M (N1)	H1	1 %	5 %	0,5 %	94 %
	H2	2,5 %	2,5 %	0,5 %	95 %
	H3	5 %	1 %	0,5 %	94 %
Admiral Solventsiz Beton Astarı (N2)	H1	1 %	5 %	0,5 %	94 %
	H2	2,5 %	2,5 %	0,5 %	95 %
	H3	5 %	1 %	0,5 %	94 %
UV Dayanımlı Poliaspartik Epoksi (N3)	H1	1 %	5 %	0,5 %	94 %
	H2	2,5 %	2,5 %	0,5 %	95 %
	H3	5 %	1 %	0,5 %	94 %

H0: Kuru ortam

H1: 1.Havuz çözeltisi (çözelti hacmince; %1 sülfürik asit, %5 hidroklorik asit, %94 saf su ve çözelti ağırlığınca %0,5 sodyum hidroksit)

H2: 2.Havuz çözeltisi (çözelti hacmince; %2,5 sülfürik asit, %2,5 hidroklorik asit, %95 saf su ve çözelti ağırlığınca %0,5 sodyum hidroksit)

H3: 3.Havuz çözeltisi (çözelti hacmince; %5 sülfürik asit, %1 hidroklorik asit, %94 saf su ve çözelti ağırlığınca %0,5 sodyum hidroksit)

Şekil 3. Deney havuzlarına ait genel bir görünüm

Şekil 4. Kimyasal çözelti ortamına maruz kalmış beton örneklerinden genel bir görünüm

Araştırma Bulguları

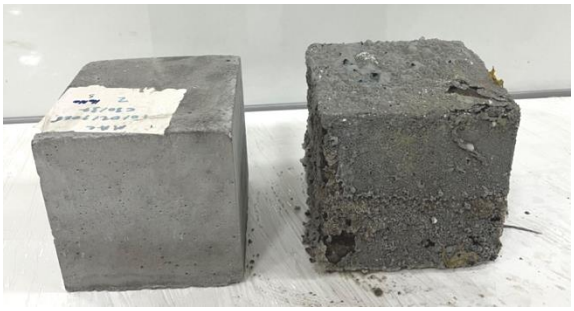
Kütle Kaybı Analizi

Çalışma kapsamında yüzeyleri korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış ve kaplanmış beton test örneklerinin kütle kaybı değerleri Tablo 2'de % değerler olarak verilmiştir.

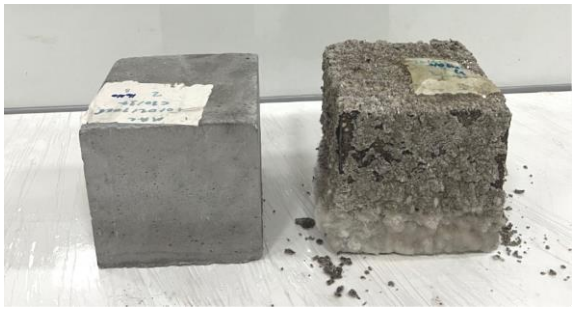
Tablo 2. Beton test örneklerinin kütle kaybı analiz bulguları

	Çözelti Havuzu **H0** (H_2SO_4:%0, HCl:%0, NaOH:%0)	Çözelti Havuzu **H1** (H_2SO_4:%1, HCl:%5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H2** (H_2SO_4:%2.5, HCl:%2.5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H3** (H_2SO_4:%5, HCl:%1, NaOH:%0.5)
Numune Kodu	Kütle Kaybı (%)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Kaybı (%)	Kütle Kaybı (%)
N0	0,17	1,59	1,21	1,13
N1	-	0,29	0,24	0,95
N2	-	0,77	0,34	0,93
N3	-	1,43	0,29	0,89

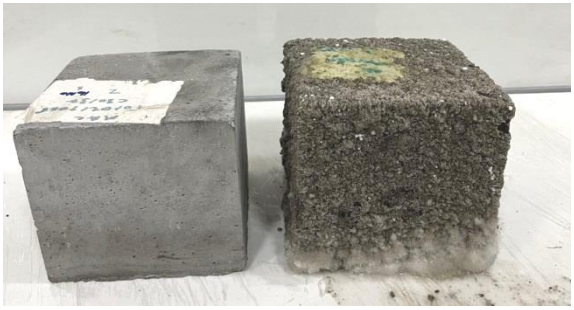
Yüzeyi herhangi bir korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış ve 28 gün boyunca derişiminde korozif etki amaçlı herhangi bir kimyasal malzeme bulunmayan su ortamına maruz kalmış kontrol beton örneğinin kütle kaybı değeri ortalama %0,17 olarak belirlenmiştir. Kontrol örnekleri, farklı derişim oranlarında hazırlanmış olan 3 ayrı çözelti ortamına eşdeğer süreyle maruz bırakıldığında, 28 gün etkileşim sonrası kütlelerinde önemli ölçüde değişimler olduğu görülmüştür. Bu değişim kütle kaybı şeklinde olup, H1 havuz ortamı çözeltisinde %1.59, H2 havuz ortamı çözeltisinde %1,21 ve H3 havuz ortamı çözeltisinde ise %1.13'dür. Buradan görüldüğü gibi, en yüksek kütle kaybı değeri H1 havuz ortamında elde edilmiştir. Bunda etken olan faktörün; en yüksek HCl asit bileşim oranının H1 nolu havuz çözeltisinde olmasından kaynakladığı düşünülmektedir. Diğer bir değişle, çözelti ortamında HCl asit varlığının artışı, kaplanmamış beton örneğinin deformasyonuna daha fazla oranda etki ettiğidir. Ancak, Tablo 2'deki diğer kütle kaybı değerleri irdelendiğinde ise korozyon önleyici malzeme türüne bağlı olmak koşuluyla, yüzeyleri kaplanmış tüm beton örneklerinde kütle kaybı değerleri, kontrol örneklerine kıyasla daha az düşük değerlerde olup, ağırlık değişimindeki deformasyon oranları daha az düzeyde gelişmiştir. Korozyon önleyici malzeme türünün, kütle kaybı değişimindeki etkinliğini (Şekil 5) daha detay irdelemek amacıyla, yüzeyleri korozyon önleyici malzemeler ile kaplanmış numunelerin kütle kaybı değerlerinin kontrol örneğinin kütle kaybı değerline olan farkı bağlamında irdelendiğinde Şekil 6'da verilen grafiksel ilişki elde edilmektedir.



N0 numunesi – Çözelti H1 etkileşimi



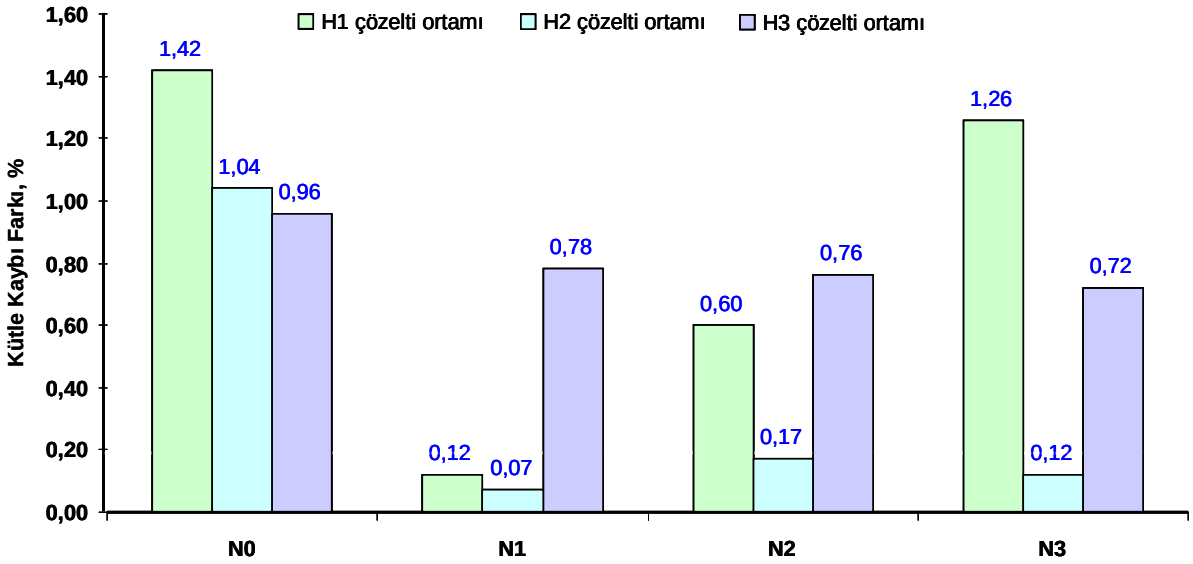
N1 numunesi – Çözelti H1 etkileşimi



N2 numunesi – Çözelti H1 etkileşimi

N3 numunesi – Çözelti H1 etkileşimi

Şekil 5. Korozyon önleyici malzemelerin çözelti etkileşimleri sonrası genel görünümleri



Şekil 6. Korozyon önleyici malzemelerin kontrol test örneğine göre kütle kaybı değişim analizi

Şekil 6'dan görüleceği üzere, yüzeyleri kaplanmamış kontrol beton örneklerinin H1-H3 havuz çözelti ortamlarına maruz kaldığında, çözelti ortamsız koşulda % kütle kaybı değerleri arasındaki fark 0.96 – 1.42 arasında değişim göstermektedir. Aynı zamanda bu değerler, çalışma kapsamında elde edilen en yüksek kütle kaybı değişim miktarlarını da temsil etmektedir. Bununla birlikte, bitüm bazlı korozyon önleyici malzeme ile kaplanmış test örneklerinde ise bu fark 0.07-0.78 arasında değişim göstermektedir. Solventsiz epoksi ve Poliaspartik epoksi bazlı korozyon önleyici bazlı malzeme kaplamalarına kıyasla, bitüm bazlı korozyon önleyici malzemelerin betonun çözelti ortamlarında daha düşük düzeylerde kütle kaybına sebep olduğu belirlenmiştir. Bu eğilim, beton örneklerinin farklı çözelti ortamlarına belirli bir süre maruz kalmaları durumunda, ağırlık değişimlerinin minimum seviyede etkilenmeleri açısından bitüm bazlı korozyon önleyici malzemelerin daha etkin bir rol oynadığı görülmektedir.

Basınç Dayanımı Analizi

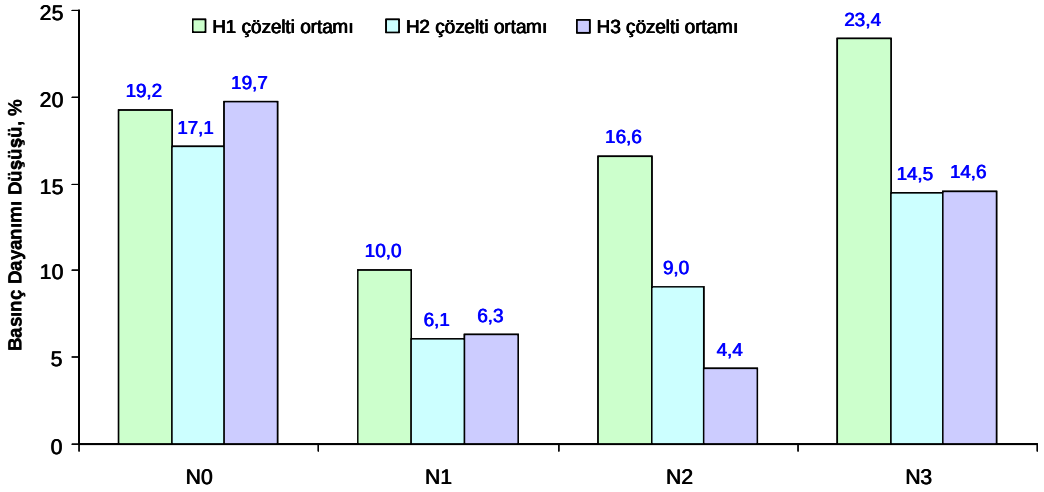
Çalışma kapsamında yüzeyleri korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış ve kaplanmış beton test örneklerinin basınç dayanımı değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Beton test örneklerinin basınç dayanımı analiz bulguları

	Çözelti Havuzu **H0** (H_2SO_4:%0, HCl:%0, NaOH:%0)	Çözelti Havuzu **H1** (H_2SO_4:%1, HCl:%5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H2** (H_2SO_4:%2.5, HCl:%2.5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H3** (H_2SO_4:%5, HCl:%1, NaOH:%0.5)
Numune kodu	28 gün kür sonrası Basınç Dayanımı (N/mm^2)	28 gün kür sonrası Basınç Dayanımı (N/mm^2)	28 gün kür sonrası Basınç Dayanımı (N/mm^2)	28 gün kür sonrası Basınç Dayanımı (N/mm^2)
N0	41,63	33,62	34,50	33,42
N1	-	37,47	39,10	39,00
N2	-	34,72	37,87	39,81
N3	-	31,90	35,61	35,56

Yüzeyi herhangi bir korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış ve 28 gün boyunca derişiminde korozif etki amaçlı herhangi bir kimyasal malzeme bulunmayan su ortamına maruz kalmış kontrol beton örneğinin basınç dayanımı değeri ortalama 41,63 N/mm^2 olarak belirlenmiştir. Kontrol örnekleri, farklı derişim oranlarında hazırlanmış olan 3 ayrı çözelti ortamına eşdeğer süreyle maruz bırakıldığında, 28 gün etkileşim sonrası kütlelerindeki deformasyona bağlı değişimler sebebiyle tüm serilerde beton örneklerinin basınç dayanım değerlerinde azalmalar olduğu görülmüştür. Korozyon önleyici malzeme türünün, 28 gün kür sonrası basınç dayanımı değişimindeki etkinliğini irdelemek amacıyla, yüzeyleri

korozyon önleyici malzemeler ile kaplanmış numunelerin basınç dayanımı değerlerinin kontrol örneğinin basınç dayanımı değerline göre % değişimi Şekil 7'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 7. Korozyon önleyici malzemelerin kontrol test örneğine göre basınç dayanım değeri % değişimi

Şekil 7'den görüldüğü üzere, kontrol örneğine göre en düşük basınç dayanım değişimi N1 serisi numunelerde elde edilmiştir. Tüm çözelti ortamlarında bitüm bazlı korozyon önleyici malzeme ile kaplanmış test örneklerinde dayanım kaybı %6.1 - %10 arasında oluşmuştur. Bu da, diğer korozyon önleyici malzeme bileşenlerinin etkisine göre en düşük değer aralığı olup, betonun korozyon önleyici malzemeyle kaplanmasında bu çalışmada test edilen 3 malzeme arasında en etkin bir türev olduğunu temsil etmektedir. Bu değerlendirmenin yanı sıra etkinlik değerlendirmesine göre sırasıyla N2 kodlu serilerde Solventsiz epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme ve sonrasında Poliaspartik epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme geldiği görülmektedir. Bu incelemelerde genel gözlem olarak, betonun kimyasal etkileşim sonrası basınç dayanımına etken olan temel faktörler arasında kimyasal deformasyona bağlı betonun birim ağırlığının azalması, dolayısıyla kütle kaybı değeri oluşması yer almaktadır. Bununla birlikte, kimyasal deformasyona paralel olarak betonun matris yapısında kılcal çatlakların oluşumu ve/veya gözenekliliğinin artış eğilimi göstermesi gibi faktörlerde görülebilmektedir.

Ultrases Geçiş Hızı Analizi

Çalışma kapsamında yüzeyleri korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış ve kaplanmış beton test örneklerinin ultrases geçiş hızı değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Beton test örneklerinin ultrases geçiş hızı analiz bulguları

	Çözelti Havuzu **H0** (H_2SO_4:%0, HCl:%0, NaOH:%0)	Çözelti Havuzu **H1** (H_2SO_4:%1, HCl:%5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H2** (H_2SO_4:%2.5, HCl:%2.5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H3** (H_2SO_4:%5, HCl:%1, NaOH:%0.5)
Numune Kodu	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)
N0	3,00	1,27	1,30	1,31
N1	-	3,00	1,46	1,81
N2	-	3,00	1,38	0,93
N3	-	1,34	1,44	1,51

Yüzeyi herhangi bir korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış ve 28 gün boyunca derişiminde korozif etki amaçlı herhangi bir kimyasal malzeme bulunmayan su ortamına maruz kalmış kontrol beton örneğinin ultrases geçiş hızı değeri ortalama 3,00 km/s olarak belirlenmiştir. Kontrol örnekleri, farklı derişim oranlarında hazırlanmış olan 3 ayrı çözelti ortamına eşdeğer süreyle maruz bırakıldığında, 28 gün etkileşim sonrası kütlelerindeki deformasyona bağlı değişimler sebebiyle hemen hemen tüm

serilerde beton örenklerinin ultrases geçiş hızı değerlerinde azalmalar olduğu görülmüştür. IS 13311:1992 Standardı (Bureau of Indian Standards-BIS, 1992)'ına göre; Tablo 5'de ultrasonik ses geçiş hızı değer aralıklarının beton kalitesi ve korozyon riski açısından değerlendirilmesi verilmiştir.

Bu değerlendirme bir karşılaştırma krieri olarak ele alındığında, IS 13311:1992 Standardı (Bureau of Indian Standards-BIS, 1992)'ına göre bu çalışma kapsamında elde edilen beton kalitesi ve korozyon riski bağlamında bulguların irdelemesi Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Ultrasonik ses geçiş hızı değerlerinin sınıflandırılması (BIS, 1992)

Ultrasonik Ses Geçiş Hızı (km/s)	Beton Kalitesi	Korozyon Riski
> 4.5	Çok iyi	Çok Düşük
3.5 - 4.5	İyi	Düşük
3.0 - 3.5	Orta	Orta
< 3.0	Kötü	Yüksek

Tablo 6. Beton test örneklerine ait bulguların IS 13311:1992 Standardına göre yorumu

Numune Kodu	Çözelti Havuzu **H0** (H_2SO_4:%0, HCl:%0, NaOH:%0)	Çözelti Havuzu **H1** (H_2SO_4:%1, HCl:%5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H2** (H_2SO_4:%2.5, HCl:%2.5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H3** (H_2SO_4:%5, HCl:%1, NaOH:%0.5)
N0	**Beton Kalitesi: Orta Korozyon Riski: Orta**	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek
N1	-	**Beton Kalitesi: Orta Korozyon Riski: Orta**	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek
N2	-	**Beton Kalitesi: Orta Korozyon Riski: Orta**	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek
N3	-	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek	Beton Kalitesi: Kötü Korozyon Riski: Yüksek

Bu değerlendirme yaklaşımına göre herhangi bir etkileşime maruz kalmamış beton örneklerinin kalitesi ve korozyon riskinin "Orta" seviyede olduğu görülmektedir. Ancak, N1 ve N2 kodlu numunelerde H1 çözeltisi etkileşimleri hariç, diğer tüm kimyasal korozif ortama maruz kalmış beton örneklerin beton kalitesinin "Kötü" ve korozyon riskinin "Yüksek" seviyede olduğu görülmektedir. Bu inceleme ve yaklaşım bulgusu da göstermektedir ki, diğer parametre analizlerinde de ortak eğilim olduğu üzere bitüm bazlı korozyon önleyici malzemenin Solventsiz epoksi ve Poliaspartik epoksi bazlı korozyon önleyici malzemelere göre daha etkin olduğu görülebilmektedir.

Yüzey Elektriksel Direnç Testi Analizi

Çalışma kapsamında yüzeyleri korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış ve kaplanmış beton test örneklerinin yüzey elektriksel direnç değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Andrade vd. (1993) yaptıkları deneysel çalışmalarda, betonun elektriksel direnci ile korozyon hızı arasında ters orantılı bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlar ve betonun elektriksel direnci ile korozyon riski arasında Tablo 8'de beyan ettikleri bir sınıflandırma önerisinde bulunmuşlardır.

Tablo 7. Beton test örneklerinin yüzey elektriksel direnç analiz bulguları

	Çözelti Havuzu **H0** (H_2SO_4:%0, HCl:%0, NaOH:%0)	Çözelti Havuzu **H1** (H_2SO_4:%1, HCl:%5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H2** (H_2SO_4:%2.5, HCl:%2.5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H3** (H_2SO_4:%5, HCl:%1, NaOH:%0.5)
Numune Kodu	Yüzey elektriksel Direnç (kΩ.cm)	Yüzey elektriksel Direnç (kΩ.cm)	Yüzey elektriksel Direnç (kΩ.cm)	Yüzey elektriksel Direnç (kΩ.cm)
N0	814,67	330,00	335,00	322,33
N1	-	947,00	355,00	389,33
N2	-	652,67	341,67	264,33
N3	-	331,33	358,00	363,67

Tablo 8. Betonun yüzey elektriksel direnci ile korozyon riski ilişkisi (Andrade, vd, 1993)

Betonun Yüzey Elektriksel Direnci (kΩ*cm)	Korozyon Riski
≥ 300	İhmal Edilebilir
300 - 60	Düşük
60 - 30	Orta
≤ 30	Yüksek

Yüzeyi herhangi bir korozyon önleyici malzeme ile kaplanmamış ve 28 gün boyunca derişiminde korozif etki amaçlı herhangi bir kimyasal malzeme bulunmayan su ortamına maruz kalmış kontrol beton örneğinin yüzey elektriksel direnç değeri ortalama 815 kΩ*cm olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında bu örnek serisi hariç, diğer geri kalan tüm test örneklerinin yüzey elektriksel direnç değerinin daha düşük düzeylerde olduğu görülmüştür. Tablo 9'a göre betonun yüzey elektriksel direnç değeri düştükçe, korozyon riskinin arttığı görülmektedir. Bu değerlendirme yaklaşımına göre çalışma kapsamında elde edilen örneklerin korozyon riskleri Tablo 9'da irdelenmiştir.

Tablo 9. Beton test örneklerinin korozyon risk yorumu

Numune Kodu	Çözelti Havuzu **H0** (H_2SO_4:%0, HCl:%0, NaOH:%0)	Çözelti Havuzu **H1** (H_2SO_4:%1, HCl:%5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H2** (H_2SO_4:%2.5, HCl:%2.5, NaOH:%0.5)	Çözelti Havuzu **H3** (H_2SO_4:%5, HCl:%1, NaOH:%0.5)
N0	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*
N1	-	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*
N2	-	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *Düşük*
N3	-	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*	Korozyon Riski: *İhmal edilebilir*

Genel olarak yüzeyi bitüm bazlı korozyon önleyici malzeme ile kaplanmış N1 test numunelerine ait deney ve test sonuçları incelendiğinde yüzeyi Solventsiz Epoksi bazlı N2 ve Poliaspartik bazlı korozyon önleyici malzeme ile kaplanmış N3 test numunelerine göre daha iyi seviyede olduğu görülmektedir. Bitüm bazlı korozyon önleyici malzemelerin betonu, korozif ortam etkilerine karşı fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından korumadaki etkinliklerinin diğer malzemelere kıyasla daha iyi olduğu söylenebilmektedir. Korozif ortam etkisine maruz kalan beton yüzeylerde kimyasal bozulmaları minimize edebilmek amacıyla bitüm bazlı korozyon önleyici yüzey kaplamalarından yararlanılabilir.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında 3 farklı korozyon önleyici malzeme türevinin hazırlanan beton örnekleri üzerindeki kimyasal etkileşim süreçleri sonrası etkinlikleri deneysel olarak analiz edilmiştir. Bu korozyon önleyici malzemeler arasında en etkin olan malzemenin Bitüm bazlı korozyon önleyici malzeme olduğu görülmüştür. Buna ilaveten, Solventsiz epoksi bazlı korozyon önleyici malzeme ve Poliaspartik epoksi bazlı korozyon önleyici malzemelerinde etkinlikleri de Bitüm bazlı malzemenin etkinliğini sırasıyla takip ettiği görülmüştür. Elde edilen test bulgularına göre uygun koşullarda yüzeye sürme usulüyle tatbik edilen korozyon önleyici malzemeler ile betonun agresif kimyasal korozif ortam koşullarına karşın dayanımı yeterli ölçüde sağlanabileceği belirlenmiştir.

Referanslar

Andrade, C., Alonso, C., & González, J. A. (1993). Electrochemical methods in corrosion of reinforcing steels in concrete. In C. L. Page, K. W. J. Treadaway, & P. B. Bamforth (Eds.), *Corrosion of reinforcement in concrete construction* (pp. 419–434). Royal Society of Chemistry.

Bureau of Indian Standards (BIS). (1992). *IS:13311 (Part 1) - Non-destructive testing of concrete: Part 1: Ultrasonic pulse velocity*. Bureau of Indian Standards.

Carlson, B. M., & Hugdes, D. A. (2020). Sodium hydroxide: Industrial uses, chemical behavior, and safety considerations. *Journal of Applied Chemical Engineering, 48*(4), 225–234.

Dubosc, A., Escadeillas, G., & Blanc, P. J. (2001). Characterization of biological stains on external concrete walls and influence of concrete as substrate on the biomaterial development. *Cement and Concrete Research, 31*(11), 1613–1617. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00605-7

Hewlett, P. C. (2003). *Lea's chemistry of cement and concrete* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Lee, J. H. (2017). Industrial applications and safety considerations of sulfuric acid. *Chemical Safety and Engineering Journal, 25*(3), 112–119.

Liu, Y., & Zhang, H. (2020). Performance and application of polyaspartic epoxy-based anti-corrosion coatings in industrial environments. *Journal of Coating Technology and Research, 17*(4), 815–828.

Mehta, P. K. (2000). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (2nd ed.). McGraw-Hill.

Neville, A. M. (2012). *Beton teknolojisi* (K. Türker, Çev., 4. baskı). Literatür Yayıncılık.

Sanchez-Silva, M., & Rosowsky, D. V. (2008). Modeling deterioration of reinforced concrete structures exposed to corrosion. *Journal of Structural Engineering, 134*(10), 1650–1657.

Smith, R. J., & Garrison, T. M. (2019). Hydrochloric acid: Properties, industrial applications, and safety measures. *Industrial Chemistry Journal, 42*(2), 134–142.

Jain, A., & Morrison, P. R. (2015). *Bitumen and corrosion protection systems: Materials, properties, and performance*. Springer.

TS EN 12390-1, (2013). *TS EN 12390-1: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Numunelerin şekli, boyutu ve diğer gereklilikler*. Türk Standardları Enstitüsü.

Zou, X., Chen, L., & Tang, J. (2020). Performance evaluation of solvent-free epoxy coatings under harsh environmental conditions. *Coatings, 10*(12), 1201.