

Çinko Metalinin Korozyon Davranışına Klorodimetil Silan Etkisinin Araştırılması

Goncagül AKSARAY^{1*}, İlyas DEHRİ²

^{1,2} Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü, 01330, Adana-Türkiye

¹<https://orcid.org/0000-0003-4338-6049>

²<https://orcid.org/0000-0003-0916-6974>

*Sorumlu yazar: goncagulaksaray@gmail.com

Araştırma Makalesi

ÖZ

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 24.02.2023

Kabul tarihi: 18.06.2023

Online Yayınlanma: 20.12.2023

Anahtar Kelimeler:

Çinko

Silan

Sol-jel

Doğrudan daldırma

Korozyon

Bu çalışmada çinko metali üzerinde alkol içerisinde klorodimetil silanın farklı derişimlerde (%5, %10 ve %20) oda koşullarında (25 °C) karışımları hazırlanarak doğrudan daldırma ile silan filmi oluşturulmuştur. Çinko metali yüzeyinde silan filmi oluşturulması için farklı süreler (15, 30, 45 ve 60 dakika) kullanılmıştır. En uygun silan filmi oluşturma koşulları belirlendikten sonra çinko metalinin korozyon davranışları yapay yağmur suyu içerisinde incelenmiştir. Bu amaçla alternatif akım (AC) impedans ölçümleri ve korozyon potansiyelleri belirlenmiştir. Oluşturulan silan filminin yüzey morfolojisi hakkında bilgi sahibi olabilmek amacıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ve temas açısı ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak korozyona karşı en dayanıklı elektrotun %10 klorodimetil silan içeren karışıma 60 dakika doğrudan daldırma ile üretilen olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of the Effect of Chlorodimethyl Silane on Corrosion Behavior of Zinc Metal

Research Article

ABSTRACT

Article History:

Received: 24.02.2023

Accepted: 18.06.2023

Published online: 20.12.2023

Keywords:

Zinc

Silane

Sol-gel

Direct dipping

Corrosion

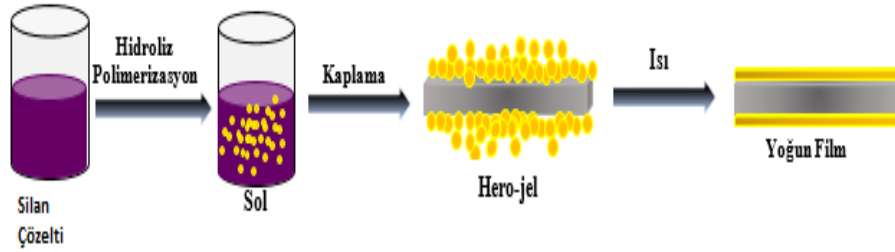
In this study, silane film was formed by direct dipping by preparing mixtures of chlorodimethyl silane in alcohol in different concentrations (5%, 10% and 20%) at room conditions (25 °C) on zinc metal. Different times (15, 30, 45 and 60 minutes) were used to form the silane film on the zinc metal surface. After determining the most suitable silane film formation conditions, the corrosion behaviour of zinc metal was investigated in artificial rain water. For this purpose, alternative current (AC) impedance measurements and corrosion potentials were determined. The scanning electron microscope (SEM) analyses and contact angle measurements were made in order to have information about the surface morphology of the formed silane film. As a result, the most stable silane film against corrosion was formed on the surface of the zinc electrode prepared by direct dipping in a mixture containing 10% chlorodimethyl silane for 60 minutes.

To Cite: Aksaray G., Dehri İ. Çinko Metalinin Korozyon Davranışına Klorodimetil Silan Etkisinin Araştırılması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2023; 6(Ek Sayı): 372-383.

Giriş

Her geçen gün artan nüfus ile birlikte metallerin günlük hayatta kullanımı daha da artmaktadır. Metal aksamalı malzemeler barınmadan yeme içmeye kadar tüm alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Kullanımı arttıkça doğada bulunan metal rezervlerinin azalması nedeniyle metallerin korunması elzem hale gelmiştir. Metaller doğada saf halde bulunmaz, kararlı bileşikler halinde bulunurlar (Erbil, 2012). Saf metali elde etmek için metal bileşiklerine çeşitli işlemler uygulanmaktadır. Uygulanan işlemler ile

metal kararlı halinden daha kararsız hale getirilmekte bu nedenle de metal doğada bulunduğu hale dönme isteği göstermekte ve korozyona uğramaktadır. Korozyon olayı, malzemenin çevre koşullarına bağlı olarak aşınmasına hatta zamanla yok olmasına yol açan bir olaydır (Doğru Mert, 2017; Özer, 2021). Korozyondan korunma için kullanılan yöntemler içerisinde en çok kullanılanı inhibitör kullanımıdır. İnhibitörler yapılarında bulunan N, O ve S gibi elementlerdeki ortaklanmamış elektron çiftleri ve π bağları sayesinde metal yüzeyini tamamen kapatmakta ve metalin çevre ile etkileşimi kesilmektedir (Sarı ve ark., 2017; Altunbaş Şahin ve ark., 2021). Son zamanlarda korozyondan korunma için inhibitör olarak organosilan bileşiklerinin kullanımı artmıştır. Organosilan bileşikleri Si atomuna bağlı en az bir C atomu içeren bileşiklerdir. Silanlar hem organik hem de inorganik malzemeler ile tepkimeye girebilmektedirler (Petrunin ve ark., 2019a; Gladkikh ve ark., 2020). Silanlar yüzeyde çapraz bağlama oluşturmada, kompozit polimer yapımında, yüzeyi modifiye etmede kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra ince film oluşturarak kaplama yapımında da kullanılmaktadır. Silan bileşikleri korozyondan korunmak istenen malzemenin yüzeyinde genellikle sol-jel yöntemi ile biriktirilmekte ve kullanılan solün cinsine bağlı olarak tekli veya çoklu tabakalar oluşturmaktadırlar. Sol- jel yönteminin en önemli avantajı düşük sıcaklıklarda da çok iyi sonuç vermesi ve yüzeyde oluşturulacak filmin kalınlığının istenilen kalınlıkta oluşturulabilmesine imkân vermesidir. Bu yöntemde süreç alkol çözeltisi içerisinde gerçekleşmektedir. Sol-jel çözeltisinde öncelikle sol oluşumu ile sıvı ortamda koloidal parçacıkların karışımı oluşur ve daha sonra jele dönüşerek polimerik zincir oluşumu gözlenir (Kregiel, 2014; Çinko, 2016; Petrunin ve ark., 2019b).

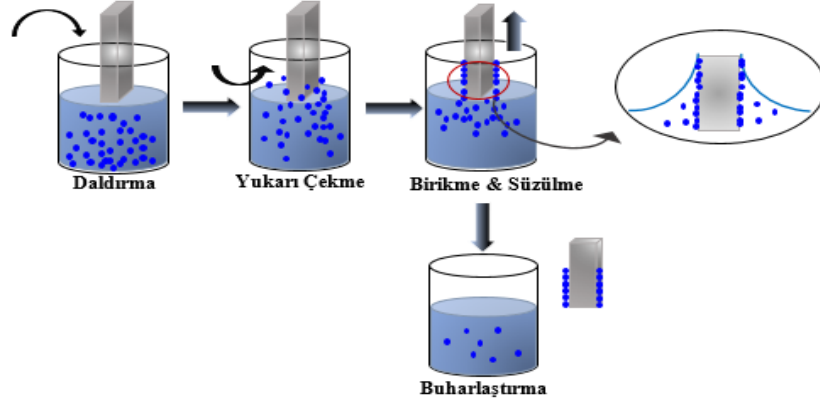


Şekil 1. Sol-jel ile metal yüzeyinde film oluşumunun gösterimi (Çinko, 2016)

Silan kaplama oluşumunda çözeltinin hazırlandıktan sonra bekleme süresi, silan miktarı, pH gibi özellikler metal yüzeyinde oluşacak ince filmin dayanımını etkilemektedir (Gandhi ve ark., 2006; Chico ve ark., 2007; Phanasgaonkar ve Raja, 2009; Romano ve ark., 2011; Ramezanzadeh ve ark., 2016). Organo silanlarda yüzeye bağlanma gerçekleşirken silan molekülü hidroliz olmaktadır. Kararlı Si-OR bağları su ortamında hidrolize olur ve reaktif olarak silanol Si-OH grupları oluşturur. Silanol grupları çok kararlı siloksan Si-O-Si yapıları oluşturmak için birbirleriyle birleşirler.

Daha sonra yüzeyde ince film oluşturulmak istenen metal (Mg, Zn, Al, Fe vb.) yüzeyindeki hidroksil gruplarından bağlanarak Si-O-M yapısı oluşur (De Graeve ve ark., 2007; Hu ve ark., 2007; Matinlinna ve ark., 2007; Matinlinna ve ark., 2018; Sevmez ve ark., 2018). Böylece sol-jel yöntemiyle metal

yüzeyinde ince bir film oluşumu gözlenir. İnce film oluşturmada doğrudan daldırma, yüzeye püskürtme, döndürme gibi yöntemler uygulanmaktadır. Diğer ince film oluşturma yöntemlerine göre sol-jel doğrudan daldırma ile film oluşturma yöntemi ucuz olması, basit bir yöntem olması, yapıya katkı yapabilmeyin kolaylığı, geniş alan oluşturabilme gibi avantajlara sahiptir (Can, 2009; Kityakarn ve ark., 2012; Sönmezoğlu ve ark., 2012; Kim ve ark., 2013; Hakki ve ark., 2019; Poo-arporn ve ark., 2019; Kayani ve ark.,2020; Butt, 2022).



Şekil 2. Doğrudan daldırma ile film oluşturma aşamaları (Can, 2009)

Yaptığımız çalışmada; metalleri korozyondan korumak için etkili ve ucuz bir yöntem önerebilmek amacıyla çinko metali yüzeyinde klorodimetil silan bileşiği ile hazırlanan sol-jel içerisinde doğrudan daldırma ile silan filmi oluşturulmuş ve bu oluşturulan silan filminin yapay yağmur suyu içerisinde korozyon davranışları incelenmiştir. Çalışmada otomobil sanayinde, lehim ve alaşım yapımında, çatı kaplama ve izolasyon yapılması gibi hayatımızı kolaylaştıracak pek çok ürünün yapısında bulunması nedeniyle çinko metali seçilmiştir. Çinko metali içeren endüstrideki tüm parçaların yüzeyinde oluşan korozyon hızını azaltmak ve malzemenin kullanım ömrünü uzatmak amaçlanmaktadır.

Materyal ve Metot

İnce film oluşturmada kullanılan klorodimetil silan ($\text{ClHSi}(\text{CH}_3)_2$) bileşiği analitik saflıkta olup Merck firmasından alınmıştır. Çalışma elektrotu olarak 0,5 cm çapında silindirik metal çubuklardan 5 cm olacak şekilde kesilen bir ucuna bakır tel geçirilip çalışma yüzeyi açıkta kalacak şekilde polyester ile kaplanan çıplak çinko elektrot ve yüzeyinde silan film oluşturulmuş çinko elektrot kullanılmıştır. Çinko elektrotun yüzey alanı $0,196 \text{ cm}^2$ olarak hesaplanmıştır. Potansiyel kontrolü amacıyla referans elektrot olarak gümüş-gümüş klorür elektrot ($\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{Cl}^- 3\text{M}$), karşı elektrot olarak 2 cm^2 yüzey alanına sahip platin elektrot kullanılmıştır.

Elektrotların yüzeyinde oluşturulmak istenen silan filmi için sol-jel yöntemiyle alkol içerisinde klorodimetil silanın farklı derişimlerde (%5, %10, %20) çözeltileri hazırlanmıştır. Doğrudan daldırma yöntemiyle her bir derişimde 15, 30, 45 ve 60 dakika bekletilen çinko elektrotlar kurutulup elektrokimyasal ölçümleri alınmıştır.

Korozyon testleri yapay yağmur suyu içerisinde (sülfürik asit:31,85 ppm, amonyum sülfat: 46,20 ppm, sodyum sülfat: 31,95 ppm, nitrik asit: 15,75 ppm, sodyum nitrat: 21,25 ppm, sodyum klorür: 84,85 ppm) yapılmıştır (Dehri ve ark., 1999). İmpedans ölçümleri ve akım potansiyel eğrileri CHI 660C cihazında üç elektrot yöntemi ile elde edilmiştir. 5 mV genlikte 10^5 - 10^{-1} Hz frekans aralığında impedans ölçümleri alınmış olup elde edilen sonuçlar Nyquist ve Bode eğrileri şeklinde gösterilmiştir. Çalışılan ortamdaki korozyon potansiyelleri belirlendikten sonra 0,001 V/s tarama hızında belirlenen korozyon potansiyelinden 0,2 V'a kadar akım-potansiyel eğrileri elde edilmiştir. Eğrilerden elde edilen sonuçlar çıplak çinko elektrotla ve birbirleriyle kıyaslanmıştır.

En kararlı olan silan film için SEM (SEM/EDS FEI Quanta 650 Field Emission) ve temas açısı ölçümleri (Attension Together with Biolin Scientific Version 2.6 (rp305)serial number AAU110606) yapılmıştır.

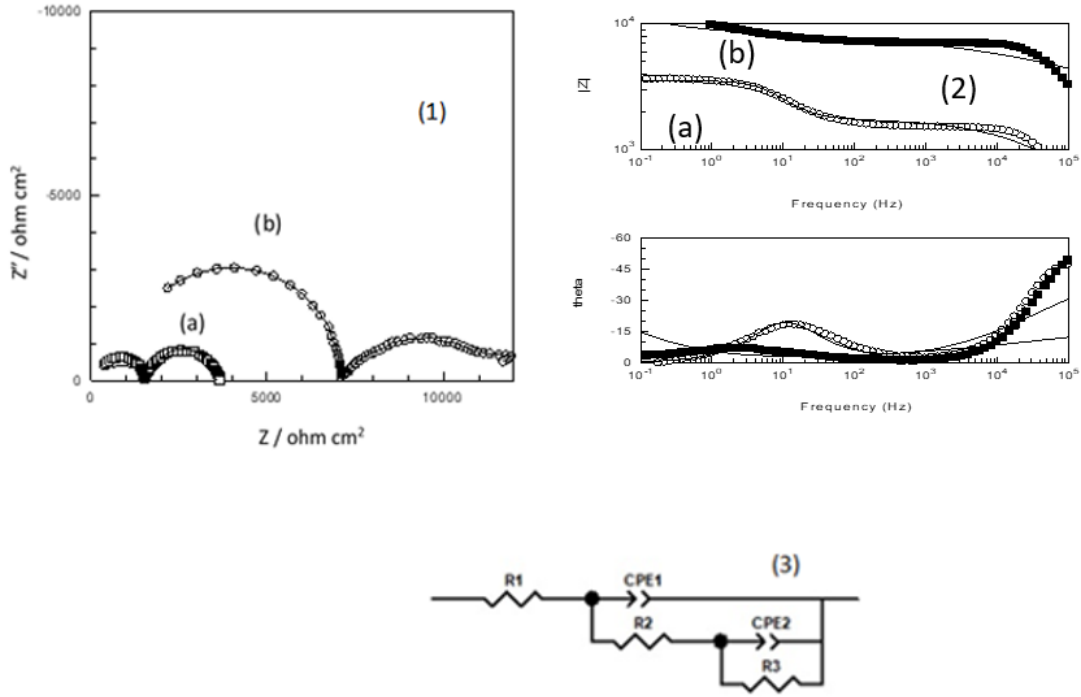
Bulgular ve Tartışma

Farklı derişimlerde (%5, %10, %20) klorodimetil silanın alkoldeki çözeltisinde 15, 30, 45 ve 60 dakika bekletilerek oluşturulan silan filmlerinin korozyon davranışlarını incelemek için yapılan impedans ölçümleri sonuçları ZView2 programında modellenmiştir ve eşdeğer devre elemanlarının değerleri Tablo1'de verilmiştir.

%5 klorodimetil silan içeren karışımında doğrudan daldırma yöntemi ile film oluşumu sağlanmaya çalışılan elektrotların direnç değerlerinin çıplak çinko elektrot ile kıyaslandığında daha düşük olduğu hesaplanmıştır. Direnç değerlerindeki küçülme yüzeyde kararlı silan filminin oluşmadığını göstermektedir. %10 klorodimetil silan içeren karışımında doğrudan daldırma ile 15, 30, 45 ve 60 dakika sürede oluşturulmaya çalışılan silan filmlerinden 15, 30 ve 45 dakikada yapılan ölçümlerde direnç değerlerinin çıplak çinko ile kıyaslandığında düştüğü fakat 60 dakika korozyona karşı oldukça etkili silan filmi oluştuğu görülmüştür. %20'lik klorodimetil silan içeren karışımında direnç değerleri çıplak çinko elektrot ile kıyaslandığında direnç değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Direnç değerlerinin düşmesi bu koşullarda çinko elektrot yüzeyinde kararlı silan filmi oluşturulamadığını göstermektedir (Tablo 1).

Tablo 1. %5, %10, %20 klorodimetil silan çözeltisinin farklı sürelerdeki impedans sonuçları

Zn	Zaman dk	CPE ₁ S.sec ⁿ	n ₁	R ₂ Ohm.cm ²	CPE ₂ S.sec ⁿ	n ₂	R ₃ Ohm.cm ²
Çıplak	0	7,4x10 ⁻⁷	0,53	1765	1,3x10 ⁻⁵	0,97	1781
	15	3,9x10 ⁻⁶	0,51	773,6	5,1x10 ⁻⁵	0,50	1082
%5'lik karışımda oluşturulan film	30	3,4x10 ⁻⁵	0,22	2633	-	-	-
	45	1,2x10 ⁻⁶	0,50	922	3,3x10 ⁻⁵	0,68	873
	60	1,8x10 ⁻⁶	0,48	674,5	1,2x10 ⁻⁵	0,97	458,4
	15	3,9x10 ⁻⁵	0,22	1191	3,2x10 ⁻⁵	0,24	1604
%10'luk karışımda oluşturulan film	30	4,7x10 ⁻⁵	0,28	1701	-	-	-
	45	8,1x10 ⁻⁷	0,52	1653	6,4x10 ⁻⁵	0,53	2163
	60	3,3x10 ⁻⁶	0,26	8780	3,4x10 ⁻⁵	0,58	92136
	15	4,9x10 ⁻⁵	0,71	1593	4,2x10 ⁻⁵	0,37	2958
%20'lik karışımda oluşturulan film	30	4,2x10 ⁻⁵	0,68	1114	1,6x10 ⁻⁵	0,42	2703
	45	7,1x10 ⁻⁸	0,56	1053	1,4x10 ⁻⁵	0,53	2163
	60	2,6x10 ⁻⁹	0,98	844,1	2,0x10 ⁻⁴	0,43	1576



Şekil 3. Çıplak çinko(a) ve 60 dakikada silan film oluşturulmuş çinko(b) için Nyquist(1), Bode(2) eğrileri ve eşdeğer devre(3)

Çıplak çinko ve %10'luk çözeltide 60 dakika sürede oluşturulan silan filminin her ikisinde Nyquist ve Bode eğrilerinde çift eliptik lup görülmektedir ve bu durum eşdeğer devre şeklinde de görülmektedir. Nyquist eğrisinde gözlemlenen ilk eliptik lup elektrota ait yük transfer direncine ikinci lup yüzeyde akümüle olan türlerin ve biriken türlerin direncini temsil etmektedir (Şekil 3).

$$\%KE = (CR_{\text{film oluşturulmuş}} - CR_{\text{işlemsiz}} / CR_{\text{film oluşturulmuş}}) * 100 \quad (1)$$

$CR_{\text{film oluşturulmuş}}$: Yüzeyde film oluşturulan elektrotun korozyon direnci

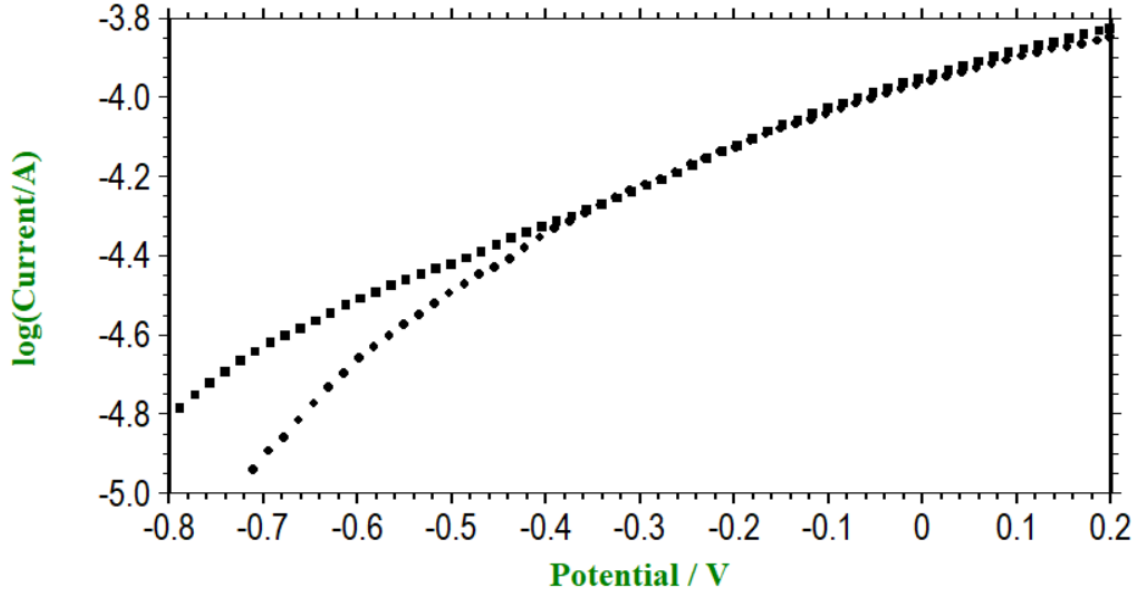
$CR_{\text{işlemsiz}}$: İşlem görmemiş elektrotun korozyon direnci

Çinko metalinin yüzeyinde %10 derişimde 60 dakika sürede oluşturulan silan filmin koruyucu etkisi Eşitlik 1'de verildiği şekilde hesaplandığında bu değer %96,486 olarak bulunmuştur. Diğer derişimlerde ve sürelerde koruyucu etki gözlenmediği için hesaplama yapılamamıştır.

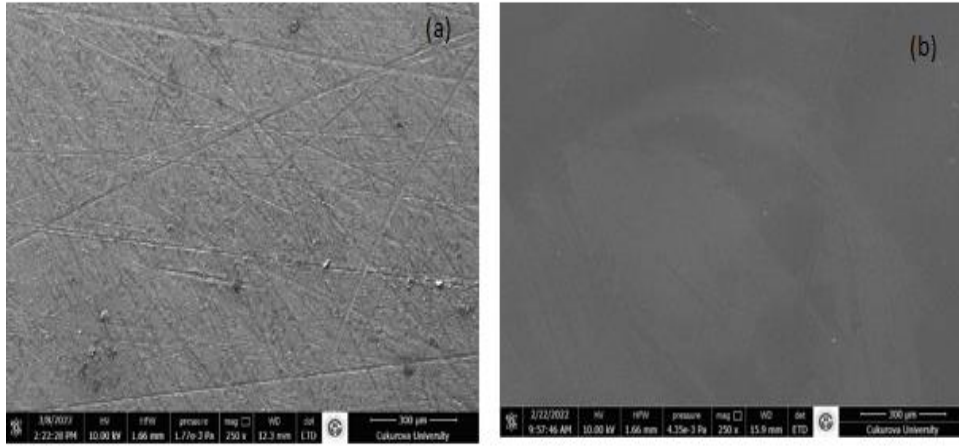
Tablo 2. %5, %10 ve %20 klorodimetil silan çözeltisinin farklı derişimlerde farklı süreler için akım-potansiyel eğrilerinden elde edilen korozyon parametre değerleri

Zn	Zaman dk	E _{kor} (V)	I A/cm ² (0,0 V)	I A/cm ² (0,20 V)
Çıplak	0	-0,710	5,43x10 ⁻⁴	5,56x10 ⁻⁴
	15	-0,834	9,63x10 ⁻⁴	1,24x10 ⁻³
	30	-0,850	5,16x10 ⁻⁴	7,01x10 ⁻⁴
	45	-0,846	1,10x10 ⁻³	1,36x10 ⁻³
%5'lik karışım oluşturulan film	60	-0,887	1,12x10 ⁻³	1,38x10 ⁻³
	15	-0,782	6,27x10 ⁻⁴	8,27x10 ⁻⁴
	30	-0,813	1,0x10 ⁻³	1,27x10 ⁻³
	45	-0,793	3,75x10 ⁻⁴	4,91x10 ⁻⁴
%10'luk karışım oluşturulan film	60	-0,804	5,58.10 ⁻⁴	7,44x10 ⁻⁴
	15	-0,696	4,27x10 ⁻⁴	5,27x10 ⁻⁴
	30	-0,816	7,76x10 ⁻⁴	1,11x10 ⁻³
	45	-0,793	5,75x10 ⁻⁴	6,91x10 ⁻⁴
%20'lik karışım oluşturulan film	60	-0,884	6,05x10 ⁻⁴	8,15x10 ⁻⁴

%5 klorodimetil silan içeren karışımında doğrudan daldırma yöntemi ile film oluşumu sağlanmaya çalışılan elektrotların akım değerleri çıplak çinko elektrot ile kıyaslandığında daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Akım değerlerindeki artış yüzeyde kararlı silan filminin oluşmadığını göstermektedir. %10 klorodimetil silan içeren karışımında doğrudan daldırma ile 15, 30, 45 ve 60 dakika sürede oluşturulmaya çalışılan silan filmlerinde akım değerlerinin artırıldığı görülmüştür (Şekil 4). %20'lik klorodimetil silan içeren karışımında akım değerleri çıplak çinko elektrot ile kıyaslandığında akım değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Akım değerlerinin artması bu koşullarda çinko elektrot yüzeyinde kararlı silan filmi oluşturulamadığını göstermektedir (Tablo 2). EIS ölçümleri ile akım potansiyel eğrileri arasında farklılık görülmektedir. Bunun nedeni EIS ölçümlerinin sistemin E_{ocp} değerlerinde alınmış olması fakat yarı logaritmik akım potansiyel değerlerinin polarize koşullarda elde edilmiş olmasıdır.



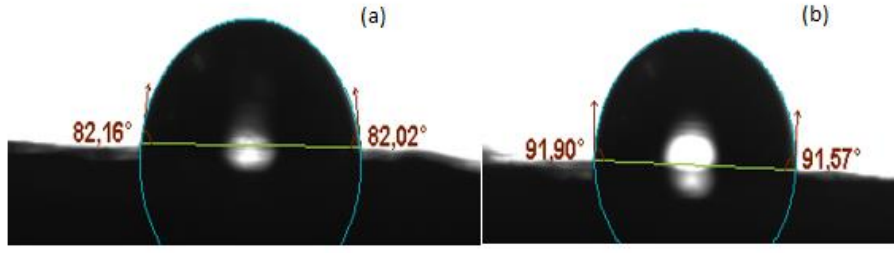
Şekil 4. İşlemsiz çinko elektrot (■) ve %10'luk çözeltide 60 dakika sürede film oluşturulan çinko elektrotun (●) akım-potansiyel eğrileri



Şekil 5. Çıplak çinko elektrotun SEM görüntüsü; (a), %10'luk karışımda 60 dakika sürede silan filmi oluşturulmuş çinko elektrotun SEM görüntüsü; (b)

Çıplak çinko elektrotun taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde yüzeyde zımparalama işleminden kaynaklanan çizgiler görülmektedir. %10'luk karışımda 60 dakika sürede silan filmi oluşturulmuş çinko elektrotun taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde yüzeyde silan filminin oluştuğu homojen ve yüzeyi etkin şekilde koruyan film oluşumu görülmektedir (Şekil 5).

Temas açısı ölçümleri yüzeye distile su damlatma tekniği ile örnek üzerine 4 ml distile su damlatarak yapılmıştır.



Şekil 6. Çıplak çinko elektrotun temas açısı (a), %10'luk karışımda 60 dakika sürede silan filmi oluşturulmuş çinko elektrotun temas açısı; (b)

Çıplak çinko elektrotun temas açısı yüzeyde silan filmi oluşturulmuş çinko elektrotun temas açısından daha küçüktür. Çıplak çinko elektrot hidrofilik özellik gösterirken yüzeyde silan film oluşturulmuş çinko elektrot hidrofobik özellik göstermektedir. Bu durum da yüzeyde silan filminin oluşturulabildiğini göstermektedir (Şekil 6).

Sonuç

Çinkonun korozyona karşı dayanımını artırmak amacıyla farklı derişimlerde farklı süre doğrudan daldırma ile oluşturulan silan filminin korozyon davranışını belirlemek amacıyla yapılan çalışmalarda EIS ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre klorodimetil silanın %10'luk çözeltisinde 60 dakika doğrudan daldırma ile oluşturulan silan filmin polarizasyon direnci ve inhibisyon etkinliği artmaktadır. %5 ve %20 derişimde klorodimetil silan içeren çözeltide tüm sürelerde silan filmi oluşturulmadığı görülmüştür. Özellikle %20 klorodimetil silan içeren karışımda derişim arttıkça yapıda bulunan klorun aktif olması ve metal yüzeyine saldırması nedeniyle yüzeyi korozyona daha açık hale getirdiği düşünülmektedir. Yüzeyde oluşturulan silan filmi koruyucu özellik göstererek metali korozyona karşı korumakta ve inhibitör özelliği göstermektedir.

Teşekkür

Yazarlar Çukurova Üniversitesi'ne teşekkür eder.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışmaları olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduğunu beyan eder.

Kaynakça

Butt MA. Thin-film coating methods: A Successful marriage of high-quality and cost-effectiveness— A brief exploration. *Coatings* 2022; 12(8): 1115. <https://doi.org/10.3390/coatings12081115>.

- Can K. Katı yüzeylere farklı yapıda kendiliğinden toplanan tekli tabakaların (SAMs) oluşturulması ve karakterizasyonu. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, sayfa no: 16-20, Konya, Türkiye, 2009.
- Chico B., Galván JC., De La Fuente D., Morcillo M. Electrochemical impedance spectroscopy study of the effect of curing time on the early barrier properties of silane systems applied on steel substrates. *Progress in Organic Coatings* 2007; 60(1): 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2007.06.007>.
- Çinko UO., Tekstil yüzeylerinin sol-jel yöntemi ile modifikasyonunun araştırılması. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tekstil Mühendisliği Ana Bilim Dalı, sayfa no:7, Bursa, Türkiye, 2016.
- De Graeve I., Vereecken J., Franquet A., Van Schaftinghen T., Terryn H. Silane coating of metal substrates: Complementary use of electrochemical, optical and thermal analysis for the evaluation of film properties. *Progress in Organic Coatings* 2007; 59(3): 224-229.
- Dehri I., Howard RL., Lyon SB. Local electrochemical impedance at the cut-edge of coil-coated galvanized steel after corrosion testing. *Corrosion Science* 1999; 41(1): 141-154.
- Erbil M. Korozyon ilkeler - önlemler. Ankara: Korozyon Derneği, 2012: 1.
- Gandhi JS., Metroke TL., Eastman MA., Van Ooij WJ., Apblett A. Effect of the degree of hydrolysis and condensation of bis-[triethoxysilylpropyl] tetrasulfide on the corrosion protection of coated aluminum alloy 2024-T3. *Corrosion* 2006; 62(7): 612-623.
- Gladkikh N., Makarychev Y., Chirkunov A., Shapagin A., Petrunin M., Maksaeva L., Maleeva M., Yurasova T., Marshakov A. Formation of polymer-like anticorrosive films based on organosilanes with benzotriazole, carboxylic and phosphonic acids: Protection of copper and steel against atmospheric corrosion. *Progress in Organic Coatings* 2020; 141: 105544. DOI:10.1016/j.porgcoat.2020.105544.
- Hakki HK., Allahyari S., Rahemi N., Tasbihi M. Surface properties, adherence, and photocatalytic activity of sol-gel dip-coated TiO₂-ZnO films on glass plates. *Comptes Rendus Chimie* 2019; 22(5): 393-405. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2019.05.007>.
- Hu JM., Liu L., Zhang JQ., Cao CN. Electrodeposition of silane films on aluminum alloys for corrosion protection. *Progress in Organic Coatings* 2007; 58(4): 265-271. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.11.008>.
- Kayani ZN., Maria, Riaz S., Naseem S. Magnetic and antibacterial studies of sol-gel dip coated Ce doped TiO₂ thin films: Influence of Ce contents. *Ceramics International* 2020; 46(1): 381-390. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.08.272>.
- Kim HS., Lee JW., Yantara N., Boix PP., Kulkarni SA., Mhaisalkar S., Grätzel M., Park NG. High efficiency solid-state sensitized solar cell-based on submicrometer rutile TiO₂ nanorod and CH₃NH₃PbI₃ perovskite sensitizer. *Nano Letters* 2013; 13(6): 2412-2417. <https://doi.org/10.1021/nl400286w>.

- Kityakarn S., Pooarporn Y., Songsiriritthigul P., Worayingyong A., Robl S., Braun AM., Wörner M. (Photo) Electrochemical characterization of nanoporous TiO₂ and Ce-doped TiO₂ sol-gel electrodes. *Electrochimica Acta* 2012; 83: 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.07.129>.
- Kregiel D. Advances in biofilm control for food and beverage industry using organo-silane technology: A review. *Food Control* 2014; 40: 32-40. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.11.014.
- Matinlinna JP., Lassila LV., Vallittu PK. The effect of five silane coupling agents on the bond strength of a luting cement to a silica-coated titanium. *Dental Materials* 2007; 23(9): 1173-1180. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.06.052>.
- Matinlinna JP., Lung CYK., Tsoi JKH. Silane adhesion mechanism in dental applications and surface treatments: A review. *Dental Materials* 2018; 34(1): 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.09.002>.
- Doğru Mert B. Yumuşak çeliğin korozyon davranışı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2017; 32(2): 145-152. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.358404>.
- Özer N. Yapı malzemelerinde korozyon ve korozyondan korunma yöntemleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2021; 26(3): 1159-1178. <https://doi.org/10.17482/uumfd.796947>.
- Petrinin MA., Gladkikh NA., Maleeva MA., Maksaeva LB., Yurasova TA. The use of organosilanes to inhibit metal corrosion: A review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* 2019a; 8(4): 882-907.
- Petrinin MA., Gladkikh NA., Maleeva MA., Maksaeva LB., Kostina YV., Shapagin AV., Yurasova TA., Kotenev VA., Tsivadze AY. The formation of self-organizing organosilicone layers on a carbon steel surface and their effect on the electrochemical and corrosion behavior of the metal. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces* 2019b; 55(5): 895-902. DOI:10.3390/ma14195757.
- Phanasgaonkar A., Raja VS. Influence of curing temperature, silica nanoparticles-and cerium on surface morphology and corrosion behaviour of hybrid silane coatings on mild steel. *Surface and Coatings Technology* 2009; 203(16): 2260-2271. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.02.020>.
- Poo-arporn Y., Kityakarn S., Niltharach A., Smith MF., Seraphin S., Wörner M., Worayingyong A. Photocatalytic oxidation of thiophene over cerium doped TiO₂ thin film. *Materials Semiconductor Processing* 2019; 93: 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.12.025>.
- Ramezanzadeh B., Ahmadi A., Mahdavian M. Enhancement of the corrosion protection performance and cathodic delamination resistance of epoxy coating through treatment of steel substrate by a novel nanometric sol-gel based silane composite film filled with functionalized graphene oxide nanosheets. *Corrosion Science* 2016; 109: 182-205. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.004>.

- Romano AP., Fedel M., Deflorian F., Olivier MG. Silane sol-gel film as pretreatment for improvement of barrier properties and filiform corrosion resistance of 6016 aluminium alloy covered cathaphoretic coating. *Progress in Organic Coatings* 2011; 72(4): 695-702. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.07.012>.
- Sarı A., Yıldız R., Dehri İ. Sodyum dietil ditiyokarbomat trihidratın inhibitör olarak asidik ortamda yumuşak çelik korozyonuna elektrokimyasal davranışının incelenmesi. *Technological Applied Sciences* 2017; 12(3): 87-94. <http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2017.12.3.2A0115>.
- Sevmez H., Bankoğlu Güngör M., Yılmaz H. Tam seramik restorasyonlarda uygulanan yüzey işlemleri. *Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi* 2018; 39(3): 148-159.
- Sönmezoğlu S., Koç M., Akın S. İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi* 2012; 28(5): 389-404.
- Altunbaş Şahin E., Aydın Dursun Y., Tunç M., Geçibesler İH., Solmaz R. Bakırın asidik ortamdaki korozyonuna hurma (*Phoenix dactylifera*) çekirdeğinin inhibisyon etkisinin incelenmesi. *Türk Doğa ve Fen Dergisi* 2021; 10(2): 258-264. <https://doi.org/10.46810/tdfd.995969>.