

---

*Araştırma Makalesi / Research Article*

---

## CoMoCrSi ile Kaplanmış Ferritik Paslanmaz Çeliğin Korozyon Davranışı

Hülya DEMİRÖREN<sup>1\*</sup>, Serkan ÖZEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü,  
Çanakkale

<sup>2</sup>Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitlis  
(ORCID: [0000-0001-5213-6151](https://orcid.org/0000-0001-5213-6151)) (ORCID: [0000-0003-0700-1295](https://orcid.org/0000-0003-0700-1295))

---

### Öz

Ferritik paslanmaz çelikler birçok ortamda korozyona karşı oldukça dayanıklıdır. Bilindiği gibi bu dayanımı artırmanın birkaç farklı yolu vardır. Bunlardan bazıları ısıtma işlemi, alaşımlandırma, tasarım, inhibitör kullanımı yüzey kaplamalarıdır. Bu çalışmada, ferritik paslanmaz çelik alaşım yüzeyine plazma püskürtme kaplama yöntemi kullanılarak, CoMoCrSi tozu 600 A akım şiddetinde kaplanmıştır. Kaplamasız ve kaplama uygulanan numuneler üçlü elektrot sisteminde korozyon deneylerine tabi tutulmuştur. Tafel eğrilerinden korozyon hızı hesaplanmıştır. Sonuç olarak yapılan kaplamanın ferritik paslanmaz çeliğin korozyon direncini çok iyi artırdığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Ferritik paslanmaz çelik, CoMoCrSi kaplama, korozyon, Tafel eğrileri.

---

## Corrosion Behavior of Ferritic Stainless Steel Coated with CoMoCrSi

### Abstract

Ferritic stainless steels are highly resistant to corrosion in many environments. As is known, there are several different ways to increase this strength. Some of these are heat treatment, alloying, design, use of inhibitors, surface coatings. In this study, CoMoCrSi powder was coated on the ferritic stainless steel alloy surface using the plasma spray coating method at a current intensity of 600 A. The uncoated and coated samples were subjected to corrosion tests in the triple electrode system. The corrosion rate was calculated from the Tafel curves. As a result, it was determined that the coating increased the corrosion resistance of ferritic stainless steel satisfactorily.

**Keywords:** Ferritic stainless steel, CoMoCrSi coating, Corrosion, Tafel curves.

---

### 1. Giriş

Paslanmaz çelikler, dayanım, korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Paslanmaz çeliklerin ticari olarak üretilmeye ve birçok uygulama türündeki malzemeler için kullanılmaya başlanmasından bu yana yaklaşık 80 yıl kadar kısa bir süre geçti. Paslanmaz çelikler, oksijenle tepkimeye girerek yüzeylerinde oluşturdukları ince ve koruyucu pasif tabaka sayesinde mükemmel korozyon direncine sahiptir. Bu tabaka ana malzemenin agresif ortamla ilişkisini keserek koruma sağlar. Pasif tabakanın koruyuculuğu sonsuz değildir. Koruyucu tabakanın bozulması, aşındırıcı ortamdaki kimyasal veya mekanik saldırılarla meydana gelebilir, bu da çukurlaşma, çatlak korozyonu ve stres korozyon çatlama gibi yerel korozyona neden olur. Paslanmaz çelik türlerinden biri olan ferritik paslanmaz çelikler (FPÇ'ler), %10,5 ile %30 arasında Cr içeren demir esaslı alaşımlardır [1]. FPÇ'nin maliyeti, östenitik paslanmaz çelikten daha düşüktür ve sonuç olarak daha fazla tercih edilir. Co esaslı malzemeler, mekanik mukavemetin yanı sıra korozyona, oksidasyona ve aşınmaya karşı mükemmel bir direnç gösterir. CoMoCrSi alaşımlarında gözlenen dikkate değer iyi kaplama özellikleri, daha yumuşak bir kobalt bazlı alaşım matrisinde dağılımı sert çökeltilerin (kobalt-molibden-silikon bazlı intermetalik Laves fazları) oluşumundan kaynaklanmaktadır [2]. Paslanmaz

---

\*Sorumlu yazar: [hulyademiroren@gmail.com](mailto:hulyademiroren@gmail.com)

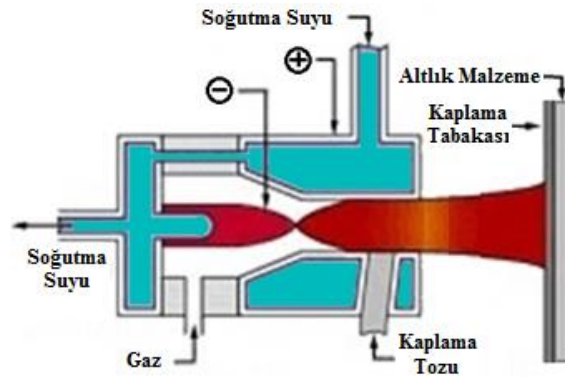
Geliş Tarihi: 11.06.2021, Kabul Tarihi: 12.08.2021

çeliklerin korozyon dirençlerinin geliştirilmesi için pek çok kaplama çalışması yapılmıştır. Wang ve arkadaşları, difüzyon bağ yöntemi ile AISI 441 FSS Co kaplama yapmıştır. Sonuçta korozyon direncini artırmada basit difüzyonla bağlama yönteminin, diğer koruyucu alaşım kaplamalarını imal etmek için kullanılabileceğini bulmuşlardır [3]. Kim ve arkadaşları yüzey modifikasyon yöntemleri olarak oksit dispersiyonu ile güçlendirilmiş ferritik-martensitik (ODS-FM) çelik üzerine alüminid difüzyon kaplamaları uygulamış, sonuçta Al açısından zengin bir yüzey tabakasının, Ni bir difüzyon bariyeri görevi gördüğü için S-CO<sub>2</sub> korozyonundan iyi koruduğu tespit etmiştir [4]. Başka bir çalışmada tek katmanlı TiN, CrN ve çok katmanlı TiCrN filmleri, CAD tekniği ile SUS 430 ferritik paslanmaz çelik yüzeylerde depolanmıştır. Çok katmanlı TiCrN filminin en iyi mekanik özellikleri ve korozyon direncini sergilediği görülmüştür [5]. You ve arkadaşları kompakt bir CrNx tabakası, çok arklı iyon yöntemi kullanılarak 430SS üzerine kaplamışlar, ardından CrNx/430SS üzerinde bir Ni-Fe alaşımlı kaplamanın elektrodpozisyonunu yapmışlardır. Ni-Fe/CrNx kaplı alt tabaka oksidasyon davranışı ve CrNx bariyer tabakasının etki mekanizmasını tartışmışlardır [6]. Bijalwan ve ark. [7] düşük karbonlu hafif çelik numuneleri demir esaslı amorf kompozit toz ile kaplamışlar, kaplama kalınlığı önemli olmaksızın çok daha iyi korozyon direnci elde etmişlerdir. Qin ve ark çalışmalarında hafif çelikleri plazma püskürtme yöntemini kullanarak TiCN ile kaplamışlardır. Daha yüksek korozyon direnci elde etmişlerdir [8]. Singh ve ark hafif çelikleri monel-400 ile plazma püskürtme yöntemini kullanarak kaplamışlar, daha iyi mekanik davranış ve korozyon direnci elde etmişlerdir [9]. Kumar ve ark [10] hafif çelikleri Fe<sub>63</sub>Cr<sub>9</sub>B<sub>16</sub>C<sub>7</sub>P<sub>5</sub> (%) amorf kristal toz ile kaplamışlar ve plazma parametrelerine göre 4-7 kat daha iyi korozyon direnci elde etmişlerdir.

Bu çalışma, plazma püskürtme kaplama yöntemi ile CoMoCrSi tozu kaplanmış ferritik paslanmaz çeliğin, kaplanmamış ferritik paslanmaz çeliğe kıyasla korozyon davranışını incelemek ve kaplama tabakasının korozyon davranışını iyileştirmedeki etkisini araştırmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

Ferritik Paslanmaz çelik 80x35x4 mm ölçülerinde hazırlanarak altlık malzemesi olarak kullanılmıştır. Kaplama öncesi; numune yüzeyi kumlanarak pürüzlendirilmiştir. CoMoCrSi karışımli tozlar, plazma püskürtme yöntemiyle ferritik paslanmaz çelik altlık üzerine kaplanmıştır. Kaplama esnasında 3MB tabanca, 600 A akım şiddeti, 65 V gerilim, 100 mm püskürtme mesafesi kullanılmıştır. CoMoCrSi tozları, Sulzer Metco tarafından 68F-NS kodu ile temin edilmiştir. Tablo 1'de CoMoCrSi tozunun ağırlıkça % kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

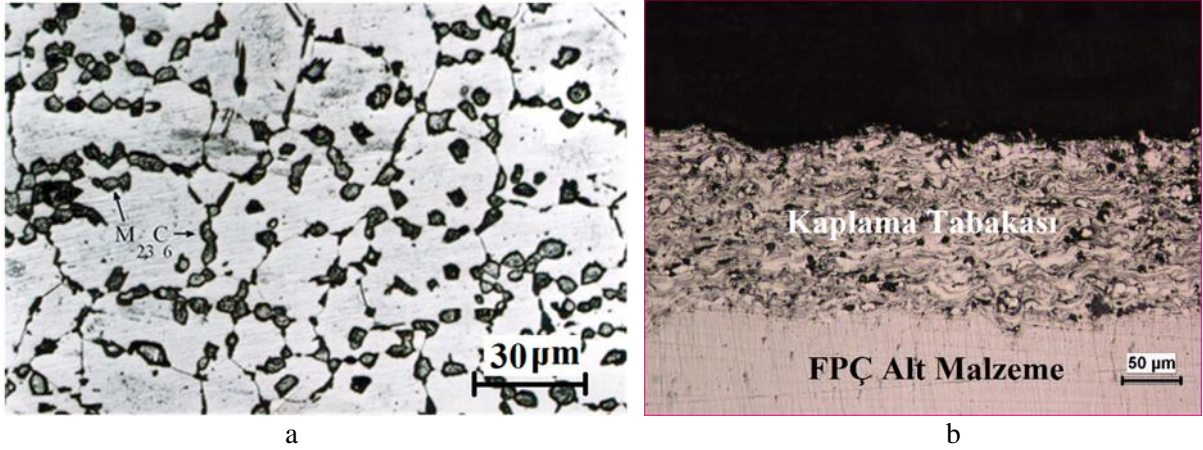


Şekil 1. Plazma Püskürtme sisteminin şematik görünüşü [11]

**Tablo 1.** CoMoCrSi tozunun % ağırlıkça kimyasal kompozisyonu

Toz/Element	CoMoCrSi
Kobalt	Kalan
Molibden	28,5
Krom	17,5
Silisyum	3,4
Sulzer Kodu	Metco 68F-NS
Toz Ebatı (µm)	45 ile 10 arası

Şekil 2' de ferritik paslanmaz çelik ve kaplanmış numunenin optik fotoğrafları görülmektedir. Şekil 2a' da görüldüğü gibi çok yaygın bir şekilde  $M_{23}C_6$  karbürleri görülmektedir. Bu karbürlerin hem çoklu mikroyapıya sebep olmaları hem de yüksek enerjiye sahip olmaları sebebiyle korozyonu hızlandırıcı yapılar olduğu bilinmektedir [12]. Şekil 2b' de kaplama yapılmış olan S2 numunesine ait mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Kaplama tabakasının, termal sprej kaplamaların genelinde görülen gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Yaklaşık olarak 150 µm bir kaplama tabakası elde edilmiştir. Altlık malzeme olan ferritik paslanmaz çelik ile CoMoCrSi kaplama tabakası arasında herhangi bir boşluğun oluşmadığı görülmektedir. Lamelli yapılar, termal püskürtme kaplamaların klasik görülen yapılarından [13,14]. 600 A akım şiddetinde kaplanan S2 numunesinde de lamelli bir mikroyapı görülmüştür.



Şekil 2. a) S1 numunesinin (FPC), b) S2 numunesinin (Kaplanmış FPC) mikroyapı resimleri.

Korozyon deneyleri AC impedans tekniği ile yapılmıştır. Korozyon olayları elektrokimyasal olaylardır. Bu yüzden korozyon hızlarının elektrokimyasal yöntemler kullanılarak ölçülmesi çok yaygındır. Ancak bu yöntemlerde dışarıdan uygulanan gerilim, malzemenin yüzeyini bozduğu için doğruluğu konusunda şüpheler oluşturmaktadır. Bu yöntemlerin doğruya en yakın şekilde değerlendirilmesi için çok zor olan korozyon kinetiğinin çok iyi bilinmesi gerekir [15].

Uygulanan gerilimin en düşük olduğu, dolayısıyla yüzey yapısının en az bozulduğu polarizasyon direnci uygulanabilir bir yöntemdir. Polarizasyon direnci yönteminde korozyon hızı  $i_{corr}$  aşağıdaki denklemle verilir [15]:

$$i_{corr} = \frac{1}{R_p} \frac{b_a b_c}{2.303 (b_a + b_c)} \quad (1)$$

Denklemdaki  $b_a$  ve  $b_c$  Tafel sabitleridir. Polarizasyon direnci  $R_p$  ise;

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} \quad (2)$$

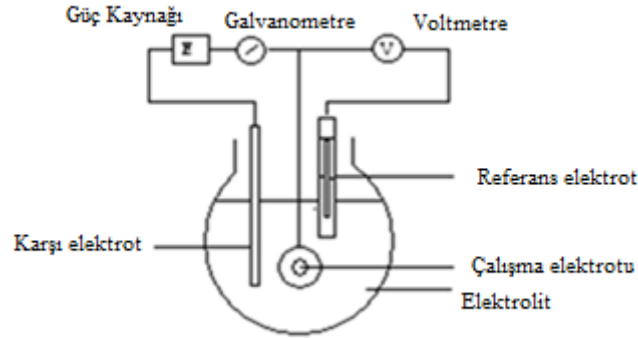
ile tanımlanmaktadır. Burada  $\Delta E$ , potansiyeldeki değişim;  $\Delta i$  ise akımdaki değişimdir.

Korozyon testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Standart üç elektrotlu sisteme sahip hücre düzeneği kullanılmıştır. Korozyon deneyinin şematik görüntüsü Şekil 3'te verilmektedir.

Kaplanmış numuneler, çalışma elektrotudur. Karşı elektrot olarak grafit elektrot ve referans elektrot Ag/AgCl elektrot kullanılmıştır. Kompozit kaplamanın korozyon direncini karşılaştırmak için temel malzeme olarak ferritik paslanmaz çelik kullanılmıştır. Tüm polarizasyon ölçümleri GAMRY 600 potansiyostat ile gerçekleştirilmiştir. 0.1 mV/s'lik bir tarama ölçeği ile -1 V ila +1 V arasında potansiyodinamik polarizasyon değerleri elde edilmiştir. Korozyon hızları Tafel eğrilerinden ( $E/\log i$ ) hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda Stean-Geary denklemleri kullanılmıştır (Denklem 3).

$$i_{corr} = B \frac{\Delta i}{\Delta E} \quad (3)$$

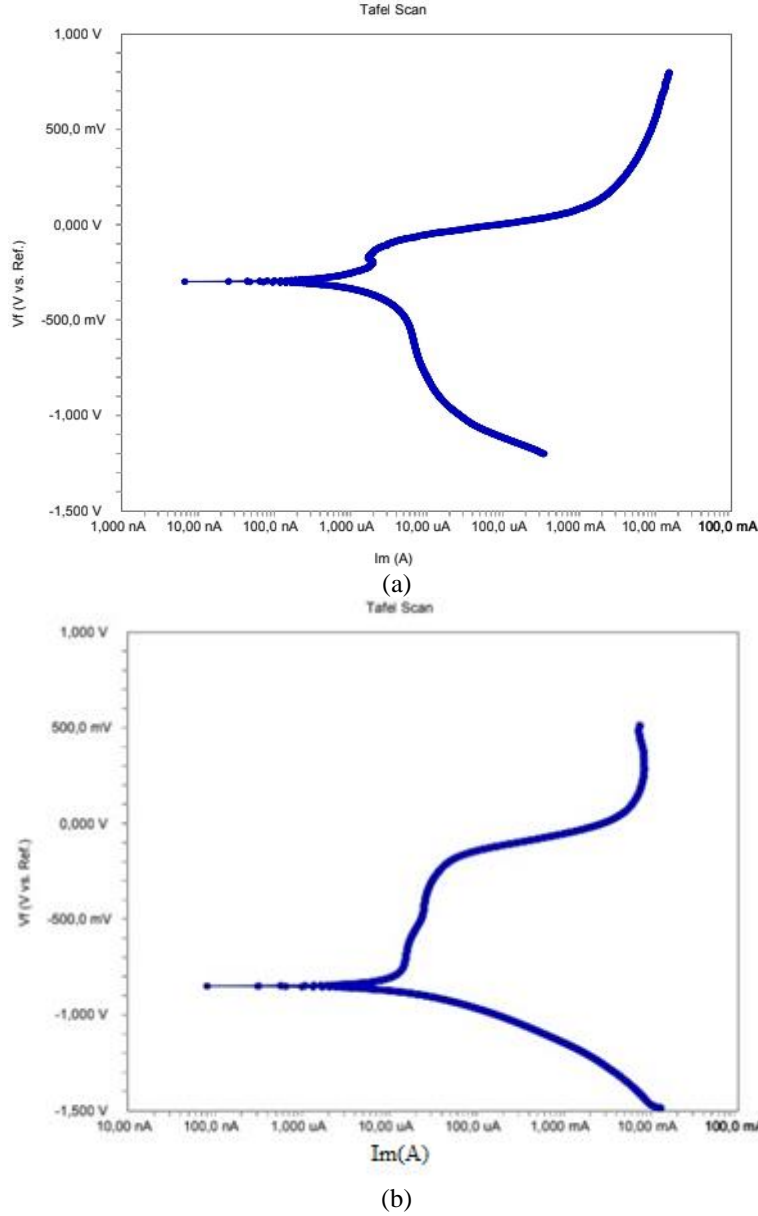
Burada B Tafel sabitlerinden hesaplanan ve bazı sistemler için her malzemeye özgü bir sabittir.



Şekil 3. Korozyon deneyinin prensip şeması

### 3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 4'te elde edilen Tafel grafikleri görülmektedir. S1 numunesinin açık devre potansiyeli (OCP) -0.202 V iken S2 numunesinin açık devre potansiyeli -0.488 V tur. Yani polarize olması için daha büyük potansiyellere maruz kalması gerekir. Bu da daha iyi korozyon direnci anlamına gelir. Her iki numune de tipik bir anot pasifleştirme karakterizasyonu sergileyen benzer polarizasyon davranışına sahiptir. Ancak Tafel eğrilerinden de görüleceği gibi kaplanmış malzemenin pasifleşme bölgesi daha geniştir. Pasifleşme bölgesinin geniş olması malzemenin korozyona karşı daha dirençli olduğunu gösterir. Korozyon akım ve korozyon potansiyelleri Tablo 2' de verilmiştir. S1 numunesine ait malzemenin korozyon hızı  $1,96 \times 10^{-2}$  iken kaplama yapılmış malzemeye ait korozyon hızı  $6,04 \times 10^{-5}$  mA dir. Bu da kaplamanın daha iyi korozyon direncine sahip olduğu anlamına gelir. Daha önce Kumar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [10] elde edilen korozyon hızlarının  $10^{-3}$  mA mertebesinde olduğu görülmüştür.  $10^2$  mA mertebesinde daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.

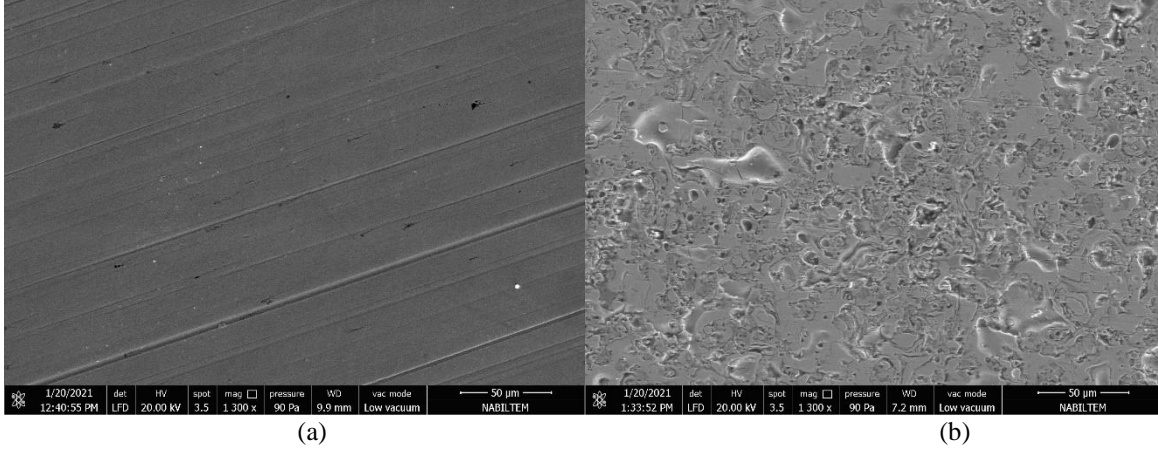


Şekil 4. Tafel (E-logi) eğrileri (a) S1, (b) S2

Tablo 2. Numunelerin polarizasyon parametreleri

Numune no	$E_{corr}$ (mV)	$I_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )
S1	-850.2	$1,96 \times 10^{-2}$
S2	-299.0	$6,04 \times 10^{-5}$

CoMoCrSi alaşımly Laves fazlarının oluştuğu yüzey işlemleri ile korozyona karşı dirençli kaplama tabakaları meydana gelmektedir [16]. Bu tabakaların, altlık malzeme ile kaplama arasında boşluk olmamasını sağlayabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca CoMoCrSi ile kaplanmış ferritik paslanmaz çelik üzerinde oluşan oksit tabakanın, kaplanmamış çelik malzeme üzerindeki oksit tabakadan daha koruyucu olduğu söylenebilir. Bunun nedeni adezyon kuvveti daha iyi Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmin, korozyona karşı dayanıklı CoMoCrSi kaplamaların korozif ortam ile arasındaki doğrudan teması geciktirerek ve bozunma mekanizmalarının başlamasını erteleyerek aşınma performansını iyileştirmesidir [17]. Fe-Cr oksit tabakaların Fe oksit tabakalardan daha yüksek adezyon enerjisine sahip olduğu bilinmektedir [18]. Bu enerji sayesinde tabakanın yüzeydeki varlığı süreklidir.



Şekil 5. Korozyon deneyleri sonrası a) S1 ve b) S2 numunelerinin SEM görüntüleri

Şekil 5’te numunelerin korozyon sonrası yüzey görüntüleri yer almaktadır. Üretim yönteminden dolayı meydana gelen pürüzlü görünümü korozyon sonucu oluşan görünümünden ayırmak önemlidir. Bu konuda polarizasyon deneylerinden elde edilen veriler yol göstericidir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Ferritik paslanmaz çelik yüzeyine plazma püskürtme yöntemi kullanılarak CoMoCrSi tozu kaplanabilmektedir. Kaplama sonrasında aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

1. Kaplama tabakasının mikroyapısında lamelli bir yapının oluştuğu ve altlık malzeme ile kaplama tabakası arasında herhangi bir boşluğun oluşmadığı tespit edilmiştir.

AC impedans tekniği ile elde edilen E-log i eğrilerinden Ferritik paslanmaz çelik üzerine yapılan CoMoCrSi kaplamaların korozif açıdan faydalı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Çalışmanın aşınma parametreleri elde edilerek geliştirilmesi mümkündür. Ayrıca endüstriyel hayatta kullanımının getireceği ekonomik katkılar da belirlenerek tavsiye edilen bir malzeme olduğu fikri sağlanabilir.

#### Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye olan katkıları belirtilmelidir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### Kaynaklar

- [1] Demiroren H. 2009. Corrosion behavior of ferritic stainless steel alloyed with different amounts of niobium in hydrochloric acid solution. *Journal of Applied Electrochemistry*, 39: 761-767.
- [2] Wang Y., Liu J., Kang N., Darut G., Poirier T., Stella J., Liao H., Planche M-P. 2016. Cavitation erosion of plasma-sprayed CoMoCrSi coatings. *Tribology International*, 102: 429-435
- [3] Wang Z., Li C., Si X., Liu Y., Qi J., Huang Y., Feng J., Cao J. 2020. Oxidation behavior of ferritic stainless steel inter connect coated by a simple diffusion bonded cobalt protective layer for solid oxide fuel cells. *Corrosion Science*, 172: 108739.

- [4] Kim C., Cha J-H., KimS. H., Jang C., Kim T.K. 2020. Development of aluminide diffusion coatings on ODS ferritic-martensitic steel for corrosion resistance in high temperature supercritical-carbon dioxide environment. *Applied Surface Science*, 509: 145387.
- [5] Hsu C.H., Lin C.K., Huang K.H., Ou K.L. 2013.Improvement on hardness and corrosion resistance of ferritic stainless steel via PVD-(Ti,Cr)N coatings. *Surface&Coatings Technology*, 231: 380–384.
- [6] You P.F., ZhangX., Yang X.G., Zhang H.L., Yang L.X., Zeng C.L. 2019. Preparation and performances of Ni-Fe/CrNx dual layer coatings for ferritic stainless steel inter connects. *Results in Physics*, 12: 1598–1605.
- [7] Bijalwan P., Singh C., Kumar A., Sarkar K., Rani N., Laha T., Banerjee A., Mondal K. 2021. Corrosion behaviour of plasma sprayed Fe based metallic glass Fe73Cr2Si11B11C3 (at%) coatings in 3.5% NaCl solution. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 567: 120913.
- [8] Qina Y., Zhaob H., Lib C., Lua J., He J. 2020. Effect of heat treatment on the microstructure and corrosion behaviors of reactive plasma sprayed TiCN coatings. *Surface & Coatings Technology*, 398: 126086.
- [9] Singha A. A. M. M., Franco P. A., Binoj J. S. 2019. Enhancement of corrosion resistance on plasma spray coated mild steel substrate exposed to marine environment. *Materials Today: Proceedings*, 15: 84–89.
- [10] Kumar A., Kumar Nayak S., Sarkar K., Banerjee A., Mondal K., Lah T. 2020. Investigation of nano- and micro-scale structural evolution and resulting corrosion resistance in plasma sprayed Fe-based (Fe-Cr-B-C-P) amorphous coatings. *Surface & Coatings Technology*, 397: 126058.
- [11] Özel S. 2019. The effect of coating parameter on properties of plasma sprayed Co based coatings. *Tehnicki Vjesnik*, 26 (2): 318-322.
- [12] Demirören H., Aksoy M., Erbil M. 2008. The effect of Nb and heat treatment on the corrosion behavior of ferritic stainless steel in acid environments. *Materials Science*, 44: 566–572.
- [13] Gupta M., Musalek R., Tesar T. 2020. Microstructure and failure analysis of suspension plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 382: 125218.
- [14] Wei Z.Y., Cai H.N. 2020. Comprehensive effects of TGO growth on the stress characteristic and delamination mechanism in lamellar structured thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 46 (2): 2220-2237.
- [15] Erbil M., 1987. Alternatif akım (A.C.) impedans yöntemi ile korozyon hızı belirlenmesi, *Doğa*, 3: 100-111.
- [16] Yao M.X., Wu J.B.C., Yick S., Xie Y., Liu R. 2006. High temperature wear and corrosion resistance of a Laves phase strengthened Co–Mo–Cr–Si alloy. *Materials Science and Engineering, A* 435–436: 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.07.054>
- [17] Nascimentoa E.M., Amaral L.M., Sofia A., D'Oliveira C.M. 2017. Characterization and wear of oxides formed on CoMoCrSi alloy coatings. *Surface & Coatings Technology*, 332: 408–413.
- [18] Sun L. 2021. Adhesion and electric structure at Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> interface: A first principles study. *Journal of Alloys and Compounds*, 875: 160065.