



FINDIK YAPRAĞI VE ZURUFU ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN EKSTRAKT VE DİYET LİFLERİN 1 M HCl İÇİNDE YUMUŞAK ÇELİK KOROZYONUNA KARŞI İNHİBİTÖR ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Bahar TAN ÖZAY^{1,2*}, Nurdane YILMAZ³

¹Kastamonu University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Materials Science and Engineering, 37150, Kastamonu, Türkiye

²Sinop University, Durağan Vocational School, Department of Pharmacy Services, Sinop, 57700, Sinop, Türkiye

³Kastamonu University, Faculty of Education, Department of Mathematics and Science Education, 37150, Kastamonu, Türkiye

Özet: Bu çalışmada, Türkiye’de önemli bir tarımsal atık potansiyeline sahip olan fındık yaprağı ve zurufunun katma değeri yüksek korozyon inhibitörlerine dönüştürülmesi hedeflenmiştir. Fındık yaprağı ve zurufundan elde edilen ekstraktlar ile bu atıklardan izole edilen diyet liflerinin, 1 M HCl çözeltisi içerisinde yumuşak çeliğin korozyonunu önleme etkisi; elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS), potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) ve adsorpsiyon izotermi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, tüm inhibitör türlerinin asidik ortamda korozyon hızını azalttığını ve derişim artışıyla birlikte inhibisyon verimliliğini artırdığını göstermiştir. Çalışılan konsantrasyon aralığında en yüksek koruma verimliliği (%81,0) fındık yaprağı lifi (200 mg/L) ile elde edilmiştir. Tafel polarizasyon sonuçları, inhibitörlerin hem anodik hem de katodik reaksiyonları kontrol eden karma tip bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Adsorpsiyon çalışmaları, inhibitör moleküllerinin metal yüzeyine Langmuir adsorpsiyon izotermine uygun olarak tutunduğunu ve adsorpsiyon mekanizmasının fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin bir arada olduğu karışık tip mekanizma olduğunu kanıtlamıştır. Bu çalışma, fındık tarımsal atıklarının çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir bir korozyon inhibitör kaynağı olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Korozyon, Fındık, Yeşil inhibitör, Yumuşak çelik, Diyet lifi, Asidik ortam

Investigation of the Inhibitory Effect of Extracts and Dietary Fibers Obtained from Hazelnut Leaf and Husk Waste on Mild Steel Corrosion in 1 M HCl

Abstract: This study aimed to transform hazelnut leaves and husks, which have significant agricultural waste potential in Turkey, into high value-added corrosion inhibitors. The effects of extracts obtained from hazelnut leaves and husks, and dietary fibers isolated from these wastes, on the corrosion behavior of mild steel in 1 M HCl solution were investigated using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), potentiodynamic polarization (Tafel), and adsorption isotherms. The findings showed that all inhibitor types reduced the corrosion rate in the acidic medium and the inhibition efficiency increased with increasing concentration. The highest protection efficiency (81.0%) was obtained with hazelnut leaf fiber (200 mg/L) in the studied concentration range. Tafel polarization results revealed that the inhibitors exhibited a mixed-type behavior, controlling both anodic and cathodic reactions. Adsorption studies proved that the inhibitor molecules adhered to the metal surface in accordance with the Langmuir adsorption isotherm, and the adsorption mechanism was a mixed-type process involving both physical and chemical interactions. This study demonstrates that hazelnut agricultural wastes can be evaluated as an eco-friendly, economical, and sustainable source of corrosion inhibitors.

Keywords: Corrosion, Hazelnut, Green inhibitor, Mild steel, Dietary fiber, Acidic media

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Kastamonu University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Materials Science and Engineering, 37150, Kastamonu, Türkiye

E mail: btan@sinop.edu.tr (B. TAN ÖZAY)

Bahar TAN ÖZAY  <https://orcid.org/0009-0001-8968-2882>

Nurdane YILMAZ  <https://orcid.org/0000-0003-1760-8066>

Gönderi: 23 Ocak 2026

Kabul: 25 Şubat 2026

Yayınlanma: 15 Mart 2026

Received: January 23, 2026

Accepted: February 25, 2026

Published: March 15, 2026

Cite as: Tan ÖZAY, B. & Yılmaz, N. (2026). Investigation of the inhibitory effect of extracts and dietary fibers obtained from hazelnut leaf and husk waste on mild steel corrosion in 1 M HCl. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 9(2), 894-903.

1. Giriş

Korozyon; endüstriyel açıdan kritik öneme sahip metal ve alaşımların, çevresel bileşenlerle girdiği doğrudan reaksiyonlar sonucunda oksit, hidroksit ve sülfür gibi termodinamik olarak daha kararlı formlara dönüşerek bozunmasına yol açan elektrokimyasal bir süreçtir (Verma vd., 2018). Günümüzde yumuşak çelik; metal

işleme, ekipman üretimi ve inşaat gibi geniş bir endüstriyel yelpazede en çok tercih edilen alaşımlardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu endüstriyel uygulamalar sırasında metal yüzeyinde oluşan kireç, oksit tabakaları ve diğer safsızlıkların giderilmesi amacıyla genellikle hidroklorik asit çözeltileri ile asitle temizleme işlemi uygulanmaktadır (Sanaei vd., 2019). Korozyon hızının



düşürülmesine yönelik metot arayışları bilimsel çalışmaların merkezinde yer almaktadır. Mevcut uygulamalar içinde organik inhibitörler, metal yüzeylerinin korunmasında oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak sentetik kökenli inhibitörlerin çoğu, asidik ortamlarda etkili olmalarına rağmen pahalı olmaları ve çevresel risk taşımaları nedeniyle dezavantajlıdır. Bu durum, bilim dünyasını daha ucuz ve zehirli olmayan yeni arayışlara itmektedir. Sonuç olarak, bitki kökleri, tohumları, yaprakları ve meyveleri gibi doğal kaynaklardan elde edilen çevre dostu inhibitörlerin kullanımı, sentetiklere kıyasla cazip bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Alibakhshi vd., 2018). Korozyon önleme stratejileri arasında, bitki esaslı malzemelerin kullanımı giderek artan bir önem kazanmaktadır. Biyobozunur nitelikte olmaları, toksik bileşenler ve ağır metaller içermemeleri, ayrıca hammaddeye erişim ve işleme kolaylığı sağlamaları, bu tür inhibitörleri diğer alternatiflere kıyasla daha avantajlı hale getirmektedir (Alaneme vd., 2015).

Bugüne kadar, asidik çözeltilerde çelik korozyonunu önlemek amacıyla çok sayıda bitki ekstraktı inhibitör olarak kullanılmıştır. Bu çalışmalarda; *Holoptelea integrifolia* yaprağı ekstraktı (Verma vd., 2018), badem ekstraktı (Iroha vd., 2019), kahve kabuğu ekstraktı (Cordeiro vd., 2018), tatlı kavun kabuğu ekstraktı (Saeed vd., 2019), *Acalypha chamaedrifolia* yaprağı ekstraktı (Arthur ve Abechi, 2019), *Ginkgo* yaprağı ekstraktı (Qiang vd., 2018), ve *Glycyrrhiza glabra* ekstraktı (Alibakhshi vd., 2018) gibi doğal kaynaklardan elde edilen ekstraktlar başarıyla kullanılmıştır.

Türkiye için stratejik bir öneme sahip olan fındık (*Corylus spp.*), potansiyel bir yeşil inhibitör kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Fagales takımı ve Betulaceae familyasında yer alan fındık, Türkiye'nin dünya genelinde %66'lık pazar payı ile lider konumda olduğu önemli bir tarım ürünüdür. Ülkemizde özellikle Ordu, Giresun ve Samsun illerinde yoğunlaşan üretim faaliyetleri, ülke ekonomisine milyar dolarlık ihracat geliri sağlamaktadır (Karaca, 2016). Ancak bu büyük üretim hacmi, yönetilmesi gereken devasa bir atık potansiyelini de beraberinde getirmektedir. Hasat edilen 1 kg yaş fındıktan yaklaşık 1/5 oranında kuru zuruf açığa çıktığı dikkate alındığında, Türkiye'de yıllık 300,000 tonun üzerinde fındık zurufu ve 10,000 tonu aşkın fındık yaprağı atığı olduğu tahmin edilmektedir (Bayıl vd., 2016). Genellikle yakılarak bertaraf edilen bu biyokütle kaynakları hem ekonomik bir kayıp yaratmakta hem de çevre kirliliğine neden olmaktadır.

Literatürdeki fitokimyasal çalışmalar, fındık atıklarının korozyon inhibisyonunda kilit rol oynayan biyoaktif bileşenler açısından oldukça zengin olduğunu göstermektedir. Alasalvar vd., (2006) ile Shahidi vd., (2007), fındık zurufunun yüksek oranda fenolik madde içerdiğini; yapısında gallik asit, kafeik asit ve p-kumarik asit gibi organik asitlerin bulunduğunu rapor etmiştir. Benzer şekilde fındık yapraklarının da mirisetin ve kaemferol türevleri gibi flavonoidleri içerdiği ve güçlü bir

radikal süpürme kapasitesine sahip olduğu bilinmektedir. Bitki bünyesindeki bu elektronca zengin biyoaktif bileşenlerin (heteroatom içeren polifenoller), metal yüzeyine adsorbe olarak asidik ortamda korozyon direncini artırma potansiyeli oldukça yüksektir.

Bu atıkların katma değeri yüksek korozyon inhibitörlerine dönüştürülmesi hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Literatürde çeşitli bitki ekstraktları çalışılmış olsa da fındık atıklarından elde edilen hem ekstraktların hem de diyet liflerinin korozyon performanslarının karşılaştırmalı olarak incelendiği kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı; fındık tarımsal atıklarından elde edilen dört farklı doğal inhibitör kaynağının (fındık yaprağı ekstraktı, fındık zurufu ekstraktı ve bu atıklardan izole edilen diyet lifleri) 1 M HCl çözeltisi içerisinde yumuşak çeliğin korozyon davranışı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemektir. Hazırlanan çevre dostu inhibitörlerin koruma verimlilikleri; elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) teknikleri ile belirlenmiş, ayrıca adsorpsiyon izotermeleri incelenerek inhibisyon mekanizması aydınlatılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Elektrodunun Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan yumuşak çeliğin kimyasal bileşimi (ağırlıkça) %0,20 C, %0,45 Mn, %0,25 Si, %0,04 P, %0,05 S ve %99,01 Fe şeklindedir. Elektrokimyasal çalışmalar için 0,7 cm çapındaki çelik numuneler, 0.385 cm² yüzey alanı açıkta kalacak şekilde epoksi reçine içerisine gömülmüştür. Her ölçüm öncesinde, çalışma elektrodunun yüzeyi sırasıyla 600, 800 ve 1200 grit zımpara kağıtları kullanılarak mekanik olarak parlatılmıştır. Ardından yumuşak çelik numuneler saf su ile durulanmış ve ardından kurutulmuştur.

2.2. Ekstraktların ve Elektrolitlerin Hazırlanması

Deneyisel çalışmalarda kullanılan fındık yaprakları ve zuruf numuneleri Sinop ili Türkeli ilçesinden temin edilmiştir. Laboratuvara getirilen bitki kısımları, üzerindeki fiziksel safsızlıkların giderilmesi amacıyla önce musluk suyu, ardından saf su ile yıkanmıştır. Temizlenen numuneler, gölge bir ortamda oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve ardından mekanik öğütücü ile toz haline getirilmiştir.

Ekstraksiyon işlemi için; hazırlanan toz numunelerden 50 g tartılarak 1 L etanol-su karışımı (1:4) içerisine ilave edilmiştir. Karışım, 4 saat boyunca 45°C'de karıştırılarak ekstraksiyon işlemine tabi tutulmuştur. İşlem sonunda elde edilen karışım süzgeç kağıdından süzülmuş ve çözücü, düşük basınç altında uzaklaştırılmıştır. Elde edilen ekstraktlar, deneylerde kullanılmak üzere +4°C'de saklanmıştır.

Korozyon testlerinde aşındırıcı ortam (elektrolit) olarak 1 M HCl çözeltisi kullanılmıştır. Bu çözelti, analitik saflıktaki %37'lik derişik hidroklorik asidin saf su ile seyreltilmesi suretiyle hazırlanmış ve inhibitörsüz

kontrol grubu olarak kullanılmıştır.

İnhibitörlü çözeltiler, stok ekstraktların asidik ortamda çözülmesiyle farklı konsantrasyonlarda hazırlanmıştır. Buna göre çalışma konsantrasyonları; fındık yaprağı ekstraktı için 100, 150, 200, 250 ve 300 mg/L; fındık zurufu ekstraktı için 20, 40, 60, 80 ve 100 mg/L olarak belirlenmiştir.

2.3. Diyet Liflerinin Hazırlanması

Fındık yaprağı ve zurufundan diyet lifi izolasyonu için, AOAC 993.21 toplam diyet lifi tayin yönteminin modifiye edilmiş bir versiyonu kullanılmıştır (Huang vd., 2021). 50 g fındık yaprağı ve zurufu atığı 250 mL ultra saf suda karıştırılmıştır. Elde edilen karışım, nişasta ve suda çözünen diğer bileşenlerin uzaklaştırılması amacıyla manyetik karıştırıcıda 300–350 rpm hızında karıştırılmıştır. Daha sonra atık numuneleri, 85–90°C sıcaklıktaki su banyosunda 30 dakika boyunca ısıtma tabi tutulmuştur. Karışım 60°C'ye soğutulduktan sonra pH değeri 1 M NaOH ilavesiyle 12'ye ayarlanmıştır. Lignoselülozik safsızlıkların giderilmesi ve ağartma işlemi için %2'lik hidrojen peroksit (H₂O₂) çözeltisi eklenmiş olup; reaksiyon 60–70°C sıcaklıkta ve 300–350 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. İşlemin son aşamasında, ortamdaki kalıntı H₂O₂'in uzaklaştırılması amacıyla sıcaklık 80°C'ye yükseltilmiştir. Elde edilen lifler süzülerek ayrılmış, 55°C'de kurutulmuş ve bilyalı değirmen kullanılarak öğütülmüştür.

İnhibitörlü çözeltiler, stok diyet liflerinin asidik ortamda çözülmesiyle farklı konsantrasyonlarda hazırlanmıştır. Buna göre çalışma konsantrasyonları; fındık yaprağı ve fındık zurufu diyet lifleri için 25, 50, 100, 150 ve 200 mg/L olarak belirlenmiştir.

2.4. İnhibitörlerin Karakterizasyonu

2.4.1. Fizikokimyasal analizler

Fındık yaprağı ve zurufundan elde edilen diyet liflerinin yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla fiziksel analiz gerçekleştirilmiştir. Toplam diyet lifi içeriği, AOAC 991,43 standardına uygun olarak enzimatik-gravimetrik yöntemle (sırasıyla α -amilaz, proteaz ve amiloglukosidaz enzimleri kullanılarak) analiz edilmiştir. Numunelerin inorganik madde içeriği (kül), 550°C'de yakma işlemi sonucunda gravimetrik olarak tayin edilmiştir. Ayrıca, liflerin yüzey etkileşim kapasitelerini belirlemek amacıyla su tutma kapasitesi, şişme kapasitesi ve yağ tutma kapasitesi ölçümleri standart yöntemlere göre yapılmıştır (Yang vd., 2021).

2.4.2. Fitokimyasal içerik ve antioksidan aktivite

İnhibitörlerin korozyon direncine katkı sağlayabilecek biyoaktif bileşenler spektrofotometrik yöntemlerle incelenmiştir:

- Protein Tayini: Liflerin protein içeriği, Bradford metodu kullanılarak belirlenmiştir. Coomassie Brilliant Blue G-250 boyası ile reaksiyona giren proteinlerin 595 nm'deki absorbansı ölçülmüş ve sonuçlar BSA standart eğrisi üzerinden hesaplanmıştır.
- Antioksidan Kapasite (FRAP ve DPPH): Numunelerin antioksidan potansiyeli iki farklı

mekanizma ile test edilmiştir. FRAP (Demir İndirgeme Gücü) analizinde, Fe (III)-TPTZ kompleksinin indirgenmesi 593 nm'de okunmuş ve sonuçlar FeSO₄ eşdeğeri olarak verilmiştir (Benzie ve Strain, 1996). DPPH (Radikal Süpürme Aktivitesi) ise, 517 nm'de absorbans düşüşünün takibi ile belirlenmiş ve radikallerin %50'sini süpüren konsantrasyon (SC₅₀) hesaplanmıştır (Gülçin ve Alwasel, 2023).

2.5. Elektrokimyasal Analizler

Elektrokimyasal analizlerin tamamı, Gamry Reference 3000 model potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde standart üç elektrotlu hücre düzeneği tercih edilmiştir. Bu düzenekte; çalışma elektrodu olarak C20 çelik numunesi, karşıt elektrot olarak grafit çubuk ve referans elektrot olarak ise gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) elektrodu yer almaktadır. Deneyler, sıcaklık kontrollü bir ortamda 25 ± 1 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir (Murmu vd., 2019).

Analiz öncesinde, çalışma elektrodunun yüzeyinde kararlı bir açık devre potansiyeli (E_{ocp}) elde etmek amacıyla, numune test çözeltisi içerisinde yaklaşık 900 saniye bekletilerek sistemin dengeye gelmesi sağlanmıştır. Stabilizasyonun ardından, aynı E_{ocp} değerinde Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) ölçümleri alınmıştır. Empedans analizleri, 100 kHz ile 0,2 Hz frekans aralığında 10 mV genlikli sinüzoidal dalga uygulanarak yapılmıştır. Elde edilen veriler Gamry Echem Analyst yazılımı ile analiz edilerek uygun eşdeğer devre modellerine oturtulmuştur.

Potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) eğrileri ise; E_{ocp} potansiyelinin ±250 mV aralığında, 1 mV s⁻¹ tarama hızıyla kaydedilmiştir. Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon akım yoğunlukları esas alınarak inhibisyon verimliliği (η %), eşitlik 1 yardımıyla belirlenmiştir (Saxena vd., 2018):

$$\eta (\%) = \frac{I_{ocorr} - I_{icorr}}{I_{icorr}} \times 100 \quad (1)$$

Eşitlikte yer alan I_{ocorr} ve I_{icorr} sırasıyla inhibitörsüz ve inhibitörlü ortamdaki korozyon akım yoğunluklarını ifade etmektedir. Sonuçların doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacıyla her bir deney seti, aynı koşullar altında en az üç kez tekrarlanmıştır.

3. Bulgular

3.1. Diyet Liflerinin Karakterizasyonu

Korozyon inhibitörü kaynağı olarak kullanılan fındık yaprağı ve fındık zurufu numunelerinden elde edilen diyet liflerinin kimyasal kompozisyonu ve fizikokimyasal özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Analiz sonuçlarına göre; her iki biyokütle kaynağının da kuru madde bazında oldukça yüksek oranda (%92,50-%93,18) toplam diyet lifi içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Lif fraksiyonları detaylandırıldığında; baskın bileşenin selüloz (%46,20-%48,10) olduğu, bunu sırasıyla lignin (%21,47-%27,42) ve pektinin (%10,30-%11,30) takip ettiği görülmektedir. Buna karşılık;

protein, sakkaroz, fruktoz ve glukoz gibi basit organik bileşenlerin numunelerde eser miktarda (t.e.) bulunduğu tespit edilmiştir. İnhibitörlerin biyoaktif özellikleri incelendiğinde; fındık yaprağı liflerinin hem toplam polifenol içeriği (111,78 mg GAE/g) hem de FRAP antioksidan kapasitesi (55,62 mg/g) bakımından, fındık zurufu liflerinden (102,23 mg GAE/g ve 47,65 mg/g) daha yüksek değerlere sahip olduğu kaydedilmiştir.

Fiziksel etkileşim parametreleri açısından değerlendirildiğinde ise; fındık yaprağı liflerinin su tutma (13,50 g/g) ve yağ tutma (7,23 g/g) kapasitelerinin, fındık zurufu liflerine kıyasla (sırasıyla 9,60 g/g ve 3,80 g/g) belirgin şekilde daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Fındık yaprağı ve zuruf liflerinin fizikokimyasal ve biyoaktif özellikleri

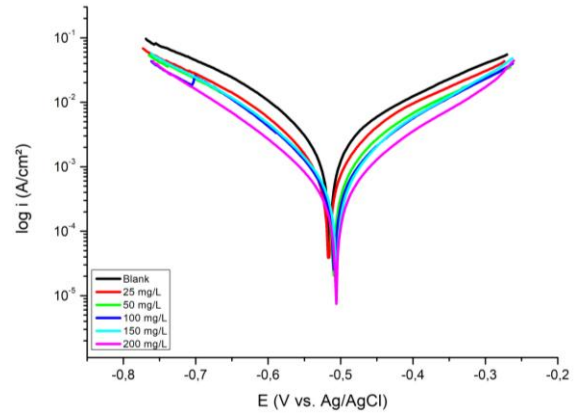
Analiz	Fındık Yapağı Lifi	Fındık Zurufu Lifi
Diyet Lif (%)	93,18±3,15	92,50±3,42
Kuru Madde (%)	96,30±1,30	97,40±1,20
Nem (%)	3,70±0,50	2,60±0,20
Protein (%)	t.e.	t.e.
Kül (%)	2,45±0,60	2,29±0,50
Su aktivitesi	0,13±0,08	0,14±0,07
Renk	-	-
L*	66,17±0,13	46,53±0,03
a*	4,45±0,46	6,67±0,71
b*	28,63±0,61	24,38±0,71
Su Tutma (g/g)	13,50±0,60	9,60±0,50
Yağ Tutma (g/g)	7,23±0,30	3,80±0,50
Sakkaroz (%)	t.e.	t.e.
Fruktoz (%)	t.e.	t.e.
Glukoz (%)	t.e.	t.e.
Maltoz (%)	t.e.	t.e.
Selüloz	48,10±0,40	(%)46,20±0,60
FOS (%)	t.e.	t.e.
Lignin (%)	27,42±4,30	21,47±2,60
Pektin (%)	11,30±1,50	10,30±1,80
Inulin (%)	0,42±0,30	t.e.
FRAP Antioksidan (mg/g)	55,62±6,70	47,65±3,20
DPPH (IC50 mg/mL)	7,78±0,40	6,97±2,80
T. polifenol (mg GAE/g)	111,78±8,90	102,23±5,30

L*= açıkla (L*:100) koyu (L*: 0) arasındaki fark, a*= yeşille (-a*) kırmızı (+a*) arasındaki fark, b*= maviyle (-b*) sarı (+b*) arasındaki fark, t.e. = tespit edilemedi

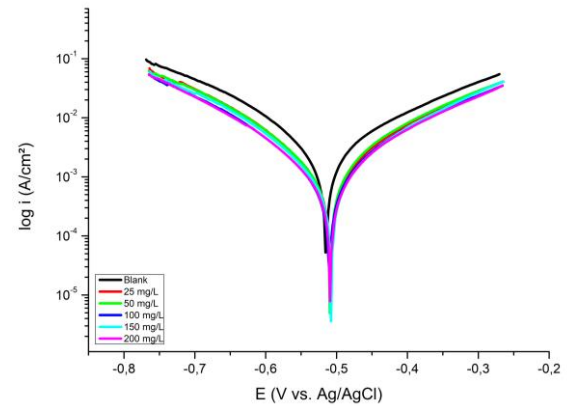
3.2. Elektrokimyasal Ölçümler

3.2.1. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri

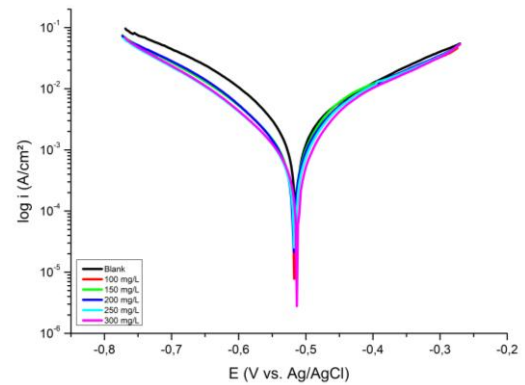
Şekil 1-4'te; 1 M HCl ortamındaki yumuşak çeliğin, inhibitör olarak sırasıyla fındık yaprağı ve zurufu lifi ile fındık yaprağı ve zurufu ekstraktı varlığında elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri sunulmaktadır. Bu eğrilerden elde edilen elektrokimyasal parametreler E_{corr} , i_{corr} , β_a , β_c , C_R ve η (%) Tablo 2'de listelenmiştir.



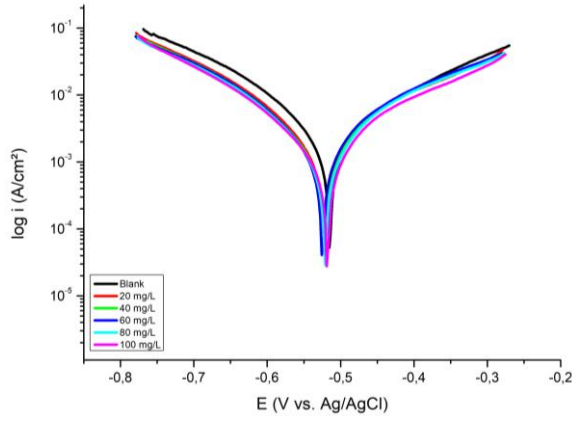
Şekil 1. 1 M HCl içerisindeki yumuşak çelik için, 0-200 mg/L derişim aralığındaki fındık yaprağı lifi varlığında elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.



Şekil 2. 1 M HCl içerisindeki yumuşak çelik için, 0-200 mg/L derişim aralığındaki fındık zurufu lifi varlığında elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.



Şekil 3. 1 M HCl içerisindeki yumuşak çelik için, 0-300 mg/L derişim aralığındaki fındık yaprağı ekstraktı varlığında elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.



Şekil 4. 1 M HCl içerisindeki yumuşak çelik için, 0–100 mg/L derişim aralğındaki fındık zurufu ekstraktı varlığında elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Şekiller incelendiğinde, inhibitör konsantrasyonunun artmasıyla birlikte hem anodik hem de katodik akım yoğunluklarında azalma meydana geldiği görülmektedir. Tablo 2'e göre, şahit numune (blank) 2083,1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

olan korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}), tüm inhibitör türlerinde konsantrasyon artışına bağı olarak düşüş göstermiştir. En düşük i_{corr} değeri, 200 mg/L fındık yaprağı lifi varlığında 394,8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür. Korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerleri incelendiğinde, inhibitör ilavesiyle meydana gelen kaymaların şahit numuneyle kıyasla 85 mV'tan küçük olduğu tespit edilmiştir (Maksimum kayma <15 mV). Literatüre göre, bu küçük potansiyel kayması, çalışılan inhibitörlerin hem anodik hem de katodik reaksiyonları kontrol eden karma tip inhibitörler olarak davrandığını göstermektedir. Ayrıca anodik (β_a) ve katodik (β_c) Tafel eğimlerinde inhibitör ilavesiyle belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. İnhibisyon verimi ($\eta\%$), artan konsantrasyonla doğru orantılı olarak artmıştır. Çalışılan konsantrasyon aralğında (25–300 mg/L) elde edilen maksimum inhibisyon verimleri sırasıyla; fındık yaprağı lifi için %81,0, fındık yaprağı ekstraktı için %71,2, fındık zurufu lifi için %68,8 ve fındık zurufu ekstraktı için %58,0 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2. Fındık yaprağı ve zurufu kaynaklı inhibitörlerin varlığında, yumuşak çeliğin 1 M HCl ortamındaki elektrokimyasal korozyon parametreleri

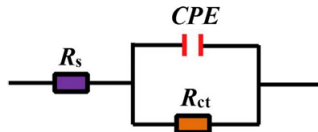
İnhibitör	T (K)	C (mg/L)	$-E_{\text{corr}}$ (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	Corrosion rate (mpy)	$\eta(\%)$
Fındık Yaprağı Ekstraktı	298	Blank	515	2083,1	122,20	118,6	953,0	-
		100	517	971,4	81,3	115,5	443,5	53,4
		150	518	932,4	82,3	108,4	426,6	55,2
		200	518	906,4	74,2	107,7	414,2	56,5
		250	517	732,5	72,0	104,9	334,5	64,8
		300	513	600,0	68,5	97,4	273,8	71,2
Fındık Zurufu Ekstraktı	298	Blank	515	2083,1	122,20	118,6	953,0	-
		20	521	1109,1	87,1	96,7	507,3	46,8
		40	521	1064,9	86,1	102	486,2	48,9
		60	525	1012,9	81,4	92,1	462,9	51,4
		80	521	979,2	84,9	100,4	446,9	53,0
		100	518	875,3	83	101,1	400,4	58,0
Fındık Yaprağı Lifi	298	Blank	515	2083,1	122,2	118,6	953	-
		25	516	870,1	91,4	95,9	397,4	58,2
		50	510	722,1	96,1	114,9	330,1	65,3
		100	509	620,8	102,5	107,2	283,5	70,2
		150	506	581,8	94,1	102,4	265,6	72,1
		200	507	394,8	100,6	112	180,8	81,0
Fındık Zurufu Lifi	298	Blank	515	2083,1	122,20	118,6	953	-
		25	509	890,9	98,9	109,5	407,6	57,2
		50	509	776,6	84,2	95,9	354,6	62,7
		100	510	716,8	95,7	113,9	327,8	65,6
		150	508	670,1	91,0	98,6	306,1	67,8
		200	509	649,4	91,2	107,5	296,4	68,8

3.2.2. Elektrokimyasal empedans spektroskopisi ölçümleri

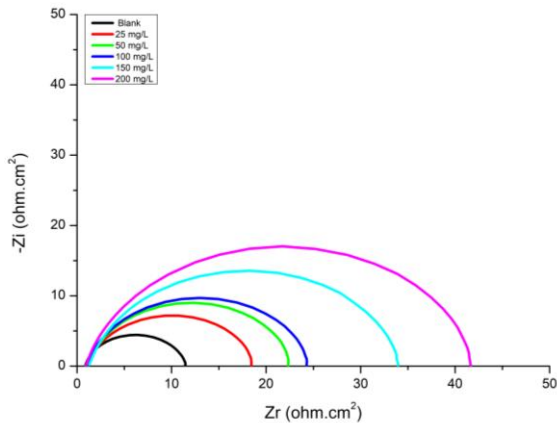
Fındık yaprağı ve zurufundan elde edilen lif ve ekstraktların, 1 M HCl ortamında yumuşak çeliğin korozyon davranışına etkisini belirlemek amacıyla Açık Devre Potansiyeli (OCP) dengeye geldikten sonra EIS ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İnhibitörsüz ve farklı derişimlerde inhibitör içeren çözeltiler için elde edilen Nyquist diyagramları Şekil 6-9'da bu diyagramlardan eşdeğer devre modeli ile hesaplanan elektrokimyasal parametreler ise Tablo 3'te gösterilmiştir.

Nyquist eğrileri Şekil 6-9 incelendiğinde hem inhibitörsüz hem de inhibitörlü ortamlarda tüm eğrilerin tek bir kapasitif döngüden (yarım daire) oluştuğu görülmektedir. İnhibitör derişiminin artmasıyla birlikte bu döngülerin çapının belirgin şekilde büyümesi, metal yüzeyindeki korozyon direncinin arttığını ve inhibitör moleküllerinin yüzeyi başarıyla kapladığını göstermektedir. Ayrıca, inhibitör ilavesiyle Nyquist eğrilerinin karakteristik şeklinin değişmemesi, fındık atıklarından elde edilen inhibitörlerin korozyon mekanizmasını değiştirmediklerini, sürecin yük aktarım kontrollü olarak gerçekleştiğini kanıtlamaktadır.

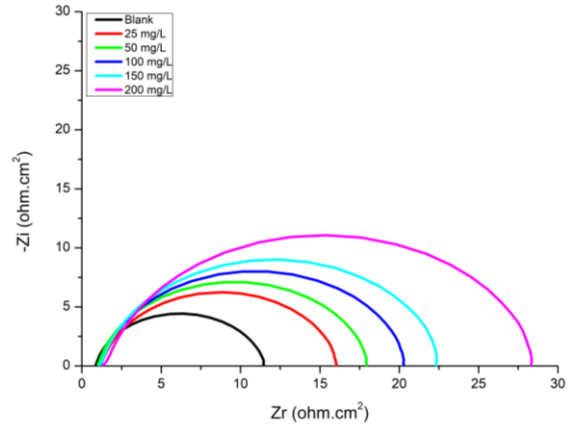
Elde edilen Nyquist eğrilerinin tam bir yarım daire yerine basık bir form sergilediği dikkat çekmektedir. Bu sapma, metal yüzeyinin mikroskobik ölçekteki pürüzlülüğü, heterojenliği ve yüzeydeki aktif merkezlerin dağılımından kaynaklanan frekans dağılımı olgusu ile açıklanmaktadır. Bu nedenle, deneysel verilerin modellenmesinde ideal kapasitör yerine, yüzey homojensizliğini temsil eden Sabit Faz Elemanı (CPE) içeren eşdeğer devre (Randles devresi) kullanılmıştır (Qiang vd., 2018).



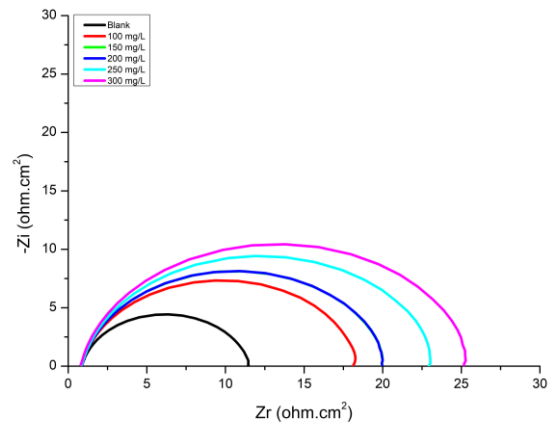
Şekil 5. EIS deneysel verilerine uyum sağlamak için kullanılan eşdeğer devre



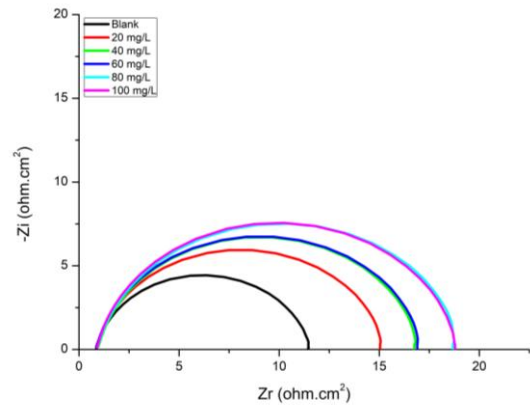
Şekil 6. 1 M HCl içerisindeki yumuşak çelik için, 0-200 mg/L derişim aralığındaki fındık yaprağı lifi varlığında elde edilen Nyquist eğrileri.



Şekil 7. 1 M HCl içerisindeki yumuşak çelik için, 0-200 mg/L derişim aralığındaki fındık zurufu lifi varlığında elde edilen Nyquist eğrileri.



Şekil 8. 1 M HCl içerisindeki yumuşak çelik için, 0-300 mg/L derişim aralığındaki fındık yaprağı ekstraktı varlığında elde edilen Nyquist eğrileri.



Şekil 9. 1 M HCl içerisindeki yumuşak çelik için, 0-100 mg/L derişim aralığındaki fındık zurufu ekstraktı varlığında elde edilen Nyquist eğrileri.

Tablo 3'teki sayısal veriler incelendiğinde; inhibitör derişimi arttıkça yük aktarım direnci (R_{ct}) değerlerinin sürekli bir artış eğiliminde olduğu görülmektedir. İnhibitörsüz çözeltide $9,99 \Omega \cdot \text{cm}^2$ olan R_{ct} değeri, fındık yaprağı lifi (200 mg/L) varlığında $37,68 \Omega \cdot \text{cm}^2$ seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, metal/çözelti arayüzünde oluşan inhibitör filminin yük transferini zorlaştırdığını ve

korozyonu yavaşlattığını doğrulamaktadır. Grafikler kıyaslandığında da en geniş kapasitif döngünün fındık yaprağı lifine ait olduğu (Şekil 6), bunu sırasıyla fındık zurufu lifi ve ekstraktların takip ettiği açıkça görülmektedir.

Tablo 3. Fındık yaprağı ve zurufu kaynaklı inhibitörlerin varlığında, yumuşak çeliğin 1 M HCl ortamındaki elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) parametreleri

Inhibitör	T (K)	C (mg/L)	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	C_{dl} ($\mu\text{F}/\text{cm}^2$)
Fındık Yaprığı Ekstraktı	298	Blank	9,99	0,91	396,10
		100	16,36	0,93	254,23
		150	18,06	0,90	251,45
		200	18,06	0,96	266,23
		250	20,93	0,90	190,13
		300	23,06	0,87	199,35
Fındık Zurufu Ekstraktı	298	Blank	9,99	0,91	396,10
		20	13,34	0,94	331,95
		40	14,94	1,03	304,94
		60	15,11	0,94	293,25
		80	16,77	1,01	285,97
		100	16,86	0,98	272,21
Fındık Yaprığı Lifi	298	Blank	9,99	0,91	396,10
		25	16,19	0,99	320,00
		50	20,04	1,06	234,49
		100	21,76	1,11	214,65
		150	30,32	1,21	188,94
		200	37,68	1,45	149,61
Fındık Zurufu Lifi	298	Blank	9,99	0,91	396,10
		25	14,03	1,10	232,00
		50	15,92	1,21	277,14
		100	18,00	1,30	250,16
		150	20,04	1,30	234,49
		200	25,05	1,52	185,84

Ayrıca, çift tabaka kapasitansı (C_{dl}) değerlerinde inhibitör derişimine bağılı olarak bir azalma tespit edilmiştir (Tablo 3).

Helmholtz modeline (eşitlik 2) göre (Fernandes vd., 2019);

$$C_{dl} = \frac{\epsilon^0 \epsilon}{d} S \quad (2)$$

bu azalma, dielektrik sabiti (ϵ) yüksek olan su moleküllerinin, dielektrik sabiti daha düşük olan organik inhibitör molekülleriyle yer değıştirmesi veya yüzeyde oluşan koruyucu filmin kalınlığının (d) artması ile ilişkilidir. C_{dl} değerlerindeki bu düşüş, fındık yaprağı ve zurufu bileşenlerinin metal yüzeyine fiziksel veya kimyasal olarak güçlü bir şekilde adsorbe olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, EIS ölçümleri ile elde edilen bulgular, potansiyodinamik polarizasyon (Tafel) sonuçlarını desteklemekte, özellikle fındık yaprağı lifinin asidik ortamda yumuşak çelik için yüksek performanslı bir inhibitör olduğunu ortaya koymaktadır.

3.3. Adsorpsiyon İzotermi Bulguları

Fındık yaprağı ve zurufu atıklarından elde edilen inhibitörlerin metal yüzeyi ile etkileşim mekanizmasını aydınlatmak amacıyla, farklı derişimlerdeki yüzey kaplanma oranları (θ) kullanılarak adsorpsiyon izotermi incelenmiştir. Deneysel verilere en uygun modelin, korelasyon katsayısının (R^2) 1'e yakın olması ve doğrusal bir grafik vermesi nedeniyle Langmuir adsorpsiyon izotermi olduğu belirlenmiştir.

Şekil 10-13'te görüldüğü üzere, inhibitör derişimine (C) karşı çizilen C/θ grafikleri tüm inhibitör türleri için doğrusal bir değışim sergilemektedir. Bu durum, adsorpsiyonun Langmuir izoterm modeline (eşitlik 3) uyduğunu ve metal yüzeyinde tek tabakalı bir film oluştuğunu göstermektedir (Vengatesh ve Sundaravadivelu, 2019):

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (3)$$

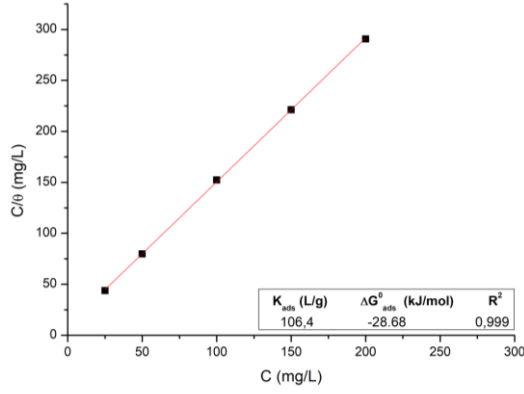
Grafiklerden elde edilen adsorpsiyon denge sabiti (K_{ads}) değerleri kullanılarak, standart adsorpsiyon serbest enerjisi (ΔG_{ads}^0) aşağıdaki eşitlik 4 yardımıyla hesaplanmıştır (Li vd., 2012):

$$\Delta G_{ads}^0 = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (4)$$

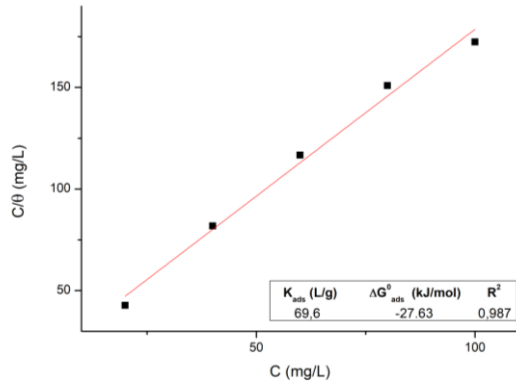
Burada R gaz sabiti (8.314 J/mol.K), T mutlak sıcaklık (298 K) ve 55.5 değeri suyun molar derişimidir (mol/L). Hesaplanan termodinamik parametreler Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. 1 M HCl çözeltisi içinde yumuşak çelik yüzeyinde fındık atığı inhibitörlerinin adsorpsiyonuna ait termodinamik parametreler

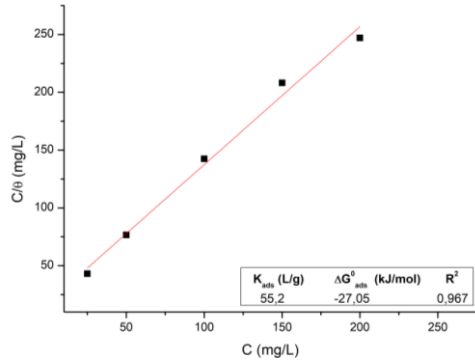
Inhibitör	K_{ads} (L/g)	ΔG_{ads}^0 (kJ/mol)
Fındık Zurufu Lifi	106,4	-28,68
Fındık Zurufu Ekstraktı	69,6	-27,63
Fındık Yaprığı Lifi	55,2	-27,05
Fındık Yaprığı Ekstraktı	10,9	-23,05



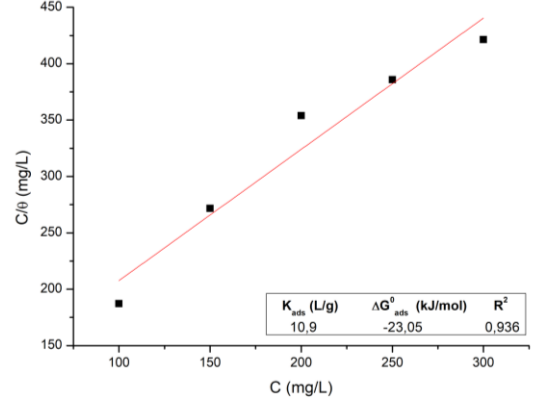
Şekil 10. 1M HCl çözeltisinde yumuşak çelik yüzeyinde incelenen fındık zurufu lifinin Langmuir adsorpsiyon izotermi ve ilgili parametreleri.



Şekil 11. 1M HCl çözeltisinde yumuşak çelik yüzeyinde incelenen fındık zurufu ekstraktının Langmuir adsorpsiyon izotermi ve ilgili parametreleri.



Şekil 12. 1M HCl çözeltisinde yumuşak çelik yüzeyinde incelenen fındık yaprağı lifinin Langmuir adsorpsiyon izotermi ve ilgili parametreleri.



Şekil 13. 1M HCl çözeltisinde yumuşak çelik yüzeyinde incelenen fındık yaprağı ekstraktının Langmuir adsorpsiyon izotermi ve ilgili parametreleri

Tablo 4'teki veriler incelendiğinde, hesaplanan adsorpsiyon denge sabiti (K_{ads}) değerlerinin Fındık Zurufu Lifi > Fındık Zurufu Ekstraktı > Fındık Yaprığı Lifi > Fındık Yaprığı Ekstraktı sıralamasını izlediği görülmektedir. En yüksek K_{ads} değerinin 106,4 L/g ile Fındık Zurufu Lifi'ne ait olması, termodinamik açıdan bu inhibitör moleküllerinin metal yüzeyine diğerlerine kıyasla çok daha güçlü tutunduğunu göstermektedir. Ancak, en yüksek adsorpsiyon sabitine sahip olan Fındık Zurufu Lifi (%68,8 verim), daha düşük adsorpsiyon sabitine sahip olan Fındık Yaprığı Lifi'ne (%81,0 verim) göre daha düşük bir korozyon inhibisyon performansı sergilemiştir. Bu durum, K_{ads} değerleri ile inhibisyon verimliliği arasında doğrusal bir ilişki olmadığını ortaya koymaktadır (Shehata vd., 2018).

Langmuir adsorpsiyon izotermi kullanılarak hesaplanan standart adsorpsiyon serbest enerjisi (ΔG°_{ads}) değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Tüm inhibitör türleri için hesaplanan ΔG°_{ads} değerlerinin negatif olduğu ve -23,05 kJ/mol ile -28,68 kJ/mol aralığında değiştiği belirlenmiştir. Bu negatif değerler, fındık yaprağı ve zurufu bileşenlerinin metal yüzeyindeki adsorpsiyon sürecinin kendiliğinden gerçekleştiğini göstermektedir.

4. Tartışma

Bu çalışmada, fındık tarımsal atıklarından elde edilen ekstrakt ve liflerin asidik ortamda yumuşak çelik üzerindeki korozyon önleyici performansı detaylı olarak incelenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri sonucunda, inhibitör ilavesiyle korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerlerinde gözlenen belirgin düşüş, fındık atığı bileşenlerinin metal yüzeyindeki aktif bölgeleri bloke ederek çözünmeyi engellediğini göstermektedir. Korozyon potansiyelindeki (E_{corr}) maksimum kaymanın 85 mV'tan küçük olması, literatürdeki benzer bitki ekstraktı çalışmalarıyla (Verma vd., 2018; Qiang vd., 2018) uyumlu olarak, fındık kaynaklı inhibitörlerin hem metal çözünmesini (anodik) hem de hidrojen çıkışını (katodik) yavaşlatan karma tip (mixed-type) inhibitörler olduğunu doğrulamaktadır. EIS ölçümleri, inhibitör

varlığında yük aktarım direncinin (R_{ct}) arttığını ve çift tabaka kapasitesinin (C_{dl}) azaldığını göstermiştir. C_{dl} değerindeki bu azalma, Helmholtz modeline göre, metal-çözültü arayüzündeki su moleküllerinin, dielektrik sabiti daha düşük olan organik inhibitör molekülleriyle yer değiştirmesi sonucu yüzeyde koruyucu bir adsorpsiyon filminin oluştuğuna işaret etmektedir (Alibakhshi vd., 2018). Karakterizasyon analizlerinde "Tablo 1" tespit edilen yüksek selüloz, lignin ve polifenol içeriği; bu moleküllerin içerdiği elektronca zengin heteroatomların (O, N) metalin boş d-orbitalleri ile etkileşime girerek yüzeye tutunmasını kolaylaştırdığı şeklinde yorumlanabilir. Adsorpsiyon izotermeleri incelendiğinde, deneysel verilerin Langmuir modeline mükemmel uyum sağladığı ($R^2 \approx 1$) görülmüştür. Hesaplanan ΔG_{ads}^0 değerlerinin -20 ile -40 kJ/mol aralığında olması, adsorpsiyonun hem fiziksel (elektrostatik etkileşim) hem de kimyasal (elektron paylaşımı) mekanizmalarla gerçekleştiğini kanıtlamaktadır. Çalışmanın en dikkat çekici bulgusu, adsorpsiyon parametreleri ile koruma verimliliği arasındaki ilişkide gözlemlenmiştir. Termodinamik hesaplamalara göre en yüksek adsorpsiyon denge sabitine ($K_{ads} = 106,4$ L/g) sahip olan Fındık Zurufu Lifi, metal yüzeyine en güçlü tutunan inhibitör olmasına rağmen, korozyon inhibisyon verimliliği (%68,8) bakımından Fındık Yaprığı Lifinin (%81,0) gerisinde kalmıştır. Bu durum, korozyon korumasının sadece moleküllerin yüzeye tutunma gücüne değil, aynı zamanda oluşan filmin morfolojisine de bağlı olduğunu göstermektedir. Fındık Zurufu Lifi moleküllerinin, muhtemelen daha büyük ve kompleks yapısı nedeniyle yüzeyde sterik engel oluşturduğu ve metal yüzeyini boşluksuz bir şekilde kapatmadığı düşünülmektedir. Buna karşın, Fındık Yaprığı Lifi bileşenlerinin yüzeyde daha kompakt, yoğun ve boşluksuz bir film tabakası oluşturarak asidik çözeltinin metal ile temasını daha etkin bir şekilde engellediği değerlendirilmektedir. Benzer sterik engel etkileri, büyük moleküllü polimerik inhibitör çalışmalarında da rapor edilmiştir (Alaneme vd., 2015).

4. Sonuç

Bu çalışmada, fındık tarımsal atıklarının (yaprak ve zuruf) katma değerli korozyon inhibitörlerine dönüştürülme potansiyeli araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Fındık yaprağı ve zurufundan elde edilen hem ekstraktlar hem de diyet lifleri, 1 M HCl ortamında yumuşak çelik korozyonunu önlemede etkili olmuştur. İnhibitör derişimi arttıkça koruma performansı artmıştır.
2. Tüm inhibitörler arasında en yüksek koruma verimliliği %81,0 ile 200 mg/L Fındık Yaprığı Lifi kullanıldığında elde edilmiştir. Bunu sırasıyla yaprak ekstraktı, zuruf lifi ve zuruf ekstraktı takip etmiştir.
3. Elektrokimyasal ölçümler (Tafel), inhibitörlerin metal yüzeyindeki anodik ve katodik reaksiyonları

eş zamanlı olarak baskılayan karma tip inhibitör olarak davrandığını göstermiştir.

4. EIS verileri, korozyon sürecinin yük aktarım kontrollü olduğunu ve inhibitör moleküllerinin metal yüzeyinde koruyucu bir film tabakası oluşturarak yük aktarım direncini (R_{ct}) artırdığını kanıtlamıştır.
5. Adsorpsiyon mekanizmasının Langmuir izotermine uyduğu ve adsorpsiyonun kendiliğinden, hem fiziksel hem de kimyasal etkileşimleri içeren karışık tip bir süreç olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak; genelde yakılarak bertaraf edilen fındık atıklarının, özellikle yaprak liflerinin, sentetik inhibitörlere alternatif, ucuz, çevre dostu ve sürdürülebilir bir "yeşil inhibitör" kaynağı olarak kullanılabileceği ortaya konmuştur.

Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	B.T.Ö	N.Y.
K	40	60
T	50	50
Y	40	60
VTI	70	30
VAY	50	50
KT	60	40
YZ	70	30
KI	50	50
GR	70	30

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon.

Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

Etik Onay Beyanı

Bu araştırmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu makale, Bahar Tan Özay'ın Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yürütmekte olduğu 'Yumuşak Çeliğin Asidik Ortamda Korozyonunun Önlenmesi İçin Kullanılan Çevre Dostu İnhibitörlerin Etkisinin İncelenmesi' başlıklı doktora tez çalışmasından üretilmiştir.

Kaynaklar

- Alasalvar, C., Karamač, M., Amarowicz, R., & Shahidi, F. (2006). Antioxidant and antiradical activities in extracts of hazelnut kernel (*Corylus avellana* L.) and hazelnut green leafy cover. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(13), 4826–4832.
- Alaneme, K. K., Daramola, Y. S., Olusegun, S. J., & Afolabi, A. S. (2015). Corrosion inhibition and adsorption characteristics of rice husk extracts on mild steel immersed in 1M H₂SO₄ and HCl solutions. *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 2683–2697.
- Alibakhshi, E., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., Ramezanzadeh, B., Mahdavian, M., & Motamedi, M. (2018). *Glycyrrhiza glabra* leaves extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in 1 M hydrochloric acid solution: Experimental, molecular dynamics, Monte Carlo and quantum mechanics study. *Journal of Molecular Liquids*, 255, 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.144>
- Arthur, D. E., & Abechi, S. E. (2019). Corrosion inhibition studies of mild steel using *Acalypha chamaedrifolia* leaves extract in hydrochloric acid medium. *SN Applied Sciences*, 1(9), Article 1051. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1138-4>
- Bayıl, A., Oğuzkan, S., Uğraş, S., Can, M., Uzun, A., Ülger, S., Üzmez, Ş., Karagül, B., Kılıç, H. İ., Öztaş, M., & Uğraş, H. İ. (2016). Fındık (*Corylus avellana* L.) yeşil kabuk ve yaprak ekstraktlarında biyolojik aktivite tayini. *KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi*, 19(4), 362–369.
- Benzie, I. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70–76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Cordeiro, R. F. B., Belati, A. J. S., Perrone, D., & D’Elia, E. (2018). Coffee husk as corrosion inhibitor for mild steel in HCl media. *International Journal of Electrochemical Science*, 13(12), 12188–12207. <https://doi.org/10.20964/2018.12.29>
- Fernandes, C. M., Alvarez, L. X., Escarpini dos Santos, N., Barrios, A. C. M., & Ponzio, E. A. (2019). Green synthesis of 1-benzyl-4-phenyl-1H-1,2,3-triazole, its application as corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium and new approach of classical electrochemical analyses. *Corrosion Science*, 149, 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.01.019>
- Gülçin, İ., & Alwasel, S. H. (2023). DPPH radical scavenging assay. *Processes*, 11(8), Article 2248. <https://doi.org/10.3390/pr11082248>
- Huang, J. Y., Liao, J. S., Qi, J. R., Jiang, W. X., & Yang, X. Q. (2021). Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber are prepared from citrus peel. *Food Hydrocolloids*, 110, Article 106140. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106140>
- Iroha, N. B., James, A. O., & Iroha, N. B. (2019). An investigation on the inhibitory action of modified almond extract on the corrosion of Q235 mild steel in acid environment. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 12(2), 1–10. <https://doi.org/10.9790/5736-1202020110>
- Karaca, E. (2016). *Fındık zuruftu kompostunun toprakların ve fındık bitkisi yapraklarının besin maddesi içerikleri üzerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Li, X., Deng, S., & Fu, H. (2012). Inhibition of the corrosion of steel in HCl, H₂SO₄ solutions by bamboo leaf extract. *Corrosion Science*, 62, 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.05.008>
- Murmu, M., Saha, S. K., Murmu, N. C., & Banerjee, P. (2019). Effect of stereochemical conformation into the corrosion inhibitive behaviour of double azomethine based Schiff bases on mild steel surface in 1 mol L⁻¹ HCl medium: An experimental, density functional theory and molecular dynamics simulation study. *Corrosion Science*, 146, 134–151. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.10.002>
- Qiang, Y., Zhang, S., Tan, B., & Chen, S. (2018). Evaluation of Ginkgo leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor of X70 steel in HCl solution. *Corrosion Science*, 133, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.008>
- Saeed, M. T., Saleem, M., Usmani, S., Malik, I. A., Al-Shammari, F. A., & Deen, K. M. (2019). Corrosion inhibition of mild steel in 1 M HCl by sweet melon peel extract. *Journal of King Saud University - Science*, 31(4), 1344–1351. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.01.013>
- Sanaei, Z., Ramezanzadeh, M., Bahlakeh, G., & Ramezanzadeh, B. (2019). Use of *Rosa canina* fruit extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl solution: A complementary experimental, molecular dynamics and quantum mechanics investigation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 69, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.09.013>
- Saxena, A., Prasad, D., Haldhar, R., Singh, G., & Kumar, A. (2018). Use of *Sida cordifolia* extract as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 694–700. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.064>
- Shahidi, F., Alasalvar, C., & Liyana-Pathirana, C. M. (2007). Antioxidant phytochemicals in hazelnut kernel (*Corylus avellana* L.) and hazelnut byproducts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(4), 1212–1220.
- Shehata, O. S., Korshed, L. A., & Attia, A. (2018). Green corrosion inhibitors, past, present, and future. In *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72753>
- Vengatesh, G., & Sundaravadevelu, M. (2019). Non-toxic bisacodyl as an effective corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl: Thermodynamic, electrochemical, SEM, EDX, AFM, FT-IR, DFT and molecular dynamics simulation studies. *Journal of Molecular Liquids*, 287, Article 110906. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110906>
- Verma, C., Quraishi, M. A., Ebenso, E. E., & Bahadur, I. (2018). A green and sustainable approach for mild steel acidic corrosion inhibition using leaves extract: Experimental and DFT studies. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 4(3), Article 33. <https://doi.org/10.1007/s40735-018-0150-3>
- Yang, X., Dai, J., Zhong, Y., Wei, X., Zhang, Y., Wu, M., Huang, A., Wang, L., Huang, Y., Zhang, C., Chen, X., & Xiao, H. (2021). Characterization of insoluble dietary fiber from three food sources and their potential hypoglycemic and hypolipidemic effects. *Food & Function*, 12(11), 5005–5016. <https://doi.org/10.1039/D1FO00521A>