



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.01.2025
Kabul Tarihi : 27.03.2025

Received Date : 27.01.2025
Accepted Date : 27.03.2025

TURBA ÇÖZELTİSİNİN TİTANYUMUN ÇUKURLAŞMA KOROZYONU ÜZERİNDEKİ ROLÜNÜN ORTAYA ÇIKARILMASI

REVEALING THE ROLE OF PEAT SOLUTION OVER THE PITTING CORROSION OF TITANIUM

Ayhan ORHAN¹ (ORCID: 0000-0002-7648-2566)

Nurettin ÇEK^{2,3*} (ORCID: 0000-0001-6120-9228)

¹ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

² Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri Programı, Elazığ, Türkiye

³ OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nurettin ÇEK, nurettincek001@gmail.com (nurettin.cek@ostimteknik.edu.tr)

ÖZET

Ucuz olması ve lokal korozyona karşı daha az duyarlı olduğu gerekçesiyle karbon çeliğinden üretilen yeraltı boru hatları, korozyon saldırısına karşı yetersiz kalmaktadırlar. Bu sorun nedeniyle yeraltı boru hatlarının ömrü kısalmış, ekonomik ve can kayıpları ortaya çıkar. Bu nedenle, yeraltı boru hattı uygulamalarında kullanılan çelik malzemelere yeni bir seçenek olabilecek malzemelere ihtiyaç duyulduğu gerçeği halen güncelliğini korumaktadır. Ayrıca, dünyada önemli bir alan kaplayan ve yeraltı boru hatlarının geçtiği turba ortamlarının korozif etkisi hakkında çalışmalar oldukça fakirdir. Bu nedenle, bu çalışmada, turba çözeltisindeki titanyum malzemenin çukurlaşma korozyonu özellikleri, üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmalar kapsamında açık devre potansiyeli ve döngüsel potansiyodinamik kutuplaşma testleri gerçekleştirilmiştir. Bahse konu testler birbirleriyle tutarlı olarak gerçekleşmiş ve bu testler turba çözeltisinde titanyum malzemenin çukurlaşma korozyonuna karşı direnç gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, çukurcuk korozyonuna karşı direnç göstermesi nedeniyle turba ortamlarından geçen yeraltı boru hatlarında kullanılan çelik esaslı malzemeler yerine titanyum esaslı boruların kullanılması tavsiye edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çukurlaşma korozyonu, korozyon, titanyum, turba çözeltisi.

ABSTRACT

Underground pipelines made of carbon steel, due to their low cost and lower sensitivity to local corrosion, are inadequate against corrosion attack. Due to this problem, the life of underground pipelines is shortened, and economic and life losses occur. Therefore, the fact that materials that can be a new alternative to steel materials used in underground pipeline applications are needed is still up to date. Also, studies on the corrosive effects of peat environments, which cover a significant area in the world and through which underground pipelines pass, are quite poor. Therefore, in this study, the pitting corrosion properties of titanium material in peat solution were investigated using a potentiostat/galvanostat device in a three-electrode electrochemical cell. Open circuit potential and cyclic potentiodynamic polarization tests were carried out within the scope of the research. The tests in question were carried out consistently with each other and these tests revealed that titanium material in peat solution showed resistance to pitting corrosion. Therefore, due to its resistance to pitting corrosion, it is recommended to use titanium-based pipes instead of steel-based materials used in underground pipelines passing through peat environments.

Keywords: Pitting corrosion, corrosion, titanium, peat solution.

GİRİŞ

Korozyon, genellikle metallerde ve metal içeren malzemelerde bulundukları ortamın etkisi altında meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler olarak tanımlanır. Korozyon, doğal bir süreç ve disiplinler arası bir konu olduğu için mühendislik ve bilimin önemli ve zorlu yönlerinden biridir (Sarwar et al., 2024; Çek and Orhan, 2025). Korozyonun en fazla hasara yol açtığı alanlardan biri de yer altı boru hatlarıdır. Çelik malzemeler çoğunlukla yer altı boru hatlarında kullanılır ve burada çelik malzemelerin korozyona dayanıklı olduğu düşünülse de gerçek farklıdır. Bunun en önemli göstergelerinden biri de yer altı boru hattı arızalarının %30'unun korozyondan kaynaklanmasıdır (Soomro et al., 2022). Korozyonun yer altı boru hatları için ne kadar ciddi bir sorun olduğunun bir başka örneği de Kanada'dır. Burada 2014 ile 2018 yılları arasında yer altı (petrol/gaz) boru hattı arızalarının %41'inin korozyondan kaynaklandığı bildirilmiştir. Daha da endişe verici olanı, 2010 ile 2019 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde meydana gelen tehlikeli sıvı boru hattı kazalarının %20'sinin korozyondan kaynaklanmasıdır (Qin and Cheng, 2021). Dünyanın enerji ihtiyacının %50'sinden fazlası petrol ve gaz kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu enerji ihtiyacını karşılayan petrol ve gazın taşınması boru hatları aracılığıyla yapılmaktadır. Bu nedenle boru hatları en önemli enerji iletim arterlerinden biridir. Dünya çapındaki petrol ve gaz ana boru hatlarının toplam uzunluğunun 2023 yılında 2,15 milyon km olması tahmin edilmektedir. Bu oranın 2027 yılına kadar %5'ten fazla artması öngörülmektedir. Boru hattı tipleri arasında gaz boru hatları en hayati olarak gösterilmektedir. Ancak bu boru hatları da korozyondan mustarıptır ve korozyon nedeniyle hizmet ömürleri önemli ölçüde azalabilir (Hussain et al., 2024). Gaz boru hatlarının en büyük sorunu olan korozyon nedeniyle, ABD'deki gaz boru hattı operatörleri 2010-2013 yılları arasında 466 milyon ABD doları tutarında mali kayba uğradı (Hosseinzadeh et al., 2024). Sağlanan bilgilere göre, 2023 yılında ABD'nin Arizona eyaletinde bir doğal gaz boru hattının korozyon nedeniyle patlaması sonucu iki kişi hayatını kaybetti ve 5,5 milyon ABD doları tutarında ekonomik kayıp yaşandı. Dahası, boru hatlarının tasarımı ve bakımındaki önemli zorluklardan biri de korozyondur, çünkü korozyon nedeniyle boru hatlarında çatlaklar ve çeşitli kusurlar oluşur (Sarwar et al., 2024). Bu bilgi tek başına boru hattı korozyonunun neden olduğu potansiyel hasarı ve bu tür hasarı en aza indirmek için malzeme araştırmanın önemini vurgulamaktadır.

Su, petrol ürünleri ve çeşitli kimyasallar taşıyan yer altı boru hatları, daha ucuz ve lokal korozyona daha az duyarlı olduğu için karbon çeliğinden üretilir. Dahası, karbon çeliği bu konuda endüstriyel uygulamalar için en popüler malzemedir. Ancak yeraltı boru hatlarında kullanılan karbon çeliğinin hem iç hem de dış boru yüzeylerinde korozyon saldırısına maruz kaldığı bildirilmiştir (Bairi et al., 2024). Karbon çeliğinin bir türü olan C20 çeliği, boru hatlarında kullanılan boru malzemelerinden biridir. Bu malzemenin petrol sahasında üretilen suda korozyon davranışı elektrokimyasal teknikler (açık devre potansiyeli, elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve galvanik kuplaj) ve yüzey analizi ile incelenmiştir. Araştırma sonuçları C20 çeliğinde ciddi yerel korozyon meydana geldiğini ortaya koymuştur (Udowo et al., 2024).

Yeraltı boru hatlarında kullanılan malzemelerden biri olan X60 çeliğinden yapılmış boruların korozyon davranışını inceleyen çalışmalarda, bu malzemenin iç duvarının ciddi şekilde aşındığı, korozyonun çelik borunun alt kısmında, özellikle sızıntı noktasının etrafında belirgin olduğu ve sonunda sızıntı noktasında çukurlaşma korozyonunun meydana geldiği bildirilmiştir (Ma et al., 2022).

Düşük maliyet ve kolay üretim gibi avantajları nedeniyle X70 çelik malzemesi, yeraltı boru hatları için dünya çapında yaygın kullanılan malzemelerden biridir. X70 çelik malzemenin üretilen boru hatlarında elektrokimyasal ve mikrobiyal faktörler nedeniyle korozyon meydana geldiği vurgulanmıştır. Ayrıca, X70 çeliğinden yapılmış boru hatları için ana tehlikenin bakteriyel korozyon tehlikesi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, bakteriyel korozyonun elektrokimyasal ve stres gibi olumsuz faktörlerle birlikte hareket ederek boru hattını tahrip ettiği vurgulanmıştır (Yang et al., 2022).

X70 çeliğinden daha yüksek mukavemete sahip bir boru hattı malzemesi olarak öne çıkan X80 çeliği, X70 çeliğine kıyasla inşaat maliyetlerinde %7 tasarruf sağlamıştır. Bu nedenle kullanımı her geçen gün artan X80 çeliği, 2018 yılına kadar küresel boru hatlarının 300.000 km'ye kadarını kaplamıştır (Shuai et al., 2020). Yeraltındaki X80 boru hattı çeliğinin yüzeyinde korozyon ürünlerinin birikmesi nedeniyle anodik ve katodik reaksiyon süreçlerinin etkilendiği ve bunun korozyon hasarının derecesinde değişikliklere yol açabileceği bildirilmiştir (Wang et al., 2025). Karbon çelik boru hatlarında oluşan korozyon tipleri genellikle homojen korozyon, çukurlaşma korozyonu ve yarık korozyonu olarak kabul edilir. Bu korozyon tiplerinin ortaya çıkma nedenleri galvanik korozyon, kavitasyon-erosif korozyon, kaçak akım korozyonu, gerilim korozyon çatlaması ve mikrobiyolojik olarak etkilenen korozyon olarak rapor edilmektedir (May et al., 2022).

Korozyon sorunu nedeniyle yeraltı boru hattı uygulamalarında kullanılan çelik malzemelere yeni bir alternatif olabilecek malzemelere ihtiyaç duyulduğu gerçeği hala güncelliğini korumaktadır (Sarwar et al., 2024; Soomro et al., 2022). Bu soruna bir çözüm bulmak amacıyla, son yıllarda boru hatlarının kullanıldığı alanlardan biri olan petrol endüstrisinde titanyum ve alaşımlarının korozyonu ve diğer özellikleri araştırılmıştır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının sulu çözeltilerdeki çözünmüş oksijenle reaksiyona girerek yüzeylerinde onlarca ila yüzlerce nanometrelik bir oksit filmi oluşturabildiği belirlenmiştir. Titanyum bazlı malzemelerin, nispeten yoğun yapıları ve kararlı kimyasal özellikleri nedeniyle aşındırıcı iyonlar tarafından daha fazla aşınmayı etkili bir şekilde önleyebildiği anlaşılmıştır. Titanyum bazlı malzemeler hakkında birçok araştırma sonucu olmasına rağmen, hala çözülmesi gereken bazı sorunlar vardır (Wang et al., 2024). Yeraltı boru hatlarında titanyum bazlı malzemelerin uygulanmasından bahseden çalışmalar genellikle bir alaşımlama sürecini tanımlar. Örneğin, Gu et al. (2023) tarafından yürütülen çalışmada, geleneksel X80 çeliği bir vakum eritme ünitesinde eritilmiş ve eritilmiş numunelere farklı ağırlık oranlarında titanyum eklenerek yeni boru hattı çelik malzeme numuneleri üretilmiştir. Çalışmanın sonuçları, titanyum ilavesinin X80 boru hattı çeliğinin çekme mukavemetini, akma mukavemetini, darbe tokluğunu ve korozyon direncini artırabileceğini göstermiştir (Gu et al., 2023).

Dökme demir, çelik, bakır alaşımları, nikel alaşımları gibi malzemelerin kil, tın, turba, çamur, cüruf gibi farklı toprak tipleri içerisindeki korozyon davranışları incelenmiş olmasına rağmen (Kotni et al., 2024), özellikle turba ortamlarında titanyumun korozyon davranışlarına ilişkin literatür oldukça zayıftır. Turba ortamında titanyumun korozyon davranışını inceleyen nadir çalışmalardan birinde, açık devre potansiyeli ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi testleri yapılmış ve titanyumun turba korozyonuna karşı direnç gösterdiği belirtilmiş olmasına rağmen, ne yazık ki korozyon mekanizması ve korozyon türü hakkında ayrıntılı bilgi eksiktir (Orhan and Çek, 2024). Turba, dünya kara alanının yaklaşık %3'ünü kaplayan organik madde açısından zengin asidik bir toprak türüdür (Girkin et al., 2023). Turba ayrıca *Clostridium* bakterileri gibi çeşitli mikroorganizmalara da ev sahipliği yapar (Erensoy et al., 2022). Yeraltı (petrol, gaz vb.) boru hatlarının kaçınılmaz olarak turba topraklarının bulunduğu alanlardan geçtiği yadsınamaz bir gerçektir (Thurairajah et al., 2022).

Bu bağlamda, bu çalışma, asitli özellik göstermesi nedeniyle aşındırıcı çevre koşulları sergileyen ve mikrobiyal çeşitlilikleri nedeniyle mikrobiyal kaynaklı korozyon yaratma potansiyeline sahip turba ortamlarından geçen yer altı boru hatları için titanyumun uygun bir malzeme olup olamayacağı sorusunun cevabını bulmayı amaçlamaktadır. Bunun için, bu çalışma titanyumun yer altı boru hatları için uygun bir malzeme olarak tanıtımına katkıda bulunmayı ve gerçek servis koşulları altında titanyum malzemenin çukurlaşma korozyon davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamayı hedeflemektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Saf titanyum tel Shanghaimetal (Çin) firmasından satın alındı. Malzemenin katalog verileri, yüksek saflıkta (%99,9) titanyum olduğunu ifade etmektedir. Bu malzeme, 1,002 gram ağırlığında silindirik (68,26 x 2 mm) bir çubuk şeklindedir. Yüksek organik madde (%99) içeriğine sahip asidik (pH ~5,6) karakterli turba toprağı Fidanistanbul firmasından satın alındı. Turba çözeltisi hazırlama işlemi, distile su (Onur Kimya, Ankara) kullanılarak cam kap (50 x 50 x 50 mm) içerisinde gerçekleştirildi. Ağılık ölçümleri için hassas terazi (Weightlab WL-603), korozyon testleri için potansiyostat/galvanostat (İvium Vertex.1A, Hollanda) cihazı kullanıldı. Gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) referans elektrot ve platin yardımcı elektrot BASi (Amerika Birleşik Devletleri) firmasından satın alındı.

Yöntem

Tüm çalışmalar, deneyler ve testler oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Korozyon deneylerine başlamadan önce turba çözeltisi hazırlandı. Bunun için deneylerin gerçekleştirileceği cam kap boyutu dikkate alınarak 50 gram kuru turba hassas terazide tartıldı. Homojen bir karışım elde etmek amacıyla turba su oranı eşit tutuldu ve cam kap içerisine 50 mL distile su ilave edilip karıştırıldı. Elde edilen turba malzemesinin iyice çözünmesi amacıyla 24 boyunca cam kapta bekletildi. Bu süre zarfında titanyum silindir çubuk, saf su ile yıkandı ve oda koşullarında kurutuldu. 24 saat dolduktan sonra turba çözeltisinin bir çamur görünümünde olduğu görülmesi ile birlikte korozyon deneyleri aşamasına geçildi.

Korozyon deneyleri için cam kap içerisindeki turba çözeltisi içerisine titanyum silindir çubuk, Ag/AgCl referans elektrot ve platin tel yardımcı elektrot yerleştirildi. Böylece korozyon deneylerinin önceki çalışmalarla tutarlı bir şekilde olmasını mümkün kılan üç elektrotlu elektrokimyasal hücre oluşturuldu. Burada, titanyum çalışma elektrotu

olarak görev yapmaktadır. Üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede korozyon deneyleri potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak gerçekleştirildi (Benitez, et al., 2025).

Turba çözeltisindeki titanyumun korozyonunu tahribatsız bir şekilde araştırmak ve izlemek için açık devre potansiyeli (ADP) gözlemi, zamana karşı potansiyel değerinin kaydedilmesiyle gerçekleştirildi (Hemkemeier et al. 2022). ADP gözlemi 24 saat boyunca gerçekleştirildi. İstikrarlı bir ADP elde edildikten sonra detaylı korozyon çalışmaları aşamasına geçildi ve bu aşamada yeraltı boru hatlarının en önemli sorunlarından birisi olan çukurlaşma korozyonu araştırıldı (Mollapour and Poursaeidi, 2021).

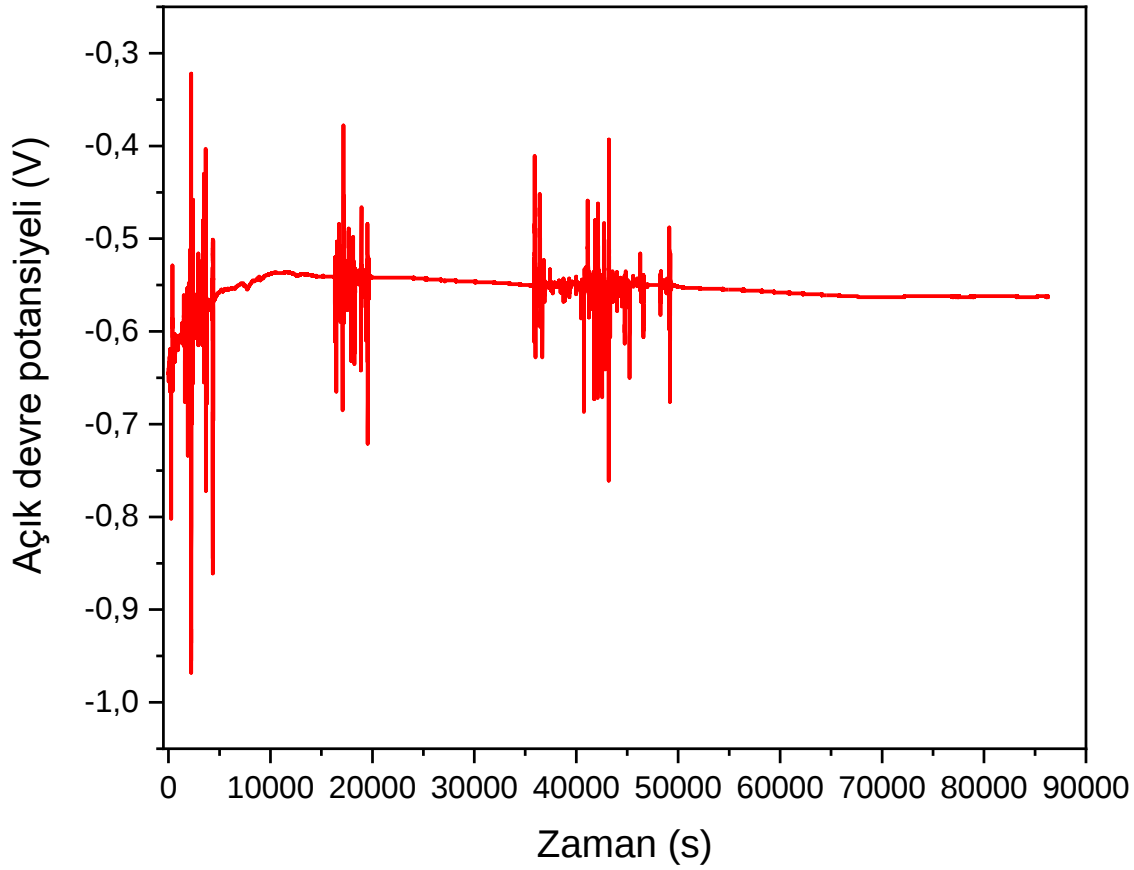
Çukurlaşma korozyonu, döngüsel potansiyodinamik kutuplaşma (DPK) testi ile gerçekleştirildi. DPK taraması süreci; titanyum malzeme, referans elektrot, yardımcı elektrot ve turba çözeltisi değiştirilmeden dört kez tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir DPK taraması, 0,167 mV/s tarama hızıyla ADP'ye karşı -50 mV yukarı değerden başlatılarak yapılmıştır. ADP'ye karşı +1000 mV değerinde veya akım yoğunluğu 1 mA/cm² değerinde ulaştığında tersine döndürülmüş ve son olarak ADP değerinde durdurulmuştur (Liu et al., 2024). Böylece DPK testi tamamlanmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma, turba çözeltisi ortamında titanyumun yüzeyinde film oluşturma sürecinin, tüm oluşma ve titanyum yüzeyine yayılma süreci boyunca kimyasal tepkime, elektrokimyasal tepkime ve kimyasal adsorpsiyonun karışık bir tepkime süreci olduğunu göstermiştir. ADP ölçümü tamamen nitel yöntem bir yöntem olup temel amacı, herhangi bir nicel bilgi sağlamadan korozyon oluşma olasılığını değerlendirmektir (Hemkemeier et al., 2022).

Şekil 1, turba ortamındaki titanyumun zamana bağlı ADP grafiğini sunmaktadır. Burada görüleceği üzere yaklaşık olarak ilk 6000 saniyede oldukça değişken bir durum söz konusudur. Salınım olarak da tanımlanabilecek ADP'nin bu değişkenliği, metastabil çukurlaşma nedeniyle ortaya çıkmış olabilir. 6000 saniye ile yaklaşık 15000 saniye arasında ADP değerinin pozitif yönde kayarak artması turba çözeltisindeki titanyum yüzeyinde pasifleşmenin oluşumuna atfedildi (Kakinuma et al., 2021). Söz konusu pasifleşme, turba çözeltisinin etkisiyle titanyumun yüzeyinde oksit film oluşumu sayesinde ortaya çıkmış olabilir ve bu korozyon saldırısına karşı bir engel görevi görebilir (Heakal and Shehata, 2020). Yaklaşık 15000 saniye ile 22500 saniye arasında, ADP tekrar salınımlar sergiledi. Bu, titanyum yüzeyinde pasifleşmeyi sağlayan oksit film tabakasının hızlı bir şekilde bozulduğunu ve hızlı bir şekilde tekrar oluşumu nedeniyle meydana gelmiş olabilir (Qin et al., 2021). Yaklaşık 22500 saniyeden 36380 saniyeye kadarki süreçte ADP, -0.545 ± 0.006 V değerinde gayet kararlı bir durum sergilemiştir. Bu nedenle bu zaman aralığında titanyum yüzeyinde pasifleşmeyi sağlayan oksit film tabakasının korozyon saldırısına karşı direnç gösterdiği sonucuna varılabilir. 36380 saniyeden sonra yaklaşık 49359 saniyeye kadar ADP yine dikkat çekici seviyede salınımlı bir eğri sergileyerek titanyum yüzeyindeki oksit film tabakasının hızlı bir şekilde bozulup oluştuğunu düşündürmüştür. 49360 saniyeden 64116 saniyeye kadar ADP, -0.550 V değerinden -0.561 V değerine kadar düşmüştür. Bu zaman aralığında ADP değerinin negatif yönde kayması titanyumun turba çözeltisinde negatif yöne doğru kayması titanyum yüzeyinde korozyon ürünlerinin biriktiğini gösterir (Radovanović et al., 2019). Dahası bu, titanyum yüzeyine turba çözeltisinden agresif iyonların difüzyonunun bir sonucu olarak da ifade edilebilir (Palaniappan et al., 2020). 64117 saniyeden 86400 saniyeye kadar ADP -0.562 ± 0.001 V değeri ile oldukça kararlı bir durum sergilemiştir. ADP'deki dalgalanmaların azalması titanyum yüzeyinde daha yoğun ve daha kararlı bir yüzey filminin oluşmasına atfedilir. Üstelik, titanyum yüzeyinde oluşan oksit filminin deneylerin sonunda dahi oldukça kararlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle, potansiyel daha kararlı bir hal sergilemiştir (Kaya et al., 2023).

DPK testi sayesinde turba çözeltisindeki titanyum malzemenin aktivasyon, pasifleşme ve trans-pasif özellikleri hakkında bilgiler sunan döngüsel polarizasyon davranışı ortaya çıkarıldı. Turba çözeltisinde titanyum genellikle pasifleşme özelliği göstermekte olup Şekil 2, turba çözeltisindeki titanyumun DPK ölçümlerinden elde edilen grafikleri sunmaktadır. Şekil 3, turba çözeltisindeki titanyumun DPK ölçümlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Her iki şekilde görüleceği üzere tüm grafiklerde ters kutuplaşma eğrileri dikkat çekmektedir. Bu genellikle, sivri uçlar oluşturan çoklu anodik-katodik geçiş potansiyelleri (katodik halka) ve esasen tüm ters tarama boyunca pozitif histerezis göstermesine neden olmuş olabilir. Bu çoklu anodik-katodik geçiş potansiyelleri, anodik ve katodik potansiyel çizgilerinin kesişim noktalarına karşılık gelir. Bu, genellikle çukurlaşma korozyonu olmadığında ters kutuplaşma taramalarında gözlemlenen bir durumdur (Sfikas et al., 2020).

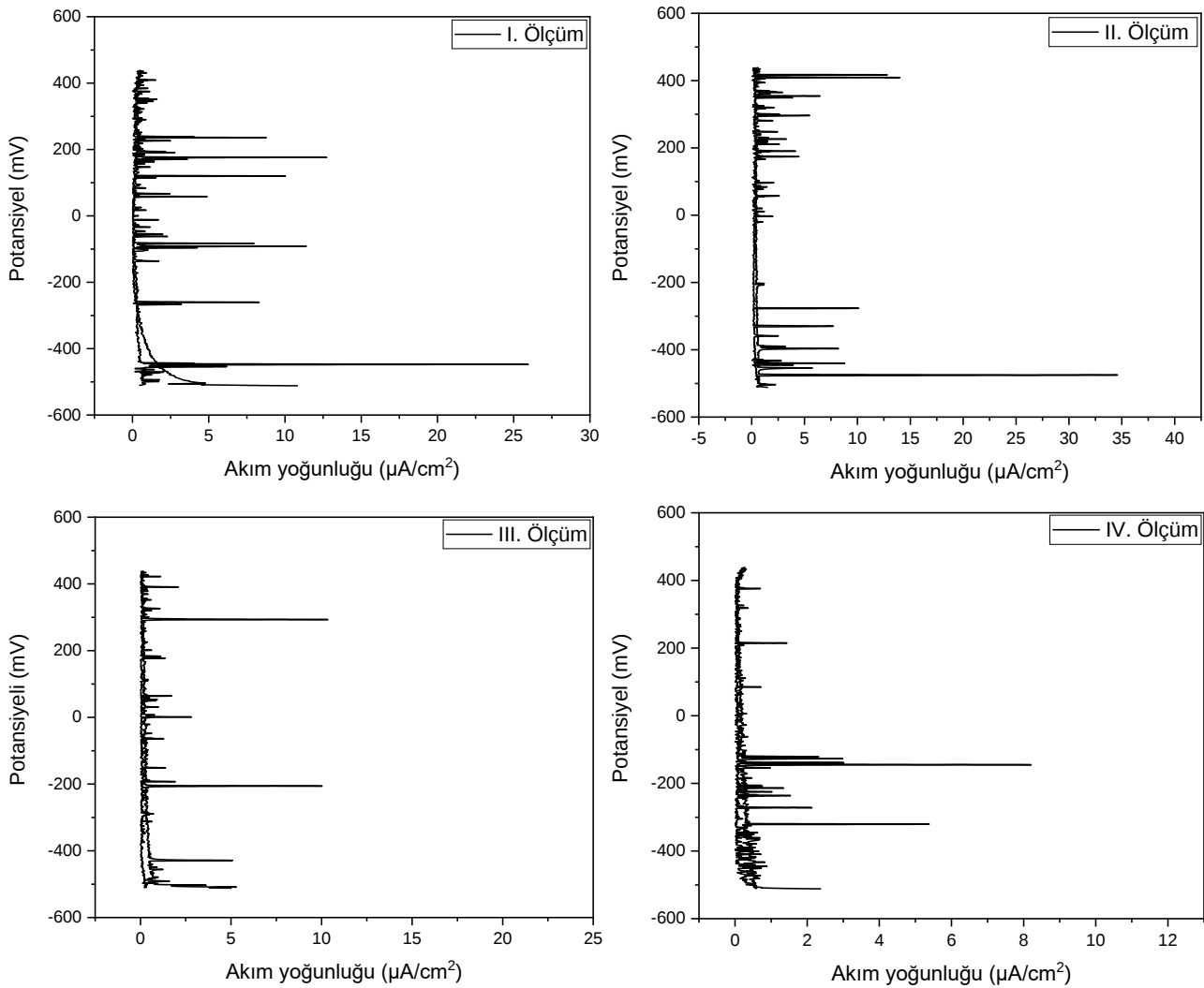


Şekil 1. Turba ortamındaki titanyumun zamana bağlı ADP eğrisi

DPK ölçümleri kapsamında; korozyon potansiyeli, çukurlaşma potansiyeli, koruma potansiyeli ve akım yoğunluğu değerleri tespit edildi. Korozyon potansiyeli değeri ile çukurlaşma potansiyeli arasındaki potansiyel fark malzemenin çukurlaşma korozyonuna karşı direncinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Söz konusu potansiyel fark ne kadar büyükse malzeme çukurlaşma korozyonuna karşı o denli iyi direnç göstereceği düşünülmektedir (Radojković et al., 2023). Çukurlaşma potansiyeli, pasifleşmenin artık baskın olmadığı ve pasif filmin bozulmaya uğradığı ve kararlı çukurlaşmanın meydana geldiği potansiyele karşılık gelir. Koruma potansiyeli, ters tarama eğrisinin ileri tarama eğrisiyle kesiştiği potansiyele karşılık gelir. Bu potansiyel, başlatılan korozyon çukurlarının büyümesinin durduğu veya başka bir deyişle pasifleşmenin meydana geldiği potansiyeldir. Akım yoğunluğundaki artış olması, pasif film bozulması ve çukur oluşumunun bir göstergesi olarak ifade edilebilir (Singh and Shahi, 2022). Bu çalışmada DPK testleri 4 kez tekrarlandığı için her bir ölçüm için çukurlaşma potansiyeli, koruma potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu değerleri tespit edilmiş olup bunlar Tablo 1’de verilmiştir. Burada görüleceği üzere, dört ölçümde de korozyon potansiyeli ve çukurlaşma potansiyelleri birbirlerine çok yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Bu durum, çevrimlerin ileri taramasında çukurlaşma korozyonunun görülmediğini açıkça ortaya koymaktadır (Kiourtsidis et al., 1999). Bu sonuç, ölçümün kararlılığını yansıtan bir bulgu olarak düşünülmektedir. Ayrıca, en düşük çukurlaşma potansiyeli ilk ölçümde görülürken en yüksek çukurlaşma potansiyeli III. ölçümde görülmüştür. Burada, turba çözeltisindeki titanyum yüzeyinde oluşan oksit film tabakası nedeniyle çukurlaşma potansiyelinin arttığı düşünülmektedir. Dahası, titanyum yüzeyinde bulunan oksitli film tabakasındaki oksit içeriğinin artmış olmasına bağlı olarak çukurlaşma korozyon direncinin artması gerçekleşmiş olabilir (Xiao et al., 2024). IV. ölçümde söz konusu oksit tabasında çatlamlar olmuş olabileceği için korozyon potansiyeli, III. ölçümde göre 28 mV daha düşük olsa da I. ve II. ölçümde göre oldukça yüksektir. Bu nedenle, turba çözeltisindeki titanyum deneylerin başına göre deneylerin sonuna doğru çukurlaşma korozyonuna karşı daha yüksek direnç sergilemiştir. Bunun bir başka göstergesi de korozyon potansiyeli ile çukurlaşma potansiyeli arasındaki en yüksek farkın III. ölçümde en düşük farkın ise I. ölçümde olmasıdır. Koruma potansiyelinin dört ölçümde de korozyon potansiyeline yakın olması, titanyum malzemenin turba çözeltisine yerleştirildiğinde korozyon tepkimeleri başlar başlamaz korozyona karşı direnç gösterdiğini düşündürmüştür. En yüksek akım yoğunluğu ilk ölçümde en düşük akım yoğunluğu IV. ölçümde görülmüştür. Deneylerin sonunda, başlangıca göre daha düşük akım yoğunluğunun ölçülmesi korozyon hızının azaldığını, korozyon direncinin arttığını gösterir. Bu durum turba çözeltisinde titanyumun zamana göre korozyon

direncin geliştirdiği fikrini vermiştir. Bunun nedeni olarak da turba çözeltisindeki titanyum yüzeyinde zaman bağlı oksit film gelişimi olması düşünülmektedir. Ayrıca, akım yoğunluğu $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den az olduğunda pasif olarak kabul edildiği için turba çözeltisindeki titanyum malzeme dört ölçümün tamamında pasifleşme özelliği sunmuştur (Xiong et al. 2024). Tüm bunlar, titanyumun turba çözeltisinde korozyon saldırısına karşı oldukça iyi direnç sergilediğinin birer göstergeleridir.

Sonuç olarak, oluşan pasifleşme özelliğinin turba çözeltisinde titanyum malzemenin etkili korozyon direncini sağladığı düşünülmektedir.

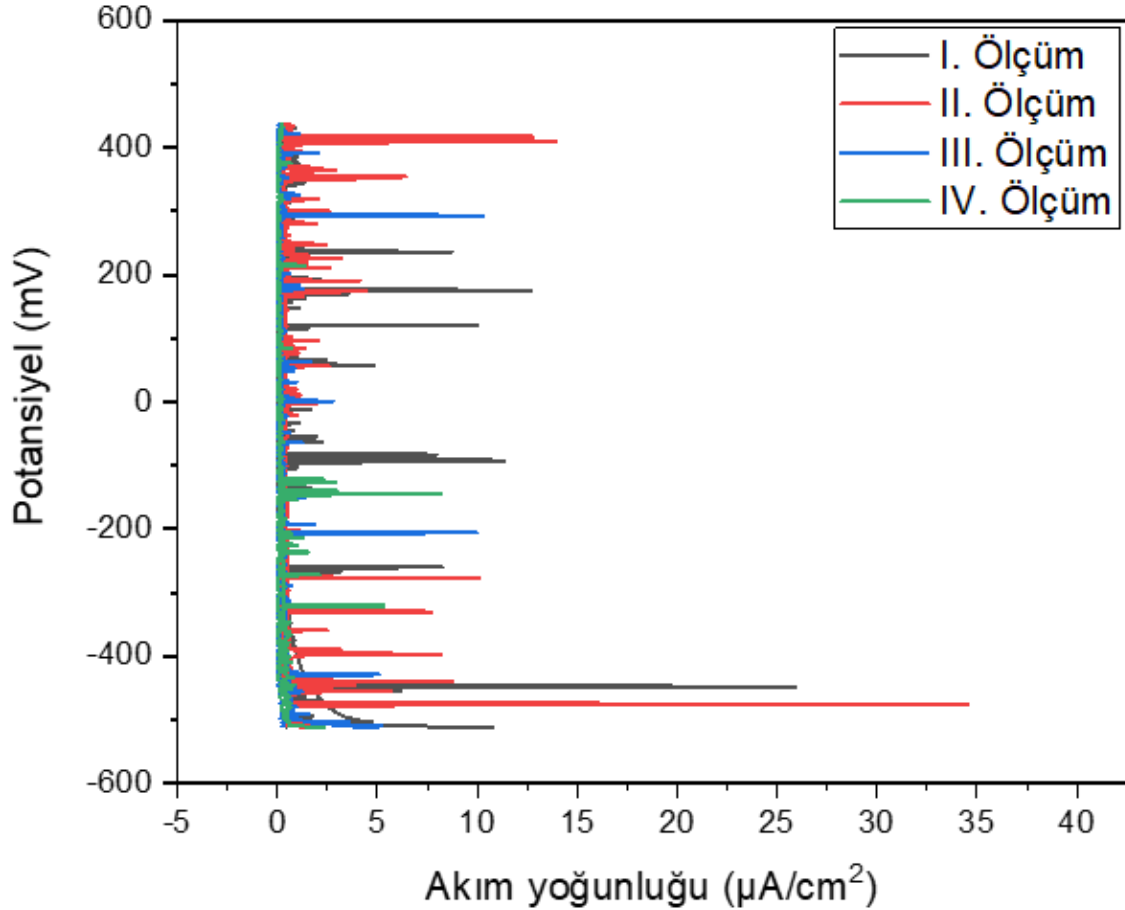


Şekil 2. Turba ortamındaki titanyumun DPK ölçümleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, turba ve su oranı 1:1 olacak şekilde hazırlanan turba çözeltisinde titanyum malzemenin korozyon davranışı ADP ve DPK testleriyle araştırılmıştır. Her iki test turba çözeltisindeki titanyumun korozyon davranışını yansıtan çukurlaşma ve elektrokimyasal pasifleşme davranışı hakkında kapsamlı bilgiler sağlamıştır. ADP ölçümlerinin başlangıcına kıyasla sonunda daha pozitif bir ADP değeri elde edilmiştir. ADP değerinin pozitif potansiyel yönünde kayması turba çözeltisinde titanyum malzemenin yüzeyinde oksit film tabakası oluşumu ile ilişkilendirilmiştir. ADP ölçümlerinde belirli zamanlarda keskin salınımlar olduğu görülmüştür. Bu salınımların titanyum yüzeyinde hızlı bir şekilde oksit tabakası oluşumu, hızlı bir şekilde bozulması ve hızlı bir şekilde tekrar oluşumu nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmüştür. Bununla birlikte, deneylerin sonuna doğru ADP değerlerindeki keskin salınımların azalması ve istikrarlı bir şekilde sonuçlanması, titanyum yüzeyinde kararlı bir oksit film tabasının varlığının göstergesi olarak düşünülmüştür. DPK ölçümlerinde pozitif histerezis görülmüş olup bu, genellikle

çukurlaşma korozyonu olmadığını göstermesi açısından önemli bir sonuçtur. Ayrıca, bu durum literatürdeki ters kutuplaşma taramalarında gözlemlenen bir durum olması bakımından çalışmanın literatür ile tutarlılığın bir göstergesi olarak önemli bir sonuçtur. DPK ölçümlerinden elde edilen çukurlaşma potansiyeli, koruma potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu değerleri ve bunların birbirleriyle ilişkileri, turba çözeltisine titanyum malzemenin çukurlaşma korozyonuna karşı daha yüksek direnç sergilediğini göstermiştir. Üstelik, akım yoğunluğu değeri $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden az olarak gerçekleştiği olduğu için çözeltisindeki titanyum malzeme dört DPK ölçümün tamamında pasifleşme özelliği sergilemiştir. ADP ve DPK testleri birbirleriyle tutarlı olup turba çözeltisinde titanyum malzemenin çukurlaşma korozyonuna karşı direnç gösterdiğini ortaya koymuştur.



Şekil 3. Turba ortamındaki titanyumun DPK ölçümlerinin karşılaştırılması

Tablo 1. DPK testlerinden elde edilen bulgular.

Parametre	I. Ölçüm	II. Ölçüm	III. Ölçüm	IV. Ölçüm
Korozyon potansiyeli (V)	-0,494	-0,502	-0,502	-0,498
Çukurlaşma potansiyeli (V)	-0,448	-0,330	-0,206	-0,234
Korozyon potansiyeli – Çukurlaşma potansiyeli (V)	-0,046	-0,172	-0,296	-0,264
Koruma potansiyeli (V)	-0,508	-0,504	-0,506	-0,510
Korozyon akım yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	3,21	1,30	0,389	0,676

Turba ortamlarından geçen yeraltı boru hatlarında kullanılan çelik esaslı malzemeler yerine çukurlaşma korozyonuna karşı direnç göstermesi nedeniyle titanyum esaslı boruların kullanılması tavsiye edilmektedir. Bir başka deyişle, çukurlaşma korozyonuna dirençli olan titanyumun yeraltı boru hattı malzemesi olarak kullanılması teşvik edilmelidir. Ayrıca, turba ortamında titanyumun diğer korozyon türlerine karşı davranışının araştırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Korozyon testleri konusundaki destekleri için Karabük Demir ve Çelik Fabrikaları A.Ş. (KARDEMİR) İleri Teknolojiler Araştırma ve Mühendislik Merkezi'ne teşekkür etmek isteriz.

Bu çalışma, ikinci yazarın birinci yazar danışmanlığında yürütülen doktora tezinden esinlenerek üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- Bairi, L.R Bhuyan, P., Ghosh, A., Narang, M., Mandal, S. (2024). Microbially induced corrosion issues in the underground buried crude oil and natural gas bearing pipelines: A review. *Materials and Corrosion*, 75(2), 197-211. <https://doi.org/10.1002/maco.202313950>
- Benitez, D.A.N., Galvez, A.K.L., Sesenes, R.L. et al. (2025) A Study of the Corrosion Inhibition of Aluminum in Ethanol-Gasoline Blend Using Annona muricata Leaves Extract. *J Bio Tribo Corros* 11, 3. <https://doi.org/10.1007/s40735-024-00923-4>
- Çek N. and Orhan, O (2025). Understanding the Corrosion Behaviour of Graphite in Peat Environment for Environmental and Sustainability Applications. *Journal of Polymer and Composites*, 13(01), 728-737. <https://journals.stmjournals.com/jopc/article=2024/view=188605>
- Erensoy, A., Mulayim, S., Orhan, A., Çek, N., Tuna, A., Ak, N. (2022). The system design of the peat-based microbial fuel cell as a new renewable energy source: The potential and limitations. *Alexandria Engineering Journal*, 61(11), 8743-8750. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.020>
- Girkin, N.T., Burgess, P.J., Cole, L., Cooper, H.V., Coronado, E.H., Davidson, S.J., Hannam, J., Harris, J., Holman, I., McCloskey, C.S., McKeown, M.M., Milner, A.M., Page, S., Smith, J., Young, D. (2023). The three-peat challenge: business as usual, responsible agriculture, and conservation and restoration as management trajectories in global peatlands. *Carbon Management*, 14(1), 2275578. <https://doi.org/10.1080/17583004.2023.2275578>
- Gu, Y., Li, Z., Li, J., Wang, Q., Zhao, Y., Wu, C., Su, X., Peng, H. (2023). Effect of Ti addition on mechanical properties and corrosion resistance of X80 pipeline steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 206, 105003. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105003>
- Hemkemeier, T.A., Almeida, F.C.R., Sales, A., Klemm, A.J. (2022). Corrosion monitoring by open circuit potential in steel reinforcements embedded in cementitious composites with industrial wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01042. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01042>
- Heakal, F.ET., Shehata, O.S. (2020). Insight into the Electrochemical and Semiconducting Properties of Native Oxide Films on Ti Metal and Its Ti-6Al-4V Alloy in Borate Buffer Solutions. *Prot Met Phys Chem Surf* 56, 333-342. <https://doi.org/10.1134/S2070205120020082>
- Hosseinzadeh, S., Bahaari, M.R., Abyani, M. (2024). Reliability assessment for pipelines corroded by longitudinally aligned defects. *Ocean Engineering*, 310(1), 118625. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118625>
- Hussain, M., Zhang, T., Chaudhry, M., Jamil, I., Kausar, S., Hussain, I. (2024). Review of Prediction of Stress Corrosion Cracking in Gas Pipelines Using Machine Learning. *Machines*, 12(1), 42. <https://doi.org/10.3390/machines12010042>
- Kakinuma, H., Muto, I., Oya, Y., Momii, T., Sugawara, Y., Hara, Y. (2021). Morphological Change and Open-circuit Potential of Single Metastable Pit on AA1050 Aluminum in NaCl Solution. *J. Electrochem. Soc.*, 168, 021504. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abdee9>
- Kaya, F., Solmaz, R., Geçibesler, İ.H. (2023). The use of methanol extract of Rheum Ribes (Işgın) flower as a natural and promising corrosion inhibitor for mild steel protection in 1 M HCl solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 122, 102-117. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.02.013>

- Kiourtsidis, G.E., Skolianos, S.M., Pavlidou, E.G. (1999). A study on pitting behaviour of AA2024/SiC_p composites using the double cycle polarization technique. *Corrosion Science*, 41(6), 1185-1203. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00179-6)
- Kotni, T.R., Pandey, S., Shekhar, S., Ranjan, R., Srivastava, P.S. (2024). Corrosion of different metals/alloys in soil environment: A review. *Materials Today: Proceedings*, 102, 203-205. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.537>
- Liu, C., Liu, Y., Xia, Z., Wang, Z., Wu, B. (2024). Coconut coir dust extract as a novel green corrosion inhibitor for carbon steel in the chloride-contaminated concrete pore solution. *Journal of Building Engineering*, 82, 108194. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108194>
- Ma, Y., Zhang, H., Gao, Y., Men, Z., He, L., Cao, J. (2022). Failure analysis of a natural gas transmission X60 steel pipeline. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 69(6), 620-628. <https://doi.org/10.1108/ACMM-03-2022-2618>
- May, Z., Alam, M. K., Nayan, N. A. (2022). Recent Advances in Nondestructive Method and Assessment of Corrosion Undercoating in Carbon–Steel Pipelines. *Sensors*, 22(17), 6654. <https://doi.org/10.3390/s22176654>
- Orhan, A. and Çek, N. (2024). Investigation of the Corrosion Behavior of Titanium Against Peat Corrosion. *International Conference on Advanced Materials Science & Engineering and High Tech Devices Applications*, id 71, Turkey.
- Qin, F. and Cheng Y.F. (2021). A review on defect assessment of pipelines: Principles, numerical solutions, and applications. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191, 104329. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104329>
- Qin, P., Chen, L.Y., Zhao, C.H., Liu, Y.J., Cao, C.D., Sun, H., Zhang, L.C. (2021). Corrosion behavior and mechanism of selective laser melted Ti35Nb alloy produced using pre-alloyed and mixed powder in Hank's solution. *Corrosion Science*, 189, 109609. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104329>
- Palaniappan, N., Cole, I.S., Damodaran, K., Kuznetsov, A., Thomas, K.R.J., Balasubramanian K. (2020). Experimental and DFT studies of porous carbon covalently functionalized by polyaniline as a corrosion inhibition barrier on nickel-based alloys in acidic media. *RSC Adv.*, 10, 12151-12165. <https://doi.org/10.1039/D0RA00593B>
- Radojković, B., Pejić, J., Marunčić, D., Simović, A., Pantović, E.S., Jegdić, B., Bajat, J. (2023). Corrosion of metal parts in the power plant. *Materials and Corrosion*, 74(10), 1499-1513. <https://doi.org/10.1002/maco.202313919>
- Radovanović, M.B., Tasić, Ž.Z., Mihajlović, M.B.P., Simonović, A.T., Antonijević, M.M. (2019). Electrochemical and DFT studies of brass corrosion inhibition in 3% NaCl in the presence of environmentally friendly compounds. *Sci Rep*, 9, 16081. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52635-2>
- Sarwar, U., Mokhtar, A.A., Muhammad, M., Wassan R.K., Soomro, A.A., Wassan, M.A., Kaka, S. (2024). Enhancing pipeline integrity: a comprehensive review of deep learning-enabled finite element analysis for stress corrosion cracking prediction. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 18(1), 2302906. <https://doi.org/10.1080/19942060.2024.2302906>
- Sfikas, A.K. and Lekatou, A.G. (2020). Electrochemical Behavior of Al–Al₉Co₂ Alloys in Sulfuric Acid. *Corrosion and Materials Degradation*, 1(2), 249-272. <https://doi.org/10.3390/cmd1020012>
- Shuai, Y., Wang, X.-H., Cheng, Y.F. (2020). Modeling of local buckling of corroded X80 gas pipeline under axial compression loading. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81, 103472. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103472>
- Singh, J. and Shahi, A.S. (2022). Microstructure and corrosion behavior of duplex stainless steel electron beam welded joint. *J Mater Sci*, 57, 9454-9479. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07241-5>
- Soomro, A.A., Mokhtar, A.A., Kurnia, J.C., Lashari, N., Lu, H., Sambo, C. (2022). Integrity assessment of corroded oil and gas pipelines using machine learning: A systematic review. *Engineering Failure Analysis*, 131, 105810. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105810>
- Thurairajah, A., Saad, B., Williams, R., Fernando, V., Seid-Karbasi, M. (2022). Integrity Management Considerations for Pipes in Peat Muskeg and Organic Rich Soils. In: 14th International Pipeline Conference, Alberta, IPC2022-86987. <https://doi.org/10.1115/IPC2022-86987>

- Udowo, V.M., Yan, M., Liu, F., Ikeuba, A.I. (2024). Role of Fe oxide in the underdeposit corrosion of pipeline steel in oilfield produced water containing SRB. *Materials and Corrosion*, 75(1), 118-129. <https://doi.org/10.1002/maco.202313869>
- Wang, Y., Zhang, S., Fang, X., Liu, Y., Song, Q., Gan, T., Dong, L. (2025). Effect of metro-induced pipe-to-soil potential fluctuations on corrosion behavior of X80 steel in a simulated soil solution. *Engineering Failure Analysis*, 169, 109209. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109209>
- Wang, L., Zhao, X., Wang, X., Shang, S., Xiu, Z., Xi, Y., Jia, H., Xu, S., Liu, H., Wen, L., Xiao, X., Liu, R., & Ji, J. (2024). Current Status Review of Corrosion Resistance Applications of Titanium Alloys in the Petroleum Industry. *Coatings*, 14(8), 941. <https://doi.org/10.3390/coatings14080941>
- Xiao, Y., Lin, B., Tang, J., Zheng, H., Wang, Y., Zhang, H., Kuang, Y., Sun, X. (2024). Effect of elastic tensile stress on the pitting corrosion mechanism and passive film of 2205 duplex stainless steel. *Electrochimica Acta*, 477, 143765. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.143765>
- Xiong, Y., Radhakrishnan, J., Huang, S., Chua, Y., Shi, W., Ramamurty, U. (2024). Corrosion and stress corrosion cracking resistances of the 17-4 precipitation hardened martensitic stainless steel additively manufactured using binder jet printing. *Acta Materialia*, 281, 120417. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120417>
- Yang, Y., Xiao, C., Yang, Y., Liang, B. (2022). Research on the reliability of X70 steel gas pipelines under SRB main control factors. *Materials and Corrosion*, 73(5), 687-702. <https://doi.org/10.1002/maco.202112790>