

Asidik Toprak Örneğindeki Titanyumun Elektrokimyasal Tekniklerle Korozyon Özelliklerinin Araştırılması

Investigation of Corrosion Properties of Titanium in Acidic Soil Sample Using Electrochemical Techniques

Ayhan ORHAN¹ , Nurettin ÇEK*^{2,3} 

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

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

³ OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye.

Öz

Dünya kara yüzeyinin %5 ila %8'inin kaplayan ve sulak alanların yaklaşık %60'ında bulunan asidik toprak türü örneği olan turba (torf) malzemelerin metallerdeki korozyonu çoğunlukla çeliklerde araştırılmıştır. Ancak, sürekli önemi artan titanyum esaslı malzemelerde oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, torf çözeltisindeki titanyumun korozyonu; açık devre potansiyeli, potansiyodinamik kutuplaşma ve Tafel ekstrapolasyonu yöntemleri kullanılarak elektrokimyasal korozyon davranışları açısından araştırılmıştır. Açık devre potansiyeli, titanyumun yüzeyinde koruyucu film oluşması nedeniyle korozyona karşı direnç sağladığını göstermiştir. Potansiyodinamik kutuplaşma, titanyumun çukurlaşma korozyonuna karşı dirençli olduğunu göstererek hidrojen evrim tepkimesi ve oksijen indirgeme tepkimesi varlığını düşündürmüştür. Tafel ekstrapolasyonuna göre korozyon hızı $7,14 \times 10^{-7}$ mpy değerindedir. Bu, çeşitli titanyum alaşımlarının hidroklorik asit ve %3,5 sodyum klorür (NaCl) çözeltilerindeki korozyon hızlarına kıyasla çok düşük bir oran olduğundan torf çözeltisindeki titanyumun korozyona karşı daha dirençli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yeraltı boru hatlarındaki ve ekskavatör kazıcılarındaki/kesicilerindeki çeliklerde turba korozyonuna karşı yeni bir yaklaşım olarak titanyumun ciddi vaat sunduğuna inanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Korozyon, titanyum, turba çözeltisi, potansiyodinamik kutuplaşma, Tafel ekstrapolasyonu

Abstract

The corrosion of peat (peat) materials, which is an example of an acidic soil type covering 5% to 8% of the world's land surface and found in approximately 60% of wetlands, has been mostly investigated in steels. However, it is quite limited in titanium-based materials, which are constantly gaining importance. In this study, the corrosion of titanium in peat solution was investigated in terms of electrochemical corrosion behavior using open circuit potential, potentiodynamic polarization and Tafel extrapolation methods. Open circuit potential showed that titanium resists corrosion due to the formation of a protective film on its surface. Potentiodynamic polarization showed that titanium is resistant to pitting corrosion, suggesting the presence of hydrogen evolution reaction and oxygen reduction reaction. According to Tafel extrapolation, the corrosion rate is 7.14×10^{-7} mpy. This is a very low rate compared to the corrosion rates of various titanium alloys in hydrochloric acid and 3.5% sodium chloride (NaCl) solutions, indicating that titanium in peat solution is more resistant to corrosion. Therefore, titanium is believed to offer serious promise as a new approach against peat corrosion in steels in underground pipelines and excavator diggers/cutters

Keywords: Corrosion, titanium, peat solution, potentiodynamic polarization, Tafel extrapolation

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): nurettincek001@gmail.com

Geliş Tarihi (Received):20.02.2025, Kabul Tarihi (Accepted): 30.06.2025

1. Giriş

Çevre ve ekonomik açıdan bir yıkım olan korozyon, Latince “Corrodere” teriminden türemiş olup “kemirmek” anlamına gelir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD) merkezli Ulusal Korozyon Mühendisleri Derneği (NACE), korozyonu, yakın çevrelere maruz kaldığında kimyasal ve elektrokimyasal tepkimeler yoluyla metalleri ve metal alaşımlarını bozan doğal bir olay olarak tanımlamaktadır. Korozyon, dünya çapında meydana gelen ekonomik ve kültürel kayıplara büyük katkıda bulunan bir etken olarak kabul edilir ve NACE tarafından 2016 yılında sağlanan istatistiklere göre, korozyondan kaynaklanan küresel maliyet yıllık yaklaşık 2.5 trilyon ABD doları olarak gerçekleşmiştir. Bu, 2013 yılında dünya Gayri Safi Yurtiçi Hasılasının (GSYİH’sinin) yaklaşık %3.4’ü olarak tahmin edilmiştir [1]. Üstelik, bu konudaki önemli ekonomik kayıplar, GSYİH açısından dünyanın en büyük ekonomilerini ciddi şekilde etkilemiştir. Buna örnek olarak; Rusya’nın GSYİH’sinin %4’ü, Çin’in GSYİH’sinin %4.2’si ve Amerika Birleşik Devletleri’nin GSYİH’sinin %2.7’si korozyon nedeniyle israf olmuştur. Dahası, korozyon nedeniyle çevreye toksik aşındırıcı ürünler salınması atmosfer üzerinde zararlı etkiler ortaya çıkmaktadır. Korozyona bağlı kayıpların giderek artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle korozyonu teşhis etmeye ve önlemeye yönelik stratejiler geliştirmeye yönelik araştırmalar önem taşımaktadır [1,2].

Metal korozyonunun mühendislik, ekonomik ve sosyolojik bir konu olarak ele alındığı uygulama alanlarından birisi de toprakta meydana gelen korozyondur. Örneğin; çoğunlukla metal malzemelerden imal edilen su boru hatları, petrol boru hatları ve doğalgaz boru hatları gibi yer altı boru hatları toprağın metaller üzerindeki korozyonunun günlük hayattaki önemli göstergeleridir. Toprak korozyonundan dolayı yer altı boru hatlarında meydana gelen arızalar, yüksek bakım maliyetleri gibi önemli ekonomik kayıplara yol açmakla sınırla kalmayıp petrol ve gaz tankları ile boru hatlarının arızalanması nedeniyle çevresel hasar da meydana getirebilmektedir. Bu da biyosfer içinde toksisiteye yol açabilir. Bu nedenle, altyapıyı ve çevresel sürdürülebilirliği geliştirmek için toprak (yer altı) korozyonunun anlaşılması esastır [3]. Toprak ortamında gömülü boru hattı korozyonu, boru hattı hizmeti için başlıca zorlu bir sorundur. Toprak ortamı farklı bölgelerde değişiklik göstererek toprak içerisindeki boru hattı malzemesinde farklı tipte korozyon olaylarına neden olur [4].

Yeraltı boru hatları ve diğer alanlarda toprağın korozyonunu araştıran çalışmalarda genellikle killi ve bataklık toprak türleri araştırılmıştır. Killi topraklar ve gelgit bataklıkları gibi zayıf drenajlı, bozulmuş, düşük rakımlardaki topraklarda toprak büzülmesi meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak büyük bir diferansiyel havalandırma oluşturan ve elektrik iletkenliğini arttıran tuzların birikmesi sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu da bu ortamlarda ciddi bir şekilde korozyon meydana getirmiştir [5]. Toprakların boru hatlarına korozyonunun uzun vadeli verilerle araştırıldığı bir çalışmada; Newcastle, Sidney ve Perth şehirlerindeki çeşitli topraklar içerisinde yerleştirilen ve 129 yıla kadar hizmet ettikten sonra çıkarılan dökme demir borularla doğrudan temas halinde olan toprakların neden olduğu korozyon araştırılmıştır. Araştırmanın sonuçları, 129 yıl toprak altında gömülü olan dökme demir borularda yerel çukur korozyonunun mevcut olduğunu göstermiş ve bu korozyon türünün mümkün olabilmesi için toprağın yeterince ıslak olması gerektiği vurgulanmıştır [6]. Tınlı toprak türlerinde boru hattı korozyonunun makine öğrenmesinin veri analizi ve bilgi madenciliği uygulamalarıyla test edildiği çalışmanın sonuçları, bu toprak türlerinin boru hatları üzerinde ciddi seviyelere kadar korozyona sebep olduğunu ifade etmektedir [7]. Çin’in başkenti Pekin’deki 101 coğrafi konumdan kazılarak laboratuvara getirilen, çoğunlukla kil ve kum içeren tınlı toprak örneklerinin korozyon etkisinin ele alındığı çalışmada Q235 çeliğinin korozyon davranışı araştırıldı. Söz konusu çalışma, Pekin’de düşük karbonlu çeliğin korozyonunu değerlendirmek için basit bir yöntem sunmuş olup deneylerde kullanılan toprak örneklerinin Q235 çeliği üzerinde korozyon etkisi yaptığını ortaya koymuştur [8]. Yapılan bir başka çalışmada, Meksika’nın Veracruz Eyaletinden ve Oaxaca Eyaletinden alınan ve genel olarak kil, silt ve kum içerikli toprak örneklerinin X52 ve X60 boru hattı çeliklerinin genelleştirilmiş ve lokalize korozyon hızı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmanın sonuçlarına göre toprak türüne bağlı olarak her çeliğin korozyona dayanıklılık davranışının farklı olduğu ortaya çıkmıştır [9]. Boru hattı çeliği türlerinden birisi olan S235JR karbon çeliğinin siltli tınlı toprak olarak sınıflandırılan toprak (ağırlıkça %83 ince kum, ağırlıkça %14.5 kaolinit ve ağırlıkça %2.5 kısmen çürümüş bitki örtüsü ve organik maddeden oluşan turba)

ortamındaki korozyon davranışının araştırılmıştır. Söz konusu çalışma, S235JR karbon çeliğinin önemli oranda korozyona maruz kaldığını ortaya koymuştur [10]. Literatürden anlaşılacağı üzere, yeraltı boru hattı malzemesi olarak genellikle çelik malzemeler kullanılmaktadır. Genel olarak, çelik borular karbon bazlı kimyasal bileşimlerdeki farka göre üç gruba ayrılırlar. Bunlar çoğunlukla; düşük karbonlu (%0,2'nin altında karbon), orta karbonlu (%0.2 ila %0.5 karbon) ve yüksek karbonlu (%0,5'in üzerinde karbon) olarak sınıflandırılırlar. Yumuşak çelik borular, %0.2'nin altında karbon içerdiğinden düşük karbonlu çelik türüdür. Bu malzeme, özellikle, düşük maliyet ve imalat kolaylığı sağladığı için soğutma kulesi tankları, boru hatlarının imalatı olmak üzere çeşitli endüstrilerde ve su dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yumuşak çelik borular dökme demirden daha güçlü ve daha sünek olmasına rağmen son derece aşındırıcı (korozif) topraklarda dökme (sünek) demire kıyasla daha düşük korozyon direncine sahiptir. Buna rağmen, yumuşak çelik boru maliyeti sünek demir borulara kıyasla daha düşüktür ve kaynaklı bağlantıları, yüksek basınçlı boru olarak kullanımı ve esneklik sağlaması gibi birçok fayda sunmaktadır [11].

Metaller üzerinde toprak türlerinin korozyonunun farklı olduğu anlaşılmasına rağmen özellikle de yeraltı boru hatlarında kullanılan malzemelerin çelik malzemeler olması nedeniyle korozyon çalışmaları ağırlıklı çelik malzemelerde gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, önceki çalışmalarda [5-10] görüleceği üzere killi, bataklık, kumlu, tınlı, silt topraklar kullanılarak çelik malzemelerin korozyon davranışları araştırılmış olmasına rağmen dünya kara alanının önemli bir kısmında mevcudiyeti olan torf topraklarının korozyon çalışmaları oldukça sınırlıdır.

Torf toprakları, organik ve doğal toprak örneklerinden birisi olup anaerobik ve asidik karakterli bir yapıya sahiptir [12]. Torf toprakları arktik, boreal, ılıman ve tropikal bölgelerde bulunabilir [13]. Dünyanın çeşitli yerlerinde mevcut olan bataklıklar, turbalıklar, tuz bataklıkları gibi alanlarda görülen torf toprağı kısmen ayrılmış bitki biyokütlesinin birikmesiyle oluşur. Torf toprakları, karasal ve sucul ekosistemler arasında geçiş ortamları olup temel hidrolojik, ekolojik ve biyojeokimyasal işlevler sağlamaktadırlar [14]. Normal koşullar altında torf topraklarının, yüksek asitliğe, yüksek organik madde içeriğine ve düşük düşük besin içeriğine sahip olduğu ifade edilmiştir. Torf topraklarının morfolojik yapısı su hareketini kolaylaştıran makro gözeneklerin baskınlığı ile karakterize edilmiştir [15]. Üstelik, torf topraklarının küresel olarak tüm tatlı suyun yaklaşık %10'unu ve karasal organik karbonun %30'unu depoladığı bildirilmiştir [14,16]. Ayrıca, dünya kara yüzeyinin %5 ila %8'inin torf topraklarından oluştuğu ifade edilmektedir. Dahası, dünyadaki sulak alanların yaklaşık %60'unda turba topraklarının varlığından söz edilmektedir [17]. Turba topraklarının önemi günden güne artmaktadır. Bunun örneklerinden bir tanesi, turba topraklarının karbon depolama özelliği nedeniyle atmosferik sera gazı konsantrasyonlarını dengelemeye yönelik Danimarka'nın Kyoto protokolü çerçevesinde turba topraklarının envanterlerini oluşturmaya kararlı olmasıdır [18]. Karbon emicileri korumaya ve sera gazı emisyonlarını azaltmaya odaklanan çeşitli uluslararası sözleşmeler ve politikalar, turba topraklarının iklim değişikliğine karşı doğa temelli önemli bir çözüm olduğunu vurgulamıştır [19]. Turba topraklarının, karbon tutucusu olarak görev yaparak iklim değişikliğini daha da kötüleştirebilecek çeşitli karbon kaynaklarının olumsuz etkilerinin hafifletilmesi açısından son derece önemli bir doğal malzeme olduğu vurgulanmaktadır. Bu nedenle, küresel turbalıkların ve bunların dinamiklerinin modellenmesi, kara yüzeyi ve dünya sistemi modellemesi için çalışmalar artmıştır [20]. Bozulmamış torf topraklarının oluşturduğu alanların dünyanın en değerli ekosistemleri arasında olduğu karbonu hapsetmek ve iklim değişikliğini azaltmak için kritik öneme sahip olduğu [21] bilgisi dikkate alındığında torf topraklarının metaller üzerindeki korozyonu da bir o kadar değerli bir konu haline gelmektedir.

Torf topraklarının metaller üzerindeki korozyonu ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Yapılan bir çalışmada, AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çeliklerin distile su kullanılarak hazırlanan torf çözeltileri içerisinde elektrokimyasal korozyon çalışmaları; galvanik korozyon, kutuplaşma eğrisi ve korozyon hızı açısından araştırıldı. Araştırmanın sonuçları, her iki çelik türü için torf toprağının korozyon etkisine sahip olduğunu ortaya koymuştur [22]. Yapılan başka bir çalışmada, torf topraklarının çıkarılması işlemi için kullanılan ekskavator kazıcı/kesici takım çeliğinin korozyona uğradığı ve bu nedenle de kesici takımın

malzemesinin seçimine ek gereksinimler getirdiği bildirilmiştir [23]. Torf toprağı içerisinde bulunan X70 boru hattı çeliğinin korozyon davranışı hakkında fikir edinmek amacıyla; taramalı elektron mikroskopu-enerji dağılım spektroskopisi, X-Işını kırınım yöntemi ve Raman Spektroskopisi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların sonuçları, X70 boru hattının dış yüzeyinde çeşitli demir bileşiği fazlarından oluşan mikro oksit tabakası oluşumu anlaşılmış olup bu korozyon ürünü olarak tanıtılmıştır. Söz konusu tabakanın, asidik toprak parçacıklarının metal yüzeyle etkileşimi sonucu oluşan kimyasal adsorpsiyon ve fiziksel adsorpsiyon süreçleri sonucunda oluşabileceğini gösterilmiştir [24]. Önceki çalışmaların çoğunda [22-24], torf toprağının korozyon etkisi sadece çelik metali esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Son zamanlarda, torf toprağının çelik dışındaki metaller üzerindeki korozyon davranışının araştırılmasını amaç edinen çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, torf toprağında saf titanyum metalinin korozyon davranışı elektrokimyasal empedans spektroskopisi yöntemiyle araştırılmıştır. Çalışmaların sonuçları, titanyumun torf çözeltisinde iyi korozyon direnci gösterdiğini ortaya koymuştur ve korozyon saldırısına karşı yer altı boru hatları için titanyum malzemenin çelikten daha uygun olduğunu ortaya koymuştur [25,26]. Ancak, sadece bir korozyon yönteminin çalışılmış olması, titanyumun torf ortamındaki korozyon davranışını anlamak için yapılan çalışmaların yetersiz olmasına neden olmuştur. Bu sebeple, titanyum metalinin torf içerisindeki korozyon davranışının daha detaylı ele alınması gerekliliği halen devam etmektedir.

Bu çalışmada, titanyum metalinin korozyon davranışını önceki çalışmalara göre daha ileri seviyeye taşımak amacıyla torf çözeltisi hazırlanmış ve bu çözeltide saf titanyumun korozyon davranışı; açık devre potansiyeli, potansiyodinamik kutuplaşma ve Tafel ekstrapolasyonu yöntemi kullanılarak araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metod

2.1. Malzeme

Saf (%99.9) titanyum tel (Shanghaimetal (Çin)), torf toprağı (Fidanistanbul, Türkiye), distile su (Onur 1 Kimya, Ankara), cam kap (50 x 50 x 50 mm), hassas terazi (Weightlab WL-603), potansiyostat/galvanostat (İvium Vertex.1A, Hollanda) cihazı, gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) referans elektrot (BASi, ABD) ve platin yardımcı elektrot (BASi, ABD), mekanik karıştırıcı (Weightlab WF-OD20).

2.2. Yöntem

Numune hazırlama, deneyler ve korozyon testleri oda sıcaklığı koşullarında yapılmıştır. Önceki çalışmalarla [25,26] uyumlu olması ve doğru karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla numune hazırlama aşamasında, torf toprağı ve distile su ağırlıkça 1:1 oranında karışım yapılarak torf toprağı çözeltisi hazırlandı. Bunun için hassas terazide torf toprağı 50.00 gram ve distile su 50.00 gram olarak tartıldı. Çözelti 15 dakika boyunca bir karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra iyi bir karışım görünümüne sahip olması maksadıyla 1 gün boyunca kapalı cam kap içerisinde bekletildi. Çözeltinin tekdüze çamur görünümüne geldiği görüldükten sonra korozyon deneyleri çalışması başlatıldı. Deneyler dört kez tekrarlanmış olup sonuçlar dört tekrarın toplamının aritmetik ortalamasını içerecek şekilde verilmiştir. Sonuçlar arasında %5 mühendislik hata payı olduğundan standart sapmaların verilmesine gerek görülmemiştir.

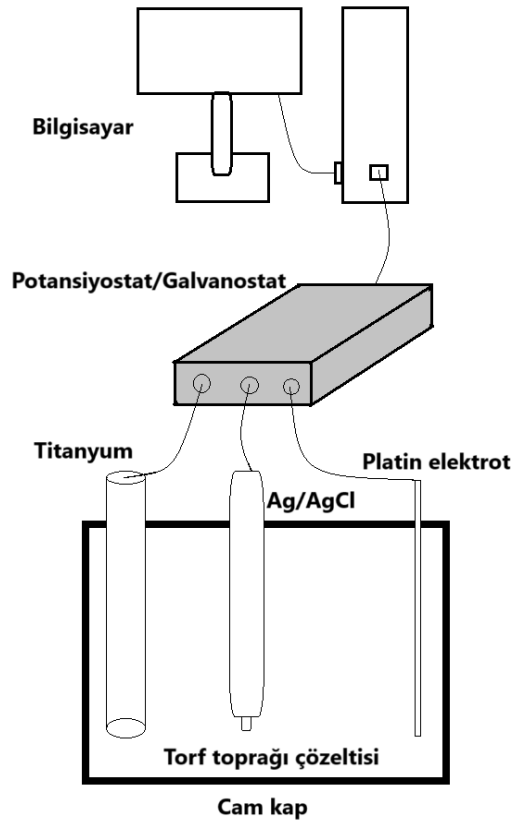
ASTM G59-97 standartına uygun olarak korozyon deneyleri için üç elektrotlu bir elektrokimyasal hücreden oluşan test düzeneği oluşturulmuştur [27]. Bu düzenek; titanyum çalışma elektrotu, platin yardımcı elektrot ve Ag/AgCl referans elektrotu içermektedir. Deneysel verilerin kontrolü için kişisel bir bilgisayara sahip bir potansiyostat/galvanostat cihazı, elektrokimyasal korozyon ölçümlerini elde etmek için kullanıldı [28]. Korozyon deneylerinin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Korozyon deneyleri için açık devre potansiyeli gözlemi, potansiyodinamik kutuplaşma testi ve Tafel ekstrapolasyonu yöntemi kullanılmıştır [29].

Açık devre potansiyeli (ADP), sıfır akım altında çalışma elektrodu ile referans elektrodu arasındaki voltaj farkı olarak tanımlanır. Deneylerin güvenilirliğini sağlamak için, üç elektrotlu elektrokimyasal hücre

oluşturulduktan sonra 1 gün boyunca açık devre potansiyeli (ADP) koşullarında titanyum çalışma elektrotunun torf toprağı çözeltisi ortamında ADP ölçümü her saniyede bir kaydedilmiş ve ADP-zaman eğrisi ortaya çıkarılmıştır [30]. Stabil ADP değeri görüldükten sonra potansiyodinamik kutuplaşma testlerine geçildi.

Potansiyodinamik kutuplaşma testi, 1 mV/sn tarama hızıyla ve ADP değerine göre ± 250 mV potansiyel aralığında akım yoğunluğunun kaydedilmesiyle gerçekleştirildi [31]. Bu test tamamlandıktan sonra, stabil ADP değerine gelinceye kadar beklendi ve stabil ADP değeri sağlandıktan sonra Tafel ekstrapolasyonu yöntemi ile test aşamasına geçildi.

Tafel ekstrapolasyonu yöntemi kullanılarak yapılan testler, 1 mV/sn tarama hızıyla ve ADP değerine göre ± 250 mV potansiyel aralığında akım yoğunluğunun kaydedilmesiyle gerçekleştirildi [32].



Şekil 1. Korozyon deneylerin şematik gösterimi

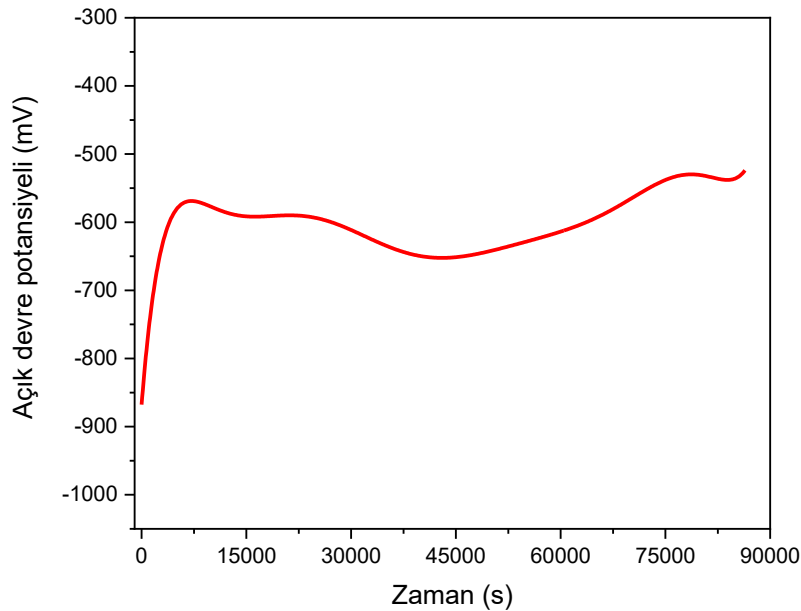
3. Bulgular ve Tartışma

Torf çözeltisi ortamındaki titanyumun korozyon davranışı hakkında fikir edinmek amacıyla yapılan korozyon deneylerinin ilk aşaması olan ADP ölçümü başarıyla gerçekleştirilmiştir. Torf çözeltisindeki titanyum malzemenin ADP değeri Şekil 1’de sunulmuştur. Başlangıç zamanlarında, ADP negatif potansiyel sergilemiştir. Başlangıçta, -875 mV olan ADP yaklaşık ilk 7500 saniye boyunca negatif yönden pozitif yöne doğru kayarak yaklaşık -570 mV seviyelerine ulaşmıştır. Zaman ilerledikçe, ADP değeri daha asil (pozitif) değerlere doğru kayması (korozyon potansiyelinin artışının itici gücü) torf toprağı çözeltisindeki titanyum çalışma elektrotunun yüzeyinde bir koruyucu pasif filmin oluşumuna atfedilmektedir [33]. Yaklaşık 7500 saniye ile 15000 saniye arasında ADP değeri negatif yöne kaymıştır. Bunun sebebi; bu zaman dilimlerinde torf çözeltisi içerisindeki titanyum çalışma elektrotunun yüzeyindeki koruyucu pasif filmin bozulması olarak açıklanmıştır [34]. Yaklaşık 15000 ile 22500 saniye arasında görülen kararlı gidişat titanyum yüzeyinde oksit tabakasının kırılma-yeniden oluşma döngülerinin tekrarlayan süreçlerinin olmadığını ve oksit filmin bozulmadan mevcudiyetini koruduğunu göstermektedir. Yaklaşık 22500 ile 45000 saniye aralığında çarpıcı bir potansiyel düşüşü meydana

gelmiştir. Bu, titanyum yüzeyindeki pasif film tabakasının kırılma/bozulma sürecini göstermektedir [35]. 45000 saniyeden yaklaşık 78000 saniyeye kadar ki süreçte ADP pozitif yönde kayarak potansiyel değerinde bir artış gösterdi. ADP'nin pozitif yönde değişimi, titanyumun torf çözeltisinde bulunduğu süreçte kimyasal olarak koruyucu tabaka olan titanyum oksidin hızlı bir şekilde yeniden oluşmasına atfedilmektedir [36]. Bir başka deyişle, bu sonuç, torf çözeltisindeki titanyum çalışma elektrotu yüzeyinde kendiliğinden titanyum oksit geri kazanımı anlamına gelmektedir [34]. 78000 saniye civarında yaklaşık -550 mV seviyelerine ulaşan ADP yaklaşık 83000 saniyeye geldikçe küçük bir değişiklik ile negatif yönde kayarak -565 mV seviyelerine gelmiştir. Burada, titanyum yüzeyindeki koruyucu pasif film tabakasında bozulmalar meydana geldiği düşünülmektedir. 83000 saniyeden deneylerin bitime kadar ADP tekrar pozitif yönde kayarak yaklaşık -550 mV seviyelerine ulaşmış ve burada kararlı bir şekilde kalmıştır. Bu durum hakkında, 83000 saniyeden itibaren titanyum yüzeyinde bozulmalar meydana gelen koruyucu pasif film tabakasında bozulan kısımların tekrar oluştuğu düşünülmektedir. ADP değerinin kararlı durumu, torf çözeltisi ve titanyum çalışma elektrotu arasında arayüzey olarak nitelendirilebilecek pasif koruma filmi sayesinde bu arayüze olan difüzyon riskinin azaltılabileceğini ve daha iyi korozyon koruması sağlayabileceğini göstermiştir [37].

ADP ölçümü yapılarak malzemenin korozyon potansiyeli karakterize edebilmektedir. ADP değeri ne kadar yüksekse malzeme o kadar korozyona dirençlidir. Bu çalışmadaki ADP ölçümü, sıfır akım yoğunluğuna karşılık gelen elektrot potansiyelinden, yani yük olmadan titanyum çalışma elektrotu ile Ag/AgCl referans elektrotu arasındaki potansiyel farkından oluşmaktadır [37]. Bu nedenle, titanyumun torf çözeltisinde korozyon olasılığını ölçmek ve belirlemek uygun bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

Kısacası, Torf çözeltisindeki saf titanyumun ADP değerinin zamanla artmış olması başlangıca göre üstün bir korozyon direncine işaret eder. Bu davranış, değişik miktarlarda florür iyonları içeren sülfürik asit çözeltilerindeki saf titanyum ve titanyum alaşımlarının ADP davranışları ile benzerlik göstermektedir [38].

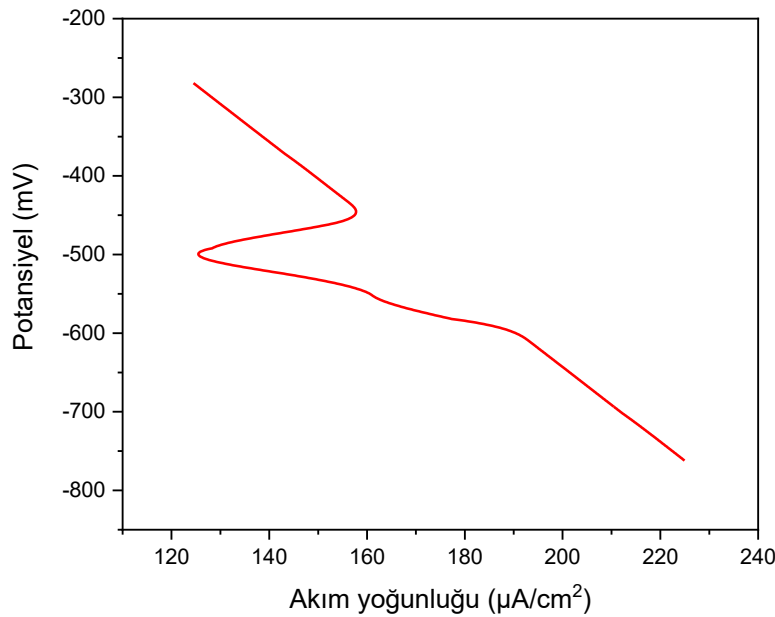


Şekil 2. Torf çözeltisi ortamında titanyumun zamana göre ADP eğrisi

Potansiyodinamik kutuplaşma testi, korozyon potansiyeli (E_{korr}) ile kutuplaşma akım yoğunluğu (I_{korr}) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu ilişki sayesinde torf çözeltisi içerisinde bulunan titanyum çalışma elektrotunda meydana gelen korozyonun temel mekanizmasının ortaya çıkarılması için kullanılmıştır [37]. Torf çözeltisindeki titanyum çalışma elektrotunun potansiyodinamik kutuplaşma testi Şekil 3'te verilmiştir. Bu test sonuçlarına göre, E_{korr} -451 mV, I_{korr} 160 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür. Akım yoğunluğu, titanyum çalışma elektrotundan sağlanan akım değerinin elektrot geometrik yüzey alanına bölünmesiyle belirlenmiştir. Potansiyel değeri, E_{korr} değerinden daha asil (pozitif) olduğunda I_{korr}

değerlerinin de daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Potansiyel değeri, E_{korr} değerinden daha negatif yönde olduğunda I_{korr} değerleri arttığı görülmektedir. Torf çözeltisindeki titanyumun pasif davranış gösterdiği görülmektedir. Bunun, değişik miktarlarda florür iyonları içeren sülfürik asit çözeltilerindeki saf titanyum ve titanyum alaşımlarının potansiyodinamik kutuplaşma çalışmaları ile benzer olması literatür ile uyumluluk sağlaması açısından önemli bir bulgudur [38].

Potansiyel değerinin E_{korr} değerinden daha asil yönde olduğu durumlar için torf çözeltisinde titanyumun çukurlaşma korozyonuna karşı direnç gösterdiği söylenebilir [39]. E_{korr} değerinden daha pozitif yöne doğru olan bölgeyi ifade eden anodik dalda akım yoğunluğu değerleri, korozyon tepkimesinin düzgün bir şekilde ilerlediğini kritik pasifleşme akımı olan bir akım platosuna ulaşana kadar istikrarlı bir şekilde ilerlediğini göstermiştir. E_{korr} değerinden daha negatif yöne doğru olan bölgeyi ifade eden katodik dalda akım yoğunluğunun artışının hidrojen evrim tepkimesi ve oksijen indirgeme tepkimesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [40]. Bunlar, torf çözeltisi içerisindeki titanyumda korozyon süreçlerinin meydana geldiğinin birer göstergeleridir. Korozyon süreçleri her metalik malzemede görülen bir durum olduğundan bu normal karşılanabilecek bir durumdur.



Şekil 3. Torf çözeltisi ortamında titanyumun potansiyodinamik kutuplaşma eğrisi

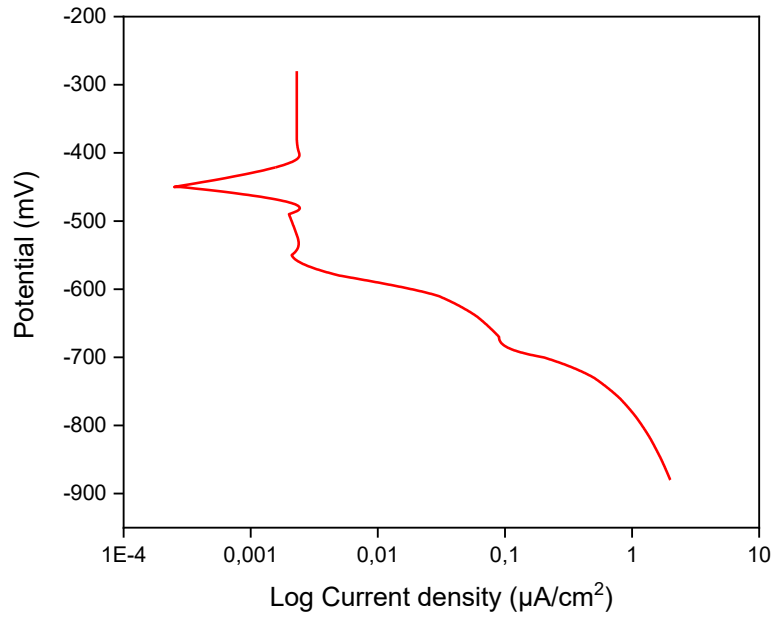
Tafel ekstrapolasyonu yöntemi kullanılarak yapılan testler vasıtasıyla torf çözeltisindeki titanyumun korozyon potansiyeli, akım yoğunluğu, korozyon hızı gibi elektrokimyasal korozyonu gösteren kinetik özellikleri tahmin etmek mümkün olmuştur. Şekil 4, titanyumun turba çözeltisindeki Tafel ekstrapolasyonu yöntemi ile elde edilen grafiği sunmaktadır. Burada, E_{korr} değerinin yaklaşık olarak -680 mV olduğu ve I_{korr} değerinin yaklaşık $6.25 \times 10^{-3} \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olduğu bulunmuştur. Bu çalışmadaki E_{korr} değeri, bir titanyum alaşımı türü olan Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alaşımının 5 M hidroklorik asit çözeltisindeki E_{korr} değerlerinden 25 ila 130 mV daha pozitif değerlerdedir. Üstelik, I_{korr} değeri, 1 M ve 5 M hidroklorik asit çözeltilerindeki Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alaşımının I_{korr} değerlerinden oldukça düşüktür. Torf çözeltisindeki titanyumun hidroklorik asitteki titanyum alaşımlarına kıyasla daha pozitif yönde bir korozyon potansiyeli ve çok daha düşük korozyon akım yoğunluğu göstermesi daha yavaş bir korozyon oranını ve daha iyi korozyon direncini gösterir [41].

Tafel verilerine dayanarak, korozyon hızı denklem (1)'de verilen ASTM G102-89 standart denkleminde göre hesaplandı. Burada, I_{korr} korozyon akım yoğunluğudur ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), EW eşdeğer ağırlıktır (kütle değişimi (g)), ρ metalin yoğunluğudur (g/cm^3) ve K1, Faraday denklemindeki korozyon hızı birimlerinin sabiti olan 0,1288'dir (mpy.g/ $\mu\text{A}.\text{cm}$). Deneylerin başından sonuna kadar olan elektrokimyasal süreçler

nedeniyle titanyumun 4 mg kütle kaybı verdiği hassas terazi ile ölçüm yapılarak görülmüştür. Sonuç olarak, korozyon hızı (KH) mpy (yılıda mili inç) olarak elde edilmektedir [42].

$$KH = K_1 \frac{I_{korr}}{\rho} EW \quad (1)$$

Tafel ekstrapolasyonu yöntemi kullanılarak yapılan testlerden elde edilen veriler denklem (1)'e uygulandığında torf ortamında titanyumun korozyon hızı yaklaşık olarak 7.14×10^{-7} mpy olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Torf çözeltisi ortamında titanyumun Tafel eğrisi

Titanyumun turba çözeltisindeki elektrokimyasal korozyonuna dair kinetik özelliklerin yer aldığı bir çalışmaya rastlanılmadığı için bu çalışmada elde edilen bulgular, metal alaşımları için daldırma korozyon testini açıklayan ASTM G44 standardı esas alınarak yapılan çalışmalarla karşılaştırıldı. Bu kapsamda, ağırlıkça %3.5 NaCl çözeltisi içeren ortamdaki titanyum ve alaşımlarının korozyon hızları ile turba ortamındaki korozyon hızı Çizelge 1’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1. Farklı ortamlarda, titanyum malzemelerin korozyon hızlarının karşılaştırılması

Malzeme	Çözelti	KH (mpy) $\times 10^{-7}$	Kaynak
Saf Ti	%3.5 NaCl	1103000	[43].
Saf Ti	Torf çözeltisi	7,14	Bu çalışma
Ti+5Ni	%3.5 NaCl	400400	[43].
Ti+5Ni+5TiB ₂	%3.5 NaCl	390700	[43].
Ti+5Ni+10TiB ₂	%3.5 NaCl	4242000	[43].
Ti+5Ni+15TiB ₂	%3.5 NaCl	2295000	[43].
Ti+5Ni+20TiB ₂	%3.5 NaCl	41500	[43].

Torf ortamına maruz kalan titanyumun %3,5 NaCl çözeltisine kıyasla daha etkili bir pasifleşme özelliği gösterdiği anlaşılmıştır. Bu nedenle titanyumun turba ortamında pasifleşme veya yavaş çözünme geçirdiği düşünülmekte ve böylece yüksek korozyon direncine sahip bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Başka bir deyişle, titanyum malzemenin turba ortamına maruz kaldığında zamanla minimum korozyon ve bozulma yaşadığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, titanyumun %3.5’luk NaCl çözeltisinde bozulmaya daha yatkın olduğu ortaya çıkmıştır.

4. Sonuç ve Öneriler

Saf titanyumun torf çözeltisi ortamındaki korozyon davranışını kapsamlı bir şekilde anlamak için ADP, potansiyodinamik kutuplaşma ve Tafel ekstrapolasyonu gibi elektrokimyasal testler yapılarak araştırılmıştır. Torf çözeltisindeki titanyumun ADP değerinin artması veya başka bir deyişle pozitif yöne kayması titanyumun kendiliğinden pasifleşme davranışına karşılık gelen kararlı bir oksit filminin oluşumunu ima etmektedir. ADP'nin negatif yöne kayması titanyum yüzeyindeki oksit filmin çözünmesi ile ilişkilendirilmektedir. Potansiyodinamik kutuplaşma testi, torf çözeltisi içerisindeki titanyumun çukurlaşma korozyonuna karşı direnç gösterdiğini gösterse de hidrojen evrim tepkimesi ve oksijen indirgeme tepkimesinin mevcudiyeti düşünüldüğünde burada korozyon süreçlerinin ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Tafel ekstrapolasyonu yöntemi aracılığıyla torf çözeltisindeki titanyumun elektrokimyasal korozyonu hakkında fikir yürütülmüştür. Torf çözeltisindeki titanyum, asidik bir ortam olan hidroklorik asitteki titanyum alaşımlarına göre daha iyi korozyon direnci sağlamıştır. Dahası, torf ortamındaki titanyum ağırlıkça %3.5 NaCl çözeltisi içeren ortamdaki titanyum ve alaşımlarına göre çok daha düşük korozyon hızı göstermesi, titanyumun turba ortamında pasifleşme veya yavaş çözünme geçirdiğini düşündürmüştür. Netice itibarıyla torf ortamında titanyum korozyona uğramaktadır lakin düşük korozyon hızları nedeniyle yüksek korozyon direncine sahip bir malzeme olarak davranmıştır. Bu sonuçlar, yeraltı boru hattı uygulamaları için titanyum malzemenin uygun olduğunu göstermekle birlikte çelik türü malzemeye yeni bir seçenek olabileceği konusunda umut vermiştir. Ayrıca, bu çalışma, torf topraklarının çıkarılması işlemi için kullanılan ekskavatör kazıcı/kesici takım çeliğinin korozyona uğradığı gerçeği dikkate alındığında titanyum esaslı yeni alaşım veya kompozit malzemelerin tasarlanması sonucunda torf korozyonuna dirençli ekskavatör kazıcı/kesici malzemelerinin üretilmesi konusunda ciddi fikirler sağlamaktadır.

Titanyumun torf ortamındaki korozyon davranışı hakkındaki tüm bilgilerin ortaya çıkarılması için tüm test/analiz aşamalarının tamamlanması gerektiği gerçeği göz önünde bulundurulduğunda galvanik korozyon başta olmak üzere literatürdeki diğer korozyon testlerinin yapılması ve literatüre kazandırılması önerilmektedir. İlaveten, yer altı boru hatlarında ve ekskavatör kazıcı/kesici uygulamalarında torf başta olmak üzere diğer toprak türlerinin titanyumun korozyon davranışlarının araştırılması ve sonuçların kıyaslanması tavsiye edilmektedir.

Teşekkür

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

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

Katkı Beyanı

A.O.: çalışmayı planlamış ve tasarlamıştır, N.Ç.: Çalışma hakkında verileri toplamış ve analiz etmiştir, A.O. ve N.Ç.: Çalışmanın deneylerini ve analizlerini yaparak makaleyi yazmışlardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalenin yazarları, çalışma kapsamında herhangi bir kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını bildirmektedirler.

Kaynaklar

- [1] Sheetal, Kundu S, Thakur S, Singh AK, Singh M, Pani B, Saj VS. A Review of Electrochemical Techniques for Corrosion Monitoring - Fundamentals and Research Updates. *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 2025;55(1):161-186.
- [2] Solovyeva VA, Almuhammadi KH, Badeghaish WO. Current Downhole Corrosion Control Solutions and Trends in the Oil and Gas Industry: A Review. *Materials*. 2023; 16(5):1795.
- [3] Azoor RM, Deo RN, Biribilis N, Kodikara J. On the optimum soil moisture for underground corrosion in different soil types. *Corrosion Science* 2019;159:108116.
- [4] Liu W, Bi W, Hu Y, Lu W, Feng W, Wang Y, Li Y, Liu J. Influence of initial pH and sulfate-reducing bacteria concentration on the microbiologically influenced corrosion of buried pipeline steel. *Materials and Corrosion* 2024;75(9):1193-1203.
- [5] Liu H, Dai Y, Cheng YF. Corrosion of underground pipelines in clay soil with varied soil layer thicknesses and aerations. *Arabian Journal of Chemistry* 2020;13(2):3601-3614.
- [6] Petersen RB, Wells T, Melchers RE. Development of long-term localised corrosion of cast iron pipes in backfill soils based on time of wetness. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 2020;55(7):550-561.
- [7] Zhao Z, Chen M, Fan H, Zhang N. Data Analysis and Knowledge Mining of Machine Learning in Soil Corrosion Factors of the Pipeline Safety. *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022;2022:9523878.
- [8] Yin Z, Wang S, Zhu Z, Gu S, Ma S, Du Y, Jiang S. Key parameters of soil corrosivity and a model for predicting the corrosion rate of Q235 steel in Beijing. *Chinese Journal of Engineering* 2023;45(11):1939-1947.
- [9] Contreras A, Quej LM, Sosa E, Liu HB, Alamilla JL. Corrosion rate of low carbon steels in function of physicochemical properties of soils. *MRS Advances* 2021;6:825-829.
- [10] Akkouche R, Rémaizeilles C, Jeannin M, Barbalat M, Refait P. Corrosion of carbon steel in artificial soil: Processes occurring during wet/dry transitions studied with a multi-coupon electrode. *Electrochimica Acta* 2023;462:142745.
- [11] Jones LJN, Kong D, Tan BT, Rassiah P. Non-Revenue Water in Malaysia: Influence of Water Distribution Pipe Types. *Sustainability* 2021;13(4):2310.
- [12] Erensoy A, Mulayim S, Orhan A, Çek N, Tuna A, Ak N. The system design of the peat-based microbial fuel cell as a new renewable energy source: The potential and limitations. *Alexandria Engineering Journal* 2022;61(11):8743-8750.
- [13] Minasny B, Berglund Ö, Connolly J, Hedley C, de Vries F, Gimona A, Kempen B, Kidd D, Lilja H, Malone B, McBratney A, Roudier P, O'Rourke S, Rudiyanto, Padarian J, Poggio L, ten Caten A, Thompson D, Tuve C, Widyatmanti W. Digital mapping of peatlands - A critical review. *Earth-Science Reviews* 2019;196:102870.
- [14] Rezanezhad F, Price JS, Quinton WL, Lennartz B, Milojevic T, Cappellen PV. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists. *Chemical Geology* 2016;429: 75-84.
- [15] Kunarso A, Bonner MTL, Blanch EW, Grover S. Differences in Tropical Peat Soil Physical and Chemical Properties Under Different Land Uses: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Soil Sci Plant Nutr* 2022;22:4063-4083.
- [16] Singh S, Kiran BR, Mohan V. Carbon farming: a circular framework to augment CO₂ sinks and to combat climate change. *Environ. Sci.: Adv.* 2024;3:522-542.
- [17] Huat BBK, Kazemian S, Prasad A, Barghchi M. State of an art review of peat: General perspective. *International Journal of the Physical Sciences* 2011;6(8):1988-1996.
- [18] Greve MH, Christensen OF, Greve MB, Kheir RB. Change in Peat Coverage in Danish Cultivated Soils During the Past 35 Years. *Soil Science* 2014;179(5):250-257.
- [19] Lourenco M, Fitchett JM, Woodborne S. Peat definitions: A critical review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 2022;47(4):506-520.
- [20] Chadburn SE, Burke EJ, Gallego-Sala AV, Smith ND, Bret-Harte MS, Charman DJ, Drewer J, Edgar CW, Euskirchen ES, Fortuniak K, Gao Y, Nakhavali M, Pawlak W, Schuur EAG, Westermann S. A new approach to simulate peat accumulation, degradation and stability in a global land surface scheme (JULES vn5.8_accumulate_soil) for northern and temperate peatlands. *Geoscientific Model Development* 2022;15(4): 1633-1657.
- [21] Ma L, Zhu G, Chen B., Zhang K, Niu S, Wang J, Ciais P, Zuo H. A globally robust relationship between water table decline, subsidence rate, and carbon release from peatlands. *Commun Earth Environ* 2022;3:254.
- [22] Leitch G. The Study of Corrosion and the Investigation of Peat Contamination in Steel. Master thesis, University of Strathclyde, United Kingdom, 2015.

- [23] Mikhailov AV, Korolyov IA, Lopatiuk AO. Corrosion Stability of Cutting Tool's Material for Exploitation of Peat Deposits. *Procedia Engineering* 2017;206:668-675.
- [24] Jafery KM, Embong Z, Othman NK, Yaakob N, Shah M, Hashim NZN. Initial stage of corrosion formation for X70 pipeline external surface in acidic soil (peat) environment. *Materials Today: Proceedings* 2022;51:1381-1387.
- [25] Orhan A, Çek N. Investigation of the Corrosion Behavior of Titanium Against Peat Corrosion. In: *International Conference on Advanced Materials Science & Engineering and High Tech Devices Applications*, Ankara, Türkiye, 2024.
- [26] Orhan A, Çek N. Turba Ortamında Titanyumun Korozyonunun Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi ile İncelenmesi. *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 2025;37:467-474.
- [27] AbdElRhieem E, Barakat YF, Abdelaziz SM, Mostafa MM, Nada RH, Mohamed SG. Corrosion suppression and strengthening of the Al-10Zn alloy by adding silica nanorods. *Sci Rep* 2024;14:15644.
- [28] Quej Ake LM, Chacha Coto J, Vázquez Segovia BE, Zavala Ku AJ, Delgado Quej JA. Corrosion Rate Evaluations of Bent Steel Bars Immersed in Sand Soils Used in Concrete Reinforcement. *Surf. Engin. Appl. Electrochem* 2022;58:693-707.
- [29] Setiawan AR, Fausia PIU, Jannah M, Ramelan A. Unveiling the Combined Effects of Soil Acidity and Ammonium Sulfate on the Corrosion Behavior of X60 Steel Pipelines in Indonesian Regions. *Trans Indian Inst Met* 2025;78:30.
- [30] Ye H, Tu Z, Li S. Electrochemical performance of metal nitride coated titanium bipolar plate for proton exchange membrane water electrolyser. *Journal of Power Sources* 2024, 595, 234052.
- [31] Vrsalović L, Gudić S, Perčić N, Gojić M, Ivanić I, Kožuh S, Nagode A., Kosec B, Electrochemical behaviour of CuAlMn alloy in the presence of chloride and sulphate ions, *Applied Surface Science Advances* 2023;13:100380.
- [32] Talkhan AG, Benamor A, Nasser MS. Corrosion Study of Carbon Steel in CO₂ Loaded Amine/Amino Acid Solutions-Case of Mixtures of NMethyldiethanolamine and L-Arginine. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2018;164:012028.
- [33] Medgyes B, Gharaibeh A, Harsányi G, Pécz B, Felhősi I. Electrochemical corrosion and electrochemical migration characteristics of SAC-1Bi-xMn solder alloys in NaCl solution. *Corrosion Science* 2023;213:110965.
- [34] Ryu JJ, Cudjoe E, Patel MV, Caputo M. Sliding Corrosion Fatigue of Metallic Joint Implants: A Comparative Study of CoCrMo and Ti6Al4V in Simulated Synovial Environments. *Lubricants* 2022;10(4):65.
- [35] Shi B, Xu J, Zou J, Li YR, Zhou Z, Liu K, Jia Q, Jiang HB. Advances in amelioration of plasma electrolytic oxidation coatings on biodegradable magnesium and alloys. *Heliyon* 2024;10(4): e24348.
- [36] Gnanavelbabu A, Vinothkumar E, Ross NS, Rai R, Kuntoğlu M. Investigating the influence of NaCl concentration on the electrochemical corrosion behavior of metal oxide reinforced magnesium matrix composites. *Archiv.Civ.Mech.Eng* 2023;23:113.
- [37] Tian J, Li C, Xian G. A layered superhydrophobic coating with excellent mechanical robustness and anti-corrosion performances. *Journal of Materials Research and Technology* 2022;21:4281-4298.
- [38] Liu X, Qin Y, Sun Y, Zheng Z, Zhang Y, Wang Z. Nickel-bipyridine-benzoic acid ternary complex: A new corrosion inhibitor for carbon steel in acidic medium. *J Solid State Electrochem* 2024;28:2283-2300.
- [39] Son I, Nakano H, Oue S, Kobayashi S, Fukushima H, Horita Z. Effect of Equal-Channel Angular Pressing on Pitting Corrosion of Pure Aluminum. *International Journal of Corrosion* 2012;2012: 450854.
- [40] Zhou H, Chhin D, Morel A, Gallant D, Mauzeroll J. Potentiodynamic polarization curves of AA7075 at high scan rates interpreted using the high field model. *npj Mater Degrad* 2022;6:20.
- [41] Wu H., Wang L, Wang Y, Tian H, Xin Y, Hou J, Cui Z. Comparative study of the corrosion behavior of base metal and welded joint of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy in the acidic chloride environment. *Corrosion Science* 2025;244:112649.
- [42] Wang C-J, Kusdiyarto P, Li Y-H. Potentiodynamic polarization analysis with various corrosion inhibitors on A508/IN-182/IN-52M/308L/316L welds. *Kuwait Journal of Science* 202;51(2):100202.
- [43] Jayaraj J, Ranjith PM, Ningshen S, Ramanathan S. Studies on Corrosion of Titanium and Air-Oxidized Titanium in Fluorinated Nitric Acid. *Trans Indian Inst Met*, 2019;72:1917-1926.