



Ray Bağlantı Elemanlarının Deneysel ve Yapay Zekâ Destekli Korozyon Direncinin İncelenmesi

Mustafa DURSUNLAR^{*1}, Zakir TAŞ²

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Yozgat, Türkiye

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

*mustafa.dursunlar@yobu.edu.tr

(Alınış/Received: 10.11.2024, Kabul/Accepted: 17.12.2024, Yayımlama/Published: 31.01.2025)

Öz: Gezegimizdeki küresel iklim değişikliği son yıllarda olumsuz etkilerini iyice hissettirmeye başlamıştır. Bu durum atmosfer koşullarını değiştirmekte ve mühendislik yapıları için tehdit oluşturmaktadır. Ağır iklim ve atmosfer koşulları altında işletilen demiryolları için özellikle ray bağlantı elemanlarının mekanik özellikleri yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada HM tipi ray-travers bağlantısındaki 38Si7 kimyasal bileşime sahip SKL14 gergi kısıkaçının EN ISO 9227 standardında deneysel olarak yapay atmosferde tuz püskürtme korozyon testleri yapılmıştır. Test sonuçlarında ilk pas 0,5 saat ve tamamen pas 1 saatte gözlemlenmiştir. 1 saat sonundaki ağırlık kaybı 0,0137 g olarak ölçülmüştür. Korozyon hızı 0,000749 mm/yıl (0,749 µm/yıl) olarak hesaplanmıştır. Deneysel korozyon verileriyle yapay zekâ destekli makine öğrenmesi yardımıyla tahmin modelleri oluşturulmuştur. Sonuç olarak kaplamasız gergi kısıkaçlarının korozyon performansının demiryolu standartları ve kullanımı için uygun olup olmadığı hem deneysel hem de yapay zekâ destekli olarak açıklanmıştır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, 38Si7, SKL, Gergi Kısıkaçı, Korozyon, Yapay Zekâ

Experimental and Artificial Intelligence Supported Investigation of Corrosion Resistance of Rail Fasteners

Abstract: Global climate change on our planet has started to make its negative effects felt in recent years. This situation changes atmospheric conditions and poses a threat to engineering structures. For railways operated under severe climatic and atmospheric conditions, especially the mechanical properties of rail fasteners are insufficient. In this study, experimental artificial atmosphere salt spray corrosion tests of SKL14 tension clamp with 38Si7 chemical composition in HM type rail-traverse connection were carried out in accordance with EN ISO 9227 standard. In the test results, the first rust was observed in 0.5 hours and the complete rust was observed in 1 hour. Weight loss at the end of 1 hour was measured as 0.0137 g. The corrosion rate was calculated as 0.000749 mm/y (0.749 µm/y). With experimental corrosion data, predictive models were created with the help of artificial intelligence supported machine learning. As a result, the corrosion performance of uncoated tension clamps is explained both experimentally and with artificial intelligence support whether they are suitable for railway standards and use.

Keywords: Railway System, 38Si7, SKL, Tension Clip, Corrosion, Artificial Intelligence

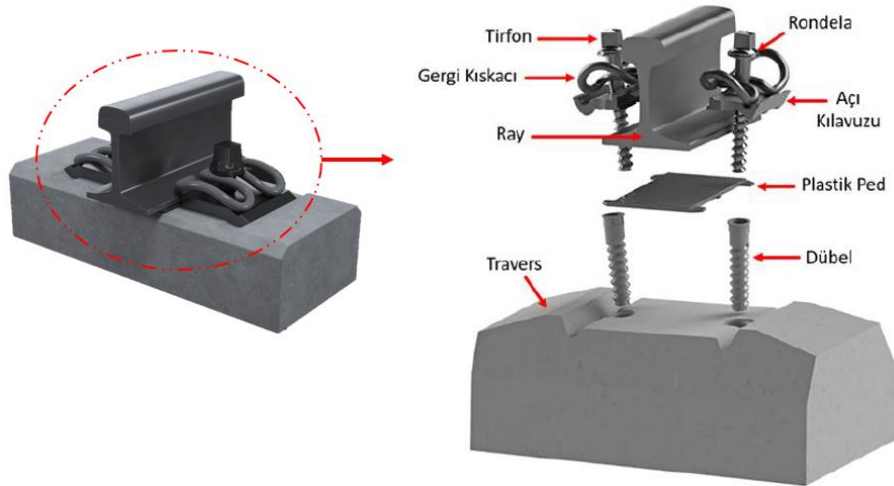
1. Giriş

Son yıllarda nötr karbon, küresel iklim değişikliği ve sürdürülebilirlik stratejileri önemli bir hale gelmektedir. Bu amaçla karbon salınımlarının nötr veya en aza indirilmesi istenmektedir. Bu sayede küresel ısınmayla mücadele etkin ve verimli bir şekilde kararlılıkla sürdürülecektir [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]. Raylı sistemler endüstrisinde bu prensipler doğrultusunda önemli adımlar atılmaktadır. Özellikle son yıllarda ray bağlantı elemanlarından gergi kısıkaçlarının düşük karbon içeriğine sahip olması istenmektedir. Bu sayede demiryollarında kısmi olarak karbon tüketimi ve salınımı sınırlandırılacak olup, küresel ısınma ve küresel iklim değişikliğinde etkin rol

Atıf için/Cite as: M. Dursunlar, Z. Taş, "Ray bağlantı elemanlarının deneysel ve yapay zekâ destekli korozyon direncinin incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 21, ss. 83-95, Ocak 2025. doi: 10.47072/demiryolu.1582533

oynayacaktır [8], [9], [10], [11]. Gergi kısıkaçlarının düşük karbon oranına sahip olması hem Paris İklim Anlaşmasını desteklemekte hem de mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Gergi kısıkaçlarındaki düşük karbon oranı plastisitenin zayıflığını alarak tokluk ve yorulma ömrünü artırmaktadır. Bu sayede gergi kısıkaçlarının bakım, onarım, servis ve kullanım ömürleri artacaktır. Dolayısıyla raylı sistem işletmelerinin giderleri azalarak özellikle maddi açıdan katkı sağlayacaktır [12], [13], [14], [15].

Gergi kısıkaçları dünya üzerinde birçok kimyasal bileşime sahip olarak demir-çelik tesislerinde standart ve klasik kangal üretim prensipleri doğrultusunda imal edilmektedir [16]. Son yıllarda karbon salınımla mücadele kapsamında gergi kısıkaçlarının karbon içerikleri azaltılmaktadır. Bu kapsamda demiryollarında son yıllarda genellikle düşük karbon içeriğine sahip Alman standartlı 38Si7 kimyasal bileşime sahip gergi kısıkaçları imal edilerek kullanılmaktadır [17]. 38Si7 kimyasal bileşimli gergi kısıkaçları son yıllarda yüksek hızlı tren hatları, ağır taşımacılık, konvansiyonel ve kent içi raylı sistem hatlarında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [18]. Esasen yay çeliği olan gergi kısıkaçlarına mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla imalat esnasında dekarbürizasyon, ısıl işlem ve kaplama işlemleri yapılmaktadır [19], [20]. 38Si7 kimyasal bileşime sahip gergi kısıkaçları, HM tipi ray-travers bağlantısının bir elemanı olarak endüstri ve literatürde SKL olarak adlandırılmaktadır [21]. HM tipi bağlantı ve elemanlarına ait görsel Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. HM tipi bağlantı ve elemanları

Bu çalışmanın özgünlüğünü, literatürde gergi kısıkaçlarının korozyon performansı ile ilgili yetersiz çalışmanın olması desteklemektedir. Literatürdeki çalışmalar genellikle aşınma ve teorik yorulma üzerine yoğunlaşmaktadır. Dursunlar ve ark. [17] 38Si7 kimyasal bileşimli SKL14 gergi kısıkaçına akımsız Nikel-Bor kaplama yapmış ve aşınma direncini incelemiştir. Sonuç olarak yapılan kaplamanın altlık malzemenin aşınma direncini 15 kattan daha fazla artırdığını bildirmiştir. Dursunlar ve ark. [21] 38Si7 kimyasal bileşimli SKL14 gergi kısıkaçına akımsız Nikel-Bor kaplama yapmış ve ısıl işlem uygulamıştır. Sonuç olarak kaplamanın altlık malzemenin homojen kaplama kalınlığı eldesi, sertlik, aşınma ve korozyon direncini artırabileceğini rapor etmiştir. Yirmibeş ve ark. [22] 54SiCr6 ve 38Si7 yay çeliklerinin yorulma davranışına ısıl işlemin etkisini incelemiştir. Sonuç olarak 38Si7 kimyasal bileşimli yay çeliğinin yorulma dayanımının farklı ortam ve koşullar altında 54SiCr6 yay çeliğinden daha yüksek olduğunu kanıtlamıştır. Liu ve ark. [23] 38Si7 kimyasal bileşimli yay çeliğinde sıcak haddeleme sırasında yüzey dekarbürizasyonunun gelişimi ve termomekanik kontrol süreci ile kontrolünü incelemiştir. Sonuç olarak uygun sıcaklık ve deformasyon parametreleri kullanılarak yüzey dekarbürizasyonunun etkin bir şekilde kontrol edilebileceğini göstermektedir. Bu sayede sertlik ve mukavemet kaybının önüne geçilebileceğini rapor etmiştir. Zhang ve ark. [24] yüksek hızlı demiryolu bağlantı

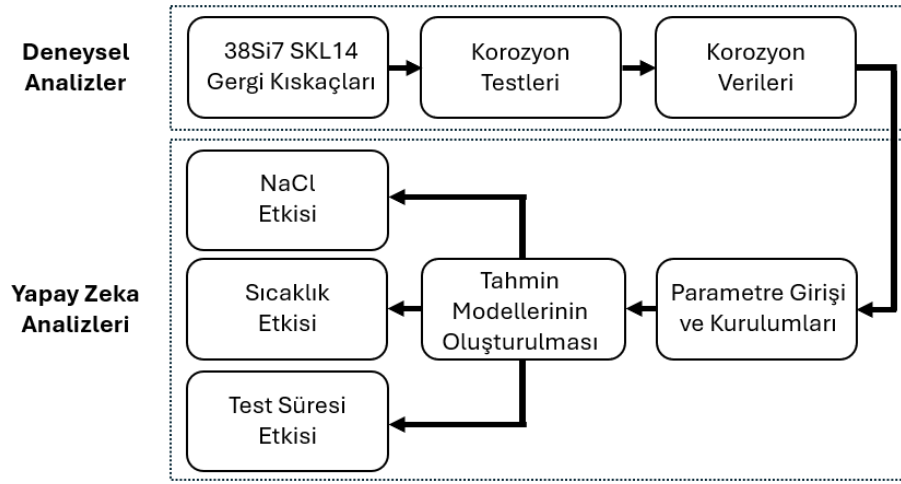
kısaçaları için dinamik titreşim sönümleyici tasarımı ve parametrelerin etkisini analiz etmiştir. Sonuç olarak uygun sönümleyici parametreleri kullanıldığında, bağlantı kısaçalarında oluşan titreşimlerin önemli ölçüde azaltılabileceğini kanıtlamıştır.

Bu çalışmanın amacı, 38Si7 kimyasal bileşime sahip SKL14 tipi gergi kısıkaçının korozyon performansının deneysel olarak incelenip, yapay zekâ destekli tahmin modellemelerinin oluşturulmasıdır. Bu sayede gergi kısıkaçlarının kaplamasız olarak ağır iklim koşulları altında kullanılıp kullanılmayacağı açıklanmaktadır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Metot

Bu çalışmadaki metodoloji iki aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki deneysel korozyon testleridir. İkincisi ise yapay zekâ testlerinden oluşmakta olup, birinci çalışmadan elde edilen verilerle makine öğrenmesi yardımıyla tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu çalışmadaki metodolojiyi özetleyen görsel Şekil 2’de sunulmuştur.



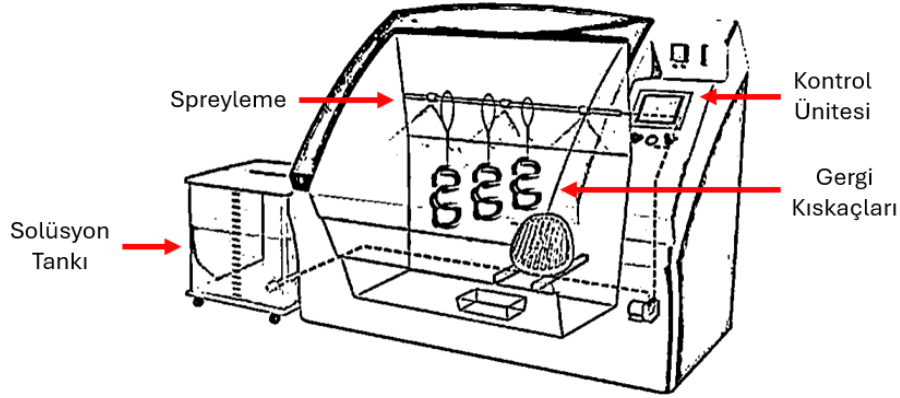
Şekil 2. Bu çalışmadaki metodoloji

2.2. Materyal

Bu çalışmada malzeme olarak Ø13mm çapında, 38Si7 kimyasal bileşime sahip, SKL14 tipi gergi kısıkaçı kullanılmıştır. Gergi kısıkaçları Gürmak Demiryolu’ndan temin edilmiş olup, aynı döküm ve imalat numarasına sahiptir. Korozyon testleri öncesinde gergi kısıkaçları 230µ ile kumlanmıştır. Gergi kısıkaçlarının kimyasal bileşiminde Karbon (C) %0,35-0,42, Silisyum (Si) %1,50-1,80, Mangan (Mn) %0,5-0,8, Fosfor (P) maksimum %0,025, Kükürt (S) maksimum %0,025 ve geri kalan kısmını Demir (Fe) içermektedir.

2.3. Korozyon testi ve karakterizasyon

Korozyon testleri, EN ISO 9227 standardında, %5 NaCl ortamı ve oda sıcaklığında, 720 saat test süresi ve demiryolu standartlarına uygun, yapay atmosferde tuz püskürtme testi olarak Gürmak Demiryolu’nda yapılmıştır. Korozyon test prosesi Şekil 3’te sunulmuştur. Korozyon testinin sonuçları ASTM D610-01 standardına göre yorumlanmıştır.



Şekil 3. Korozyon test prosesi

3. Bulgular

3.1. Ağırlık kaybı ve korozyon hızı analizi

Tablo 1, numunelerin test süresi, pas durumu ve ağırlık kayıplarını göstermektedir. Korozyon hızı, ağırlık kaybı yöntemiyle literatürde ve endüstride kullanıldığı üzere Denklem (1)'e göre hesaplanmıştır [25], [26]. Denklem (1) için verilenler, CR: Korozyon hızı (mm/yıl), k: Birim dönüştürme faktörü (sabit değer), W_L : Ağırlık kaybı ($W_L=W_0-W_1$ gram), ρ : Metal yoğunluğu (g/cm^3), A: Metal yüzey alanı (cm^2), t: Korozyon test süresini (saat) ifade etmektedir.

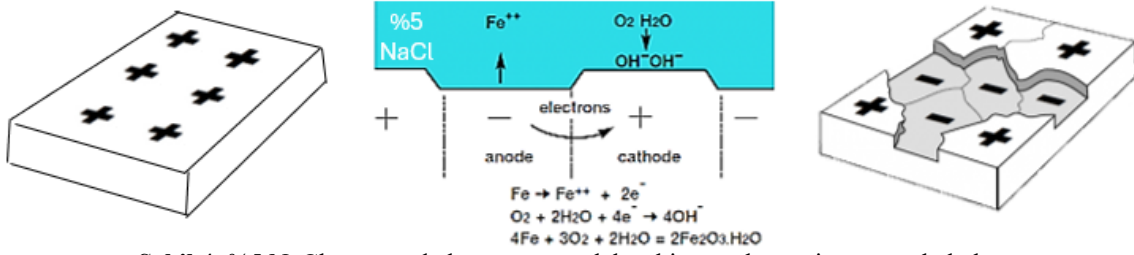
$$CR=(k \times W_L)/(\rho \times A \times t) \quad (1)$$

Tablo 1 incelendiğinde, hassas endüstriyel tartıda kaplamasız numunelerin test başlangıç ağırlığı 495,9 g, test sonrası ağırlığı 495,8813 g ve 1 saatlik testteki ağırlık kaybı ise 0,0137 g olarak ölçülmüştür. Denklem (1)'e göre korozyon hızı 0,000749 mm/yıl (0,749 $\mu m/yıl$) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 1. Ağırlık kaybı ve korozyon hızı

Numune	Test süresi (saat)	Pas durumu (%)	Başlangıç ağırlığı (W_0) (g)	Son ağırlık (W_1) (g)	Ağırlık kaybı (W_L) (g)	Korozyon hızı (mm/y), ($\mu m/y$)
38Si7 SKL14	1	100	495,9	495,8813	0,0137	0,000749 0,749

Korozyon testi sonucuna göre malzemenin ağırlık kaybı ve korozyon hızı çok fazladır. Literatürde bu durum genel olarak %5 NaCl ortamında korozyon süreci, malzemenin yüzeyinde oluşan oksit tabakaları ve bu tabakaların elektrokimyasal davranışları ile yakından ilişkilidir. Klorür iyonları (Cl^-), demirin pasifleşme tabakasını bozarak korozyonu daha da hızlandırmaktadır. Bu süreç, demirin yüzeyinde önce γ -FeOOH (gamma-demir oksit hidroksit) ve ardından Fe_3O_4 (demir oksit) tabakalarının ortaya çıkarmaktadır. Bu tabakalar, korozyon hücresinde katot olarak davranmaktadır. Katotlar, demirin normalden çok daha fazla ve hızlı bir şekilde çözünmesini artırmasıyla açıklanmaktadır [27], [28]. Korozyonun oldukça hızlı bir şekilde ilerleyip ağırlık kaybının fazla olması Şekil 4'te özetlenmiştir. Ağırlık kaybı ve korozyon hızı sonuçları, uygun koruma yöntemlerinin seçilmesini gerektiğini ve gergi kıskaçlarının kaplamasız kullanıma uygun olmadığını açıkça göstermektedir.



Şekil 4. %5 NaCl ortamında korozyonun elektrokimyasal süreci ve pas tabakaları

3.2. Pas yüzeyi analizi

Şekil 5, kaplamasız gergi kışkaçlarının başlangıç, ilk pas oluşumu ve tamamen pas oluşumuna ait 1 saatlik korozyon test sonuçlarını göstermektedir. Şekil 5 incelendiğinde, 0 saat için başlangıç pas türünde henüz paslanma yoktur. Dolayısıyla metal yüzeyi parlak ve pasif durumda, tuz püskürtme testine henüz maruz kalmamıştır. 0,5 saat (30 dakika sonrası) için pas türünün homojen korozyon ve pas oranının %33-50 arasında yüzeyin yaklaşık yarısı pasla kaplanmış olduğu gözlemlenmiştir. Bu aşamada oluşan pasın homojen bir şekilde yayıldığı ve genel korozyon türü gözlemlenmiştir. 1 saat içinde pas türünün ilerlemiş homojen korozyon olduğu ve çukur korozyonun başladığı, pas oranının ise %90'dan fazla olarak yüzeyin büyük kısmının pasla kaplanmış olduğu gözlemlenmiştir. 1 saatlik test sonunda, numunenin neredeyse tamamı yoğun bir pas tabakasıyla kaplanmıştır. Pasın hızlı yayılması, metalin koruyucu bir kaplamaya sahip olmadığı durumlarda çevresel koşullara karşı son derece hassas olduğuna işaret etmektedir. Yüzeydeki pas, agresif tuz püskürtme ortamında hızla oksitlenerek yaygın bir homojen korozyon oluşturmuştur. Ayrıca bu tür hızlı paslanma, metalin yapısal dayanıklılığını ciddi şekilde tehdit etmektedir. Ayrıca bu test sonuçları ve literatür, kaplamasız numunelerin zorlu çevresel koşullarda, özellikle klor iyonları gibi aşındırıcı maddelere maruz kaldığında hızla paslanmaya eğilimli olduğunu ve bu tür malzemelerin mutlaka daha etkin koruyucu bir kaplama ile kullanılmasını gerektiğini göstermektedir [29], [30].



Şekil 5. Gergi kıskacında yüzey korozyonunun saatlik gelişim aşamaları

3.3. Yapay zekâ analizleri

Yapay zekâ analizleri makine öğrenmesi yöntemiyle Python yardımıyla yapılmıştır. Deneysel korozyon verileri işlenerek veri setleri kurulmuş ve tahmin modelleri oluşturulmuştur. Tahmin modellerinde lineer ve polinomsal regresyon hesaplamaları yapılmıştır. Bu sayede yapay zekâ destekli tahmin modelleriyle olası deney parametrelerinin etkisi analiz edilmiştir.

Lineer ve polinomsal regresyon tahmin modelleri:

Lineer regresyon, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi modellemeye yönelik bir istatistiksel yöntemdir. Bu model, bir bağımsız değişkendirdeki değişimin bağımlı değişken üzerindeki etkisini bir doğru ile ifade etmektedir. Yani, iki değişken arasındaki ilişki Denklem (2) formülü ile tanımlanmaktadır. Burada b_0 sabit terim ve b_1 eğim katsayısıdır. Lineer regresyon, iki değişken arasındaki ilişkiyi öngörme, trend analizleri yapma ve veri setindeki doğrusal eğilimleri inceleme gibi amaçlar için kullanılmaktadır. Modelin varsayımlarına göre bağımsız değişkenlerdeki her bir birimlik artış, bağımlı değişkendirde sabit bir değişime yol açmaktadır [31], [32], [33].

$$y = b_0 + b_1x \quad (2)$$

Polinomsal regresyon, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri modellemek için kullanılan bir regresyon türüdür. Bu model, veriyi en iyi şekilde açıklayan bir polinom (örneğin ikinci veya üçüncü dereceden) ile ilişkilendirmektedir. Genel formülü Denklem (3) olan polinomsal regresyon, daha karmaşık veri setlerinde doğrusal modelin yetersiz kaldığı durumlarda tercih edilmektedir. Özellikle eğri çizgisel eğilimler gösteren veri setlerinde, bağımlı değişkenin bağımsız değişkene bağlı olarak ivmelenen veya yavaşlayan etkilerini yakalamakta etkilidir. Bu nedenle, çevresel faktörlerin etkisiyle değişim gösteren süreçlerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [33], [34], [35].

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n \quad (3)$$

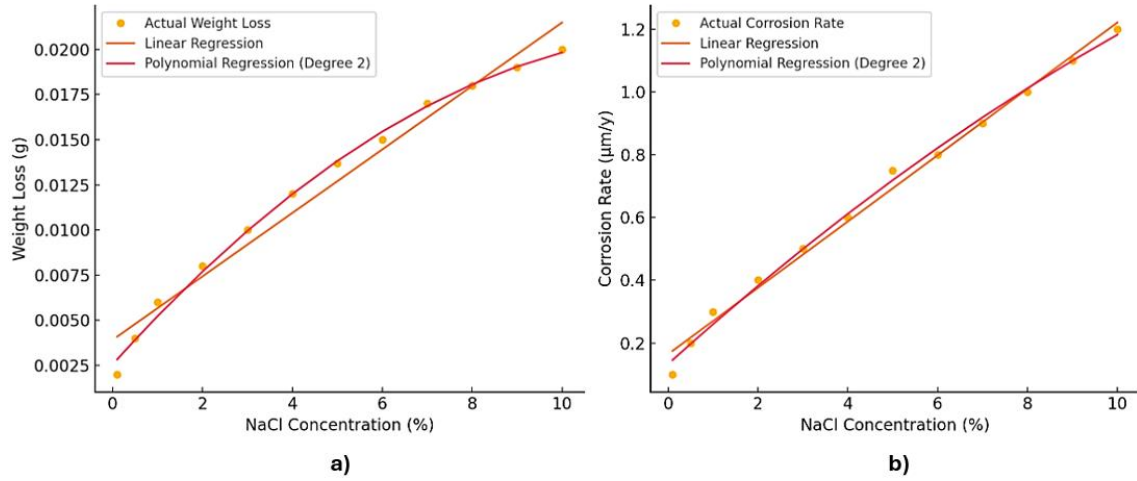
NaCl etkisi:

Şekil 6-a grafiğindeki lineer regresyon modeline göre, ağırlık kaybı ile NaCl konsantrasyonu arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılmıştır. Bu model, NaCl konsantrasyonu arttıkça ağırlık kaybının aynı oranda artacağını öngörmektedir. Lineer model, düşük NaCl konsantrasyonlarında makul bir uyum sağlamaktadır. Bu durum, düşük tuz oranlarında korozyon sürecinin daha sabit bir hızda gerçekleşebileceğine işaret edebilir. Polinomsal regresyon modeli, NaCl konsantrasyonu ile ağırlık kaybı arasındaki ilişkiyi doğrusal olmayan bir çerçevede inceleyerek daha karmaşık bir ilişki önermektedir. Polinomsal model, yüksek NaCl oranlarında ağırlık kaybının ivmeli bir şekilde arttığını göstermektedir. Ayrıca NaCl konsantrasyonu arttıkça yüzey reaksiyonlarının hızlandığını ve dolayısıyla korozyon ürünlerinin oluşum hızında artış yaşandığını göstermektedir. Bu durum, NaCl'nin oksitlenme reaksiyonları üzerinde katalitik bir etkiye sahip olabileceğini düşündürmektedir.

Şekil 6-b grafiğindeki lineer model, NaCl konsantrasyonunun korozyon hızı üzerindeki etkisini doğrusal bir ilişki olarak öngörmektedir. Bu model, korozyon hızının NaCl oranına bağlı olarak düzenli bir şekilde artacağını varsaymaktadır. Ancak bu basit ilişki, yüksek NaCl konsantrasyonlarında korozyon hızının tahmin edilmesi açısından sınırlı kalabilmektedir. Doğrusal modelin varsayımlarına göre, korozyon hızındaki artışın sabit bir oranda olacağı düşünülmektedir. Polinomsal regresyon modeli, NaCl konsantrasyonunun artmasıyla korozyon hızında ivmeli bir artış olduğunu öne sürmektedir. Bu eğilim, yüksek tuz konsantrasyonlarında daha yoğun bir korozyon sürecinin gerçekleşebileceğini düşündürmektedir. NaCl, elektrolitik

çözeltilerde iyonik iletkenliği artırarak korozyon hızını arttırabilir. Bu nedenle, polinomsal modelin sağladığı doğrusal olmayan yaklaşım, tuz konsantrasyonunun artışıyla korozyon hızındaki hızlanmayı daha gerçekçi bir şekilde yansıtmaktadır.

Sonuç olarak, NaCl konsantrasyonu arttıkça ağırlık kaybı ve korozyon hızında artış gözlemlenmektedir. Korozyon hızının artması, iyonik aktivitenin artışı ile ilişkilendirilmektedir. Bu gözlem, literatürdeki NaCl çözeltilisinin korozyon üzerindeki etkileri ile uyumludur. Abdul-Hamied ve ark. [36] tarafından yapılan çalışmada benzer şekilde NaCl konsantrasyonunun korozyon oranını artırdığı belirtilmiştir. Ağırlık kaybı ile NaCl konsantrasyonu ilişkisinde, Polinomsal regresyon yüksek NaCl oranlarında eğrinin ivmelendiğini daha iyi yakalamakta ve doğrulamaktadır. Korozyon hızı ile NaCl konsantrasyonu ilişkisinde, NaCl konsantrasyonu arttıkça korozyon hızında da artış görülmektedir. Polinomsal model, özellikle yüksek konsantrasyonlarda korozyon hızının artışını daha iyi ifade etmektedir. Model tahminlerindeki NaCl konsantrasyonu artışıyla ağırlık kaybı ve korozyon hızındaki artış hem yapay zekâ hem de literatür açısından desteklenmektedir [37].

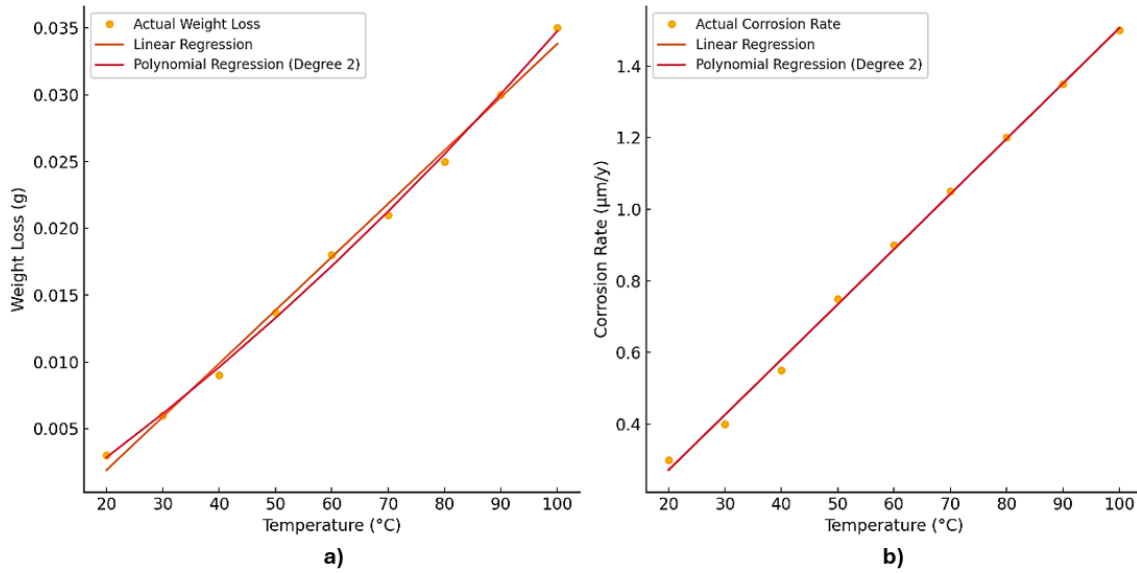


Şekil 6 grafiğindeki modeller karşılaştırıldığında, her iki modelin de birbirine karşı farklı avantajları vardır. Lineer model, basit ve anlaşılır bir ilişki öngörürken, yüksek tuz konsantrasyonlarındaki sapmaları göz ardı etmektedir. Polinomsal model, yüksek NaCl konsantrasyonlarındaki ağırlık kaybı ve korozyon hızındaki ivmeli artışı daha iyi yansıtarak, bu sürecin doğrusal olmadığını ortaya koymaktadır. Model seçimi analizinde, veriler polinomsal modele daha iyi uyum sağlamaktadır. Bu durum korozyon sürecinin karmaşık bir kinetik yapıya sahip olduğunu ve yüksek NaCl oranlarında doğrusal olmayan bir hızlanma gösterdiğini işaret etmektedir. Polinomsal regresyonun daha iyi uyum sağlaması, korozyon sürecinin başlangıçta daha yavaş bir hızda başlayıp, NaCl konsantrasyonu arttıkça hızlandığını ve bu hızın sabit olmadığını göstermektedir. Bu analizler, NaCl'nin pasif tabakaların çözünmesine ve elektrokimyasal reaksiyon hızlarının artmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Bu durum, NaCl'nin malzeme yüzeyindeki korozyon hızını nasıl etkilediğini ve tuz konsantrasyonlarının malzeme ömrü üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak açısından oldukça önemlidir.

Sıcaklığın etkisi:

Şekil 7-a grafiği sıcaklığın ağırlık kaybındaki ve Şekil 7-b grafiği sıcaklığın korozyon hızındaki etkisini göstermektedir. Lineer regresyon, sıcaklık ile korozyon hızı ve ağırlık kaybı arasındaki ilişkiyi doğrusal bir model ile incelemekte ve sıcaklığın etkisini basitçe yansıtmaktadır. Model, sıcaklık arttıkça korozyon hızının ve ağırlık kaybının düzenli bir artış gösterdiğini öngörmektedir.

Ancak, korozyon gibi kimyasal süreçlerde sıcaklık artışının genellikle doğrusal olmayan bir ivmeyle hızlanması beklenmektedir. Polinomsal model, sıcaklık arttıkça korozyon hızında ve ağırlık kaybında hızlanan bir artış olduğunu öne sürmektedir. Bu model, kimyasal reaksiyonların hızının Arrhenius yasasına uygun olarak sıcaklıkla hızlandığını yansıtmaktadır. Sıcaklık arttıkça malzeme yüzeyindeki koruyucu pasif tabakaların çözünmesi ve korozyon reaksiyonlarının hızlanması beklenmektedir. Sonuç olarak bu çalışmadaki model tahminleri ve literatürdeki çalışmalar, sıcaklık artışıyla beraber hem ağırlık kaybı hem de korozyon hızında artış gözlemlendiğini desteklemektedir [38], [39]. Bu durum, Arrhenius yasasında kimyasal reaksiyonların sıcaklıkların hızlanmasıyla açıklanmaktadır [40]. Polinomsal model, sıcaklık yükseldikçe korozyon hızının ivmelendiğini yansıtırken, lineer model basit bir artış öngörmektedir. Sıcaklık artışının ağırlık kaybı ve korozyon hızını doğrusal olarak artırdığı bu çalışmada gözlenmiştir. Literatürde sıcaklık artışı ile korozyon arasındaki bu ilişki, termal aktivasyon enerjisinin azalması ile açıklanmıştır. Omomeji ve ark. [41] çalışmasında sıcaklık ile korozyon oranındaki bu artış açıkça rapor edilmiştir.



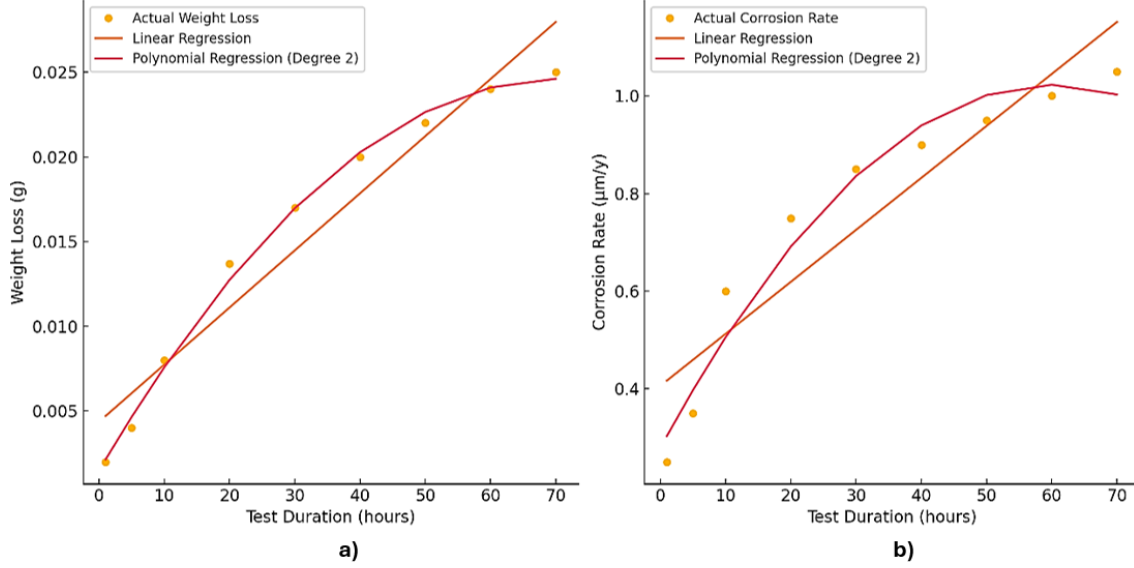
Şekil 7. Sıcaklığın etkisi a) ağırlık kaybına b) korozyon hızına

Şekil 7 grafiklerindeki modeller karşılaştırıldığında, sıcaklık ve süre değişimlerine verilen tepkinin doğrusal olmayan bir şekilde arttığını göz önünde bulunduran polinomsal model, korozyon sürecinin daha gerçekçi bir yansımasını sunmaktadır. Polinomsal model, sıcaklık ve süre arttıkça korozyonun hızlanacağını ancak belli bir süre sonra hızının azalabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, Polinomsal model sıcaklık yükseldikçe korozyon hızının ivmelendiğini yansıtırken, lineer model basit bir artış öngörmektedir.

Test süresinin etkisi:

Şekil 8-a grafiği test süresinin ağırlık kaybına ve Şekil 8-b grafiği test süresinin korozyon hızına etkisini göstermektedir. Lineer regresyon, test süresi ile ağırlık kaybı ve korozyon hızı arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak modellemek, her saat için eşit oranda korozyon ve ağırlık kaybı tahmininde bulunmaktadır. Ancak korozyonun başlangıçta hızlı olduğu, zamanla malzeme yüzeyinde oluşan koruyucu tabakalar nedeniyle hızının yavaşlayabileceği göz önüne alındığında, doğrusal model bu durumu yeterince yansıtmamaktadır. Polinomsal model, test süresine göre korozyon hızının ve ağırlık kaybının başlangıçta hızlı artarken, zamanla yavaşlayan bir eğilimde olduğunu göstermektedir. Bu model, korozyon sürecinde oluşan pasif tabakaların korozyon hızını yavaşlatabileceğini ve korozyonun zamanla stabil hale gelebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak tahmin modelleri ve literatürdeki çalışmalar, genel olarak test süresinin artmasıyla ağırlık

kaybının ve korozyon hızının artmasını beklemektedir [42], [43]. Ancak korozyon hızı belli bir süre sonunda sabitlenebilir veya yavaşlayabilmektedir. Test süresi uzadıkça korozyon hızının azalma eğilimi, korozyon ürünlerinin yüzeyde birikmesiyle açıklanmaktadır. Literatürde bu durum, Danyliak ve ark. [44] düşük karbonlu çeliklerde benzer davranışlar gözlediği çalışmasında desteklenmektedir.



Şekil 8. Test süresinin etkisi a) ağırlık kaybına b) korozyon hızına

Şekil 8 grafiklerindeki modeller karşılaştırıldığında, test süresi arttıkça korozyon hızı ve ağırlık kaybı başlangıçta hızlı bir artış gösterip, sonra yavaşlamaktadır. Polinomsal model bu değişimi daha iyi yakalayarak zamanla korozyon hızındaki yavaşlamayı gösterirken, lineer model süre boyunca sabit bir hız artışı varsaymaktadır. Polinomsal regresyon modelinin üstünlüğü ve yüksek doğruluğu, özellikle yüksek NaCl konsantrasyonlarında ve uzun test sürelerinde literatürdeki Pai ve ark. [45] deneysel çalışması tarafından desteklenmektedir. Sonuç olarak NaCl konsantrasyonu, sıcaklık ve test süresi gibi parametrelerin etkisi farklı modellerle analiz edilmiş, polinomsal regresyonun bu süreçleri daha doğru modelleyebildiği ortaya konulmuştur.

4. Sonuç

Bu çalışmada HM tipi bağlantıdaki 38Si7 kimyasal bileşimine sahip SKL14 gergi kısılcasına EN ISO 9227 standardında korozyon testleri yapılmış ve sonrasında makine öğrenmesi yardımıyla yapay zekâ destekli tahmin modelleri oluşturulmuştur. Sonuç olarak:

- Korozyon testlerindeki ilk pas 0,5 saatte ve tamamen pas ise 1 saat sonunda gözlemlenmiştir.
- Korozyon testi sonundaki ağırlık kaybı 0,0137 g olarak ölçülmüştür.
- Korozyon hızı 0,000749 mm/yıl (0,749 µm/yıl) olarak hesaplanmıştır.
- Yapay zekâ destekli makine öğrenmesiyle tahmin modelleri başarıyla oluşturulmuş ve deneysel korozyon verileri desteklenmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada, kaplamasız gergi kısıkaçlarının korozyon direncinin oldukça düşük olduğu hem deneysel korozyon testleri hem de yapay zekâ destekli tahmin modellerindeki analiz sonuçlarında demiryolu standartları için kabul edilemez ve kullanılmaya elverişli olmadığı kanıtlanmıştır. Dolayısıyla kaplamasız gergi kısıkaçlarının mutlaka etkin kaplama yöntemleriyle kaplanarak ve korozyon direncinin artırılarak kullanılması gerektiği önerilmektedir. Gelecekteki

çalışmalar için farklı kaplamaların kapsamlı test parametreleriyle değerlendirilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Mustafa DURSUNLAR'ın doktora tez çalışmalarından türetilmiş olup, malzeme temini ve testler için Gürmak Demiryolu'na teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] K. Ecer and O. Güner, "The European Union's Policies and Role in Tackling Climate Change in the Context of the European Green Deal," *The Social Consequences of Climate Change*, pp. 163–185, Nov. 2024, doi: 10.1108/978-1-83797-677-520241013
- [2] H. H. Sharaf-Addin, "Towards net-zero carbon emissions: A systematic review of carbon sustainability reporting based on GHG protocol framework," *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 24, p. 100516, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.INDIC.2024.100516
- [3] K. Feng, Z. Yang, Y. Zhuo, L. Jiao, B. Wang, and Z. Liu, "Impact of Carbon Tax on Renewable Energy Development and Environmental–Economic Synergies," *Energies 2024, Vol. 17, Page 5347*, vol. 17, no. 21, p. 5347, Oct. 2024, doi: 10.3390/EN17215347
- [4] R. D. Piacentini and S. Garro, "Carbon neutral industries and compensation for greenhouse gas emissions," *Drying Technology*, vol. 40, no. 16, pp. 3371–3372, Dec. 2022, doi: 10.1080/07373937.2022.2149181
- [5] M. Hakovirta, "Impetus for Carbon Neutrality–Frames of Reference," *Springer Climate*, vol. Part F1826, pp. 11–29, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-45202-4_2
- [6] Q. Zhang, C. W. Y. Wong, and R. Klassen, "Carbon neutrality: Operations management research opportunities," *Journal of Operations Management*, vol. 70, no. 3, pp. 344–354, Apr. 2024, doi: 10.1002/JOOM.1303
- [7] Q. G. Rayer, "Ethical and Sustainable Investing and the Need for Carbon Neutrality," *Environmental Policy: An Economic Perspective*, pp. 213–232, Sep. 2020, doi: 10.1002/9781119402619.CH13
- [8] B. Indraratna, R. S. Malisetty, C. Arachchige, Y. Qi, and C. Rujikiatkamjorn, "Sustainable Performance of Recycled Rubber and Mining Waste Utilized for Efficient Rail Infrastructure," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 54, no. 5, pp. 1738–1750, Oct. 2024, doi: 10.1007/S40098-024-00941-6/FIGURES/15
- [9] R. Damián Oostrom and C. Zamorano Martín, "Greenhouse Gas Emissions from High-Speed Rail Maintenance: A Comparative Case Study for Five Major High-Speed Lines," 2024, doi: 10.2139/SSRN.4985657
- [10] Y. Wang, Y. Wang, and M. Xie, "Accelerating the penetration of clean electricity to promote the low carbonization of high-speed railways: A probabilistic framework," *Energy for Sustainable Development*, vol. 83, p. 101582, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.ESD.2024.101582
- [11] M. Braima, T. E. Butt, M. A. Maraqa, S. Goodhew, S. Sundaram, and M. M. A. Mohamed, "A perspective on solar railway potential for the UK," *Environ Prog Sustain Energy*, 2024, doi: 10.1002/EP.14488
- [12] W. Peng, J. Zhang, X. Yang, Z. Zhu, and S. Liu, "Failure analysis on the collapse of leaf spring steels during cold-punching," *Eng Fail Anal*, vol. 17, no. 4, pp. 971–978, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2009.11.008
- [13] C. Xu, Y. Liang, M. Yang, J. Yu, and X. Peng, "Effects of the Ultrasonic Assisted Surface Rolling Process on the Fatigue Crack Initiation Position Distribution and Fatigue Life of 51CrV4 Spring Steel," *Materials 2021, Vol. 14, Page 2565*, vol. 14, no. 10, p. 2565, May 2021, doi: 10.3390/MA14102565
- [14] C. L. Zhang, L. Y. Zhou, and Y. Z. Liu, "Surface decarburization characteristics and relation between decarburized types and heating temperature of spring steel 60Si2MnA," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 8, pp. 720–724, Aug. 2013, doi: 10.1007/S12613-013-0789-1/METRICS
- [15] Z. Li, H. Liu, W. Wang, and L. Xu, "The effect of fastener clip fatigue for high-speed railway on vehicle-track dynamic interaction: Numerical analysis and probabilistic evaluation," *Appl Math Model*, vol. 135, pp. 269–305, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.APM.2024.06.044

- [16] Y. Yuan *et al.*, “Status, challenges, and prospects of energy efficiency improvement methods in steel production: A multi-perspective review,” *Energy*, vol. 304, p. 132047, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.ENERGY.2024.132047
- [17] M. Dursunlar, Z. Taş, B. Akgül, O. Güler, and M. Çelebi, “Comparative analysis of wear properties between electroless Ni-B coating and commercial ZnAl coating on 38Si7 steel used in railway system,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 58, p. 101843, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.JESTCH.2024.101843
- [18] S. Mohammadzadeh, S. Ahadi, and H. Keshavarzian, “Assessment of fracture reliability analysis of crack growth in spring clip type Vossloh SKL14,” <http://dx.doi.org/10.1177/1748006X14527926>, vol. 228, no. 5, pp. 460–468, Mar. 2014, doi: 10.1177/1748006X14527926
- [19] X. W. Wang *et al.*, “Optimization of Heat Treatment for 38Si7 Spring Steel with Excellent Mechanical Properties and Controlled Decarburization,” *Materials*, vol. 15, no. 11, Jun. 2022, doi: 10.3390/ma15113763
- [20] J. Liu, B. Jiang, C. Zhang, G. Li, Y. Dai, and L. Chen, “Evolution during Hot Rolling and Control by Thermomechanical Control Process of Surface Decarburization on 38Si7 Spring Steel,” *J Mater Eng Perform*, vol. 31, no. 11, pp. 8677–8686, Nov. 2022, doi: 10.1007/S11665-022-06956-5/FIGURES/12
- [21] M. Dursunlar and Z. Taş, “Ray Bağlantı Elemanlarına Akımsız Ni-B Kaplama ve Isıl İşlem Uygulamaları,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 20, pp. 67–78, Jul. 2024, doi: 10.47072/demiryolu.1471045
- [22] N. Yirmibeş “54SiCr6-38Si7 Yay Çeliklerinin Yorulma Davranışına Uygulanan Isıl İşlemin Etkisinin İncelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 2024.
- [23] J. Liu, B. Jiang, C. Zhang, G. Li, Y. Dai, and L. Chen, “Evolution during Hot Rolling and Control by Thermomechanical Control Process of Surface Decarburization on 38Si7 Spring Steel,” *J Mater Eng Perform*, vol. 31, no. 11, pp. 8677–8686, Nov. 2022, doi: 10.1007/s11665-022-06956-5
- [24] Y. Zhang, X. Yang, and S. Liu, “Design and parameters influence analysis of dynamic vibration absorber for fastener clips in high-speed railway,” *Journal of Vibration and Control*, vol. 30, no. 3–4, pp. 472–486, Feb. 2023, doi: 10.1177/10775463231154144
- [25] N. Ali and M. A. Fulazzaky, “The empirical prediction of weight change and corrosion rate of low-carbon steel,” *Heliyon*, vol. 6, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05050
- [26] F. Malaret and X.-S. Yang, “Exact calculation of corrosion rates by the weight-loss method,” *Exp Results*, vol. 3, p. e13, May 2022, doi: 10.1017/EXP.2022.5
- [27] L. Du, J. Chen, E. Hu, and F. Zeng, “A reactive molecular dynamics simulation study on corrosion behaviors of carbon steel in salt spray,” *Comput Mater Sci*, vol. 203, p. 111142, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.COMMATSCI.2021.111142
- [28] J. Hu, S. A. Cao, and J. Xie, “EIS study on the corrosion behavior of rusted carbon steel in 3% NaCl solution,” *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 60, no. 2, pp. 100–105, Mar. 2013, doi: 10.1108/00035591311308074/FULL/PDF
- [29] F. Jiang and M. Hirohata, “A GAN-Augmented Corrosion Prediction Model for Uncoated Steel Plates,” *Applied Sciences 2022, Vol. 12, Page 4706*, vol. 12, no. 9, p. 4706, May 2022, doi: 10.3390/APP12094706
- [30] D. J. McAdam, “Fatigue and Corrosion-Fatigue of Spring Material,” *J Fluids Eng*, vol. 51, no. 2, pp. 45–56, Jan. 1929, doi: 10.1115/1.4059013
- [31] M. Korkmaz, “A study over the general formula of regression sum of squares in multiple linear regression,” *Numer Methods Partial Differ Equ*, vol. 37, no. 1, pp. 406–421, Jan. 2021, doi: 10.1002/NUM.22533
- [32] G. Shen and Q. Liu, “Performance Analysis of Linear Regression Based on Python,” *Communications in Computer and Information Science*, vol. 1227 CCIS, pp. 695–702, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-6113-9_80
- [33] “Regression Analysis with Python- Luca Massaron, Alberto Boschetti, 2016 - Google Books.” Accessed: Online, Nov. 03, 2024.
- [34] E. Ostertagová, “Modelling using Polynomial Regression,” *Procedia Eng*, vol. 48, pp. 500–506, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.PROENG.2012.09.545
- [35] Y. Gong and P. Zhang, “Predictive Analysis and Research of Python Usage Rate Based on Polynomial Regression Model,” *Proceedings - 2021 3rd International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacture, AIAM 2021*, pp. 266–270, 2021, doi: 10.1109/AIAM54119.2021.00061
- [36] A.-H. A. Abdul-Hamied and A. D. Assi, “Evaluation of the Effect of Static and Flowing Conditions on the Corrosion Behavior of the Hull of Marine Ships,” *Journal of Engineering*, vol. 30, no. 11, pp. 90–107, Nov. 2024, doi: 10.31026/j.eng.2024.11.06

- [37] A. Nurdin, S. M. Muhammad, Z. I. Vega, T. Sulaiman, and H. Iskandar, “A Comparative Study on Corrosion Rate of Carbon Steel in NaCl Solution with Continuous and Discontinuous Weight Loss Methods,” *Key Eng Mater*, vol. 930, pp. 35–41, 2022, doi: 10.4028/P-DQ46YD
- [38] M. Karthikraja, K. Ramanathan, K. T. Loganathan, and S. Selvaraj, “Corrosion behaviour of SiC and Al₂O₃ reinforced Al 7075 hybrid aluminium matrix composites by weight loss and electrochemical methods,” *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 100, no. 5, p. 101002, May 2023, doi: 10.1016/J.JICS.2023.101002
- [39] Y. Liu, M. Liu, X. Lu, and Z. Wang, “Effect of temperature and ultraviolet radiation on corrosion behavior of carbon steel in high humidity tropical marine atmosphere,” *Mater Chem Phys*, vol. 277, p. 124962, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.124962
- [40] V. Kumar, A. Pal, and O. Shpielberg, “Arrhenius law for interacting diffusive systems,” *Phys Rev E*, vol. 109, no. 3, p. L032101, Mar. 2024, doi: 10.1103/PHYSREVE.109.L032101/FIGURES/1/MEDIUM
- [41] L. Omomeji, M. K. Onifade, A. O. Onokwai, J. Atiba, E. Y. Salawu, and O. O. Joseph, “Inhibitory effect of expired glavox tablets on A36 carbon steel for optimized service life,” *Mater Res Express*, vol. 11, no. 11, p. 115507, Nov. 2024, doi: 10.1088/2053-1591/AD94D4
- [42] Y. Yue, N. Li, S. Gao, A. Li, and J. Sun, “Estimating corrosion induced thickness loss in Q690E high-strength steel using multimodal ultrasonic guided waves,” *Ultrasonics*, vol. 143, p. 107404, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.ULTRAS.2024.107404
- [43] K. Asghar, S. Kim, M. Shabpiray, M. Faustine Ngulimi, B. Kyung Seo, and C. Roh, “Corrosion effect of Carbon steel SA106 Gr. B in oxalic acid,” *Mater Lett*, vol. 370, p. 136842, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.MATLET.2024.136842
- [44] M.-O. Danyliak, S. Lavrys, Y. Rizun, and S. Korniy, “Anticorrosion Protection of Low-Carbon Steel by the Eco-Friendly Composition Based on Gum Arabic,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2024, no. 1, p. 5528033, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/5528033
- [45] P. S. Pai et al., “Microstructural, electrochemical and immersion based corrosion analysis in milling induced magnesium alloy AZ91,” *Int. J. Corros. Scale Inhib*, vol. 13, no. 4, pp. 2388–2399, 2024, doi: 10.17675/2305-6894-2024-13-4-27

Özgeçmiş



Mustafa DURSUNLAR

Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans ve yüksek lisans eğitimini tamamlamış olup, aynı alanda doktora eğitimine Yozgat Bozok Üniversitesinde devam etmektedir. Yozgat Bozok Üniversitesi Sorgun Meslek Yüksekokulu Ulaştırma Hizmetleri Bölümü Raylı Sistemler Makine Teknolojisi Programında öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: mustafa.dursunlar@yobu.edu.tr



Zakir TAŞ

Lisans ve yüksek lisans eğitimini Almanya’da, doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Yozgat Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Prof. Dr. olarak çalışmaktadır.

E-Posta: zakir.tas@bozok.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mustafa DURSUNLAR: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme. Zakir TAŞ: Kontrol, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.