

Araştırma Makalesi / Research Article

Yapay Sinir Ağı ile Mikro Parçacık Dolgulu Kompozitlerin Tribolojik Özelliklerinin Tahmini

Hüseyin GÜRBÜZ^{1*}, Mehmet Emin DEMİR², Şehmus BADAY³, İbrahim Halil AKCAN⁴

^{1*} Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1391-172X>, huseyin.gurbuz@batman.edu.tr

² Batman Üniversitesi, Beşiri Organize Sanayi MYO, Makine Bölümü, Batman, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9630-6378>, memin.demir@batman.edu.tr

³ Batman Üniversitesi, Beşiri Organize Sanayi MYO, Makine Bölümü, Batman, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4208-8779>, sehmus.baday@batman.edu.tr

⁴ Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye,
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-8075-2323>, ibrahimhalilakcan1@gmail.com

Geliş/ Received: 08.11.2024;

Revize/Revised: 27.11.2024

Kabul / Accepted: 08.01.2025

ÖZET: Yapay sinir ağı (YSA), polimer kompozitlerin tribolojik performansı gibi karmaşık mühendislik problemlerini çözmek için kullanılan etkili tekniklerden biridir. Bu çalışmanın amacı bor karbür (B₄C) ve grafit (Gr) dolgulu epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma performansını YSA ile modellemektir. Cam elyaf takviyeli epoksi reçine içerisinde ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında B₄C ve Gr dolgulu kompozitler basit elle yatırma tekniği ile hazırlanmıştır. Bu kompozitlere, Taguchi'nin ortogonal dizi tasarımına göre kuru kayma koşullarında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel veriler kullanılarak, aşınma davranışı üzerinde çeşitli kontrol faktörlerinin etkisini tahmin etmek amacıyla bir YSA modeli eğitilmiş ve test edilmiştir. Oluşturulan YSA modelinde, ağ yapısı ileri beslemeli ve geri yayımlı, eğitim algoritması Levenberg–Marquardt, transfer fonksiyonu tansig kullanarak deneysel sonuçlar tahmin edilmiştir. Sürtünme katsayısı (COF) için eğitim, doğrulama, test ve genel regresyon katsayı değerleri sırasıyla 0,9936 – 0,99996 – 0,99807 ve 0,9911 iken, aşınma oranı için ise 0,9968 – 0,99891 – 0,83971 ve 0,93886 olarak elde edilmiştir. Aşınma oranı ve COF değerleri için oluşturulan YSA modelinden elde edilen regresyon katsayısı değerlerine göre, deneysel sonuçların yüksek doğruluk oranlarıyla tutarlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Mikro parçacık, Cam elyaf, Kompozit, Aşınma, Yapay sinir ağları

*Sorumlu yazar / Corresponding author: huseyin.gurbuz@batman.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Prediction of Tribological Properties of Micro-Particle-Filled Composites Using Artificial Neural Network

ABSTRACT: Artificial neural network (ANN) is one of the effective techniques used to solve complex engineering problems such as tribological performance of polymer composites. The aim of this study is to model the wear performance of boron carbide (B₄C) and graphite (Gr) filled epoxy matrix composite material with ANN. Composites with 5 wt.%, 10 wt. % and 15 wt. % B₄C and Gr fillers in glass fiber reinforced epoxy resin were prepared by simple hand lay-up technique. Wear tests were performed on these composites under dry sliding conditions according to Taguchi's orthogonal array design. Using experimental data, an ANN model was trained and tested to predict the effect of various control factors on wear behavior. In the created ANN model, the network structure is feed forward and back propagation, Levenberg–Marquardt training algorithm, tansig transfer function is used to estimate experimental results. The values of the training, validation, testing and general regression coefficients for coefficient of friction (COF) were 0.9936 – 0.99996 – 0.99807 and 0.9911, respectively, while for the wear rate, they were 0.9968 – 0.99891 – 0.83971 and 0.93886. According to the regression coefficient values obtained from the ANN model created for the wear rate and COF values, the experimental results were consistent with high accuracy rates.

Keywords: Micro particle, Glass fiber, Composite, Wear, Artificial neural networks

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında, elyaf takviyeli polimer kompozitler (ETPK), havacılık endüstrisi, sıhhi tesisat borulama sistemleri, gemi inşası, rulmanlar, otomobil üretimi, dişli ve rüzgar türbini kanadı imalatı gibi birçok alanda geniş uygulama alanına sahiptir. Bu kompozitler, hafiflik, olağanüstü özgül dayanım/rijitlik, daha iyi korozyon direnci ve anizotropik davranış gibi üstün mekanik özelliklere sahiptir (Thakur ve Singh, 2020; Jayan ve ark., 2021). ETPK'ler ve polimer kompozitler, kuru sürtünme koşullarında metallere kıyasla daha düşük sürtünme değerlerine sahip olmaları nedeniyle büyük ilgi görmektedir (Friedrich, 2018). Polimer kompozitler, kuru sürtünme koşullarına maruz kalan birçok uygulamada kendiliğinden yağlama özellikleri sayesinde metal muadillerinin yerini almaktadır (Çetkin ve ark., 2022; Ouyang ve ark., 2022). Polimer kompozitler yapısal malzemelerde ve tasarımda geniş ölçüde kullanılmaktadır. Genellikle polimer kompozitler metal temas yüzeyi ile etkileşim halindedir. ETPK'lerde dolgu malzemelerinin kullanımı mekanik ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesi açısından önemlidir. Dolgu maddelerinin kullanım amacı iki temel kategoriye ayrılabilir: birincisi, mekanik, termal veya tribolojik özellikleri iyileştirmek; ikincisi ise bileşenin maliyetini düşürmektir. Seramik veya metal parçacıklarından oluşan sert parçacık dolgular ve camdan yapılmış elyaf dolgular, günümüzde doğal lif kompozitlerinde aşınma direnci gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirmek için kullanılmaktadır (Ray, 2021). Tribolojik uygulamalarda yaygın kullanımları nedeniyle, polimer kompozitlerin tribolojik özellikleri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Demir ve ark., 2019; Negi ve ark., 2019; Kumar ve Singh, 2020; Turaka ve ark., 2021). Epoksi, yüksek mukavemeti ve modülü, düşük çekme seviyeleri ve uçuculuğu, daha iyi yapışma ve kimyasal direnç gibi özelliklerinin yanında işlenme kolaylığı nedeniyle en yaygın kullanılan matris malzemesidir (Zhao ve ark., 2016; Li ve ark., 2017; Singh ve ark., 2021). Literatür araştırmaları, cam, karbon ve kevlar gibi liflerle polimer reçinelerinin takviye edilmesinin, metal temas yüzeyi karşısında kuru sürtünme koşullarında polimerlerin aşınma direncini önemli ölçüde artırdığını ortaya

koymuştur. Kompozitlerde aşınma süreçleri, birçok çalışma değişkenini içeren karmaşık olgudur ve kompozitlerin aşınma özelliklerinin farklı çalışma koşullarından nasıl etkilendiğini anlamak esastır (Padhi ve Satapathy, 2013). Ancak, elyaf yönelimi, matris bileşimi ve uygulanan yük, kayma ortamları, sıcaklık ve kayma hızı gibi test parametreleri de tribolojik performans üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Findik ve ark., 2004; Chowdhury ve Helali, 2008; Agrawal ve ark., 2016). Bununla birlikte eklenen dolgu parçacıklarının şekli, boyutu, hacim fraksiyonu ve spesifik yüzey alanı da, kompozitlerin tribolojik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir (Kranthi ve Satapathy 2010).

Aşınma oranı ve sürtünme katsayısı (COF) gibi tribolojik özelliklerin değerlendirilmesine yönelik araştırma çalışmaları, tekrar eden deneyler gerektirdiği için oldukça zaman almaktadır. Deney süresinden tasarruf sağlamak amacıyla, parametrik modelleme, regresyon modeli, bulanık mantık ve yapay sinir ağı (YSA) gibi çeşitli modelleme yöntemleri kullanılmaktadır (Jiang ve ark., 2007; Gyurova ve Friedrich, 2011; Chowdhury ve ark., 2019). Ancak, literatürde yer alan çalışmalar, YSA'nın diğer modelleme yöntemlerine kıyasla daha yüksek bir doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. YSA kullanılarak tahmin edilen değerler, hedef değerlerle güçlü bir korelasyon göstermekte ve bu sayede diğer modelleme yöntemlerine göre daha yüksek doğruluk sağlamaktadır (Shtub ve Versano, 1999; Ciurana ve ark., 2008). Hem dolgu kompozitler ile ilgili deneysel çalışmalar ve hem de deneysel verilerin YSA yöntemi ile modellendiği birçok çalışma mevcuttur (Padhi ve Satapathy, 2013; Divya ve ark., 2023; Teli ve ark., 2023; Demir, 2024; Demir ve ark., 2024; Kose ve ark., 2024). Zhang ve arkadaşları, YSA kullanarak kısa fiber takviyeli poliamid 4,6 kompozitinin spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısını tahmin etmiştir. Farklı eğitim algoritmalarının (Bayesian düzenlemesi, Levenberg-Marquardt vb.) etkisini tahmin etmek için geri yayılım yöntemiyle çok katmanlı algılayıcı kullanmışlardır. Çalışma, sınırlı sayıda ölçüm sonucuna dayanarak, YSA'nın malzeme tasarımında, parametrelerin incelenmesinde ve polimer kompozit özelliklerinin analizinde faydalı bir matematiksel araç olduğunu göstermiştir (Zhang ve ark., 2002). Kumar ve ark. AlSi10Mg – MWCNT bazlı kompozit fren balatasının aşınmasını, yük ve çalışma süresi gibi girdileri alarak tahmin etmek için YSA'yı uygulamışlardır. Ayrıca deneysel sonuçların tahmininde 0,99447'lik bir korelasyon katsayısı elde etmişlerdir (Kumar ve ark., 2021a). Kumar ve ark. bir diğer çalışmalarında ise normal kuvvet, sıcaklık ve diskin devir sayısı olmak üzere üç girdi alarak NiSO₄ kompozit fren balatası için bir YSA modeli geliştirmişlerdir. Kütle kaybı ve sürtünme katsayısını (COF) sırasıyla 0,99073 ve 0,98217 korelasyon katsayıları ile tahmin etmişlerdir (Kumar ve ark., 2021b). Rodrigues ve ark. silan uygulanmış B₄C'nin epoksi reçinesine eklenmesiyle mekanik özelliklerde önemli bir iyileşme sağlamışlardır. Kompozitlerin eğilme ve çekme mukavemetlerinin sırasıyla yaklaşık %24 ve %56 oranında arttığını belirlemişlerdir (Rodrigues & Broughton, 2013). Abenojar ve ark. ortalama parçacık boyutu 23 µm olan %6 oranında B₄C parçacıklarının epoksiye eklenmesinin, 7 µm parçacık içeren kompozitlere kıyasla daha düşük bir aşınma oranı sağladığını bulmuşlardır. Ancak, B₄C parçacık boyutu artırıldığında tersine bir etki yaptığını gözlemlemişlerdir. B₄C dolgusunun, cam-epoksi kompozitlere ilave edildiğinde, kompozitlerin aşınma özelliklerini iyileştirdiğini belirlemişlerdir (Abenojar ve ark., 2009).

Elyaf takviyeli kompozitlerde dolgu tipi ve dolgu oranı aşınma özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu kompozitlerin endüstriyel uygulamalarda farklı alanlarda çalışma şartlarına bağlı olarak birbirleriyle temaslarından dolayı malzemelerde aşınma sonucu kütle kayıpları ve deformasyonlar meydana gelmekte ve böylece işlevlerini kaybetmektedirler. Ortaya çıkan bu durum kompozitlerde maliyet artırıcı bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yüzden aşınma parametrelerinin ve malzeme özelliklerinin birbirleriyle olan etkileşimlerinin belirlenmesinde, zaman ve maliyet açısından farklı modelleme ve optimizasyon yöntemlerinin kullanılması önem arz

etmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada çeşitli parametrelerin ve bunların etkileşimlerinin etkisini incelemek ve sürtünme katsayısı ile aşınma oranını tahmin etmek amacıyla YSA yöntemi kullanılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Kompozitlerin Üretimi

Bu çalışmada, farklı ağırlık yüzdelinde dolgu tipi içeren polimer kompozitler, basit el yatırma tekniği ile üretilmiştir. Matris malzemesi olan ARC 152 epoksi reçine ve sertleştiricisi “ARC Marine” firmasından temin edilmiştir. Cam elyaf takviye malzemesi olarak düz dokuma cam elyaf, karbomid firmasından, Gr ve B₄C dolgu parçacıkları ise Ege Nanotek firmasından temin edilmiştir. Sertleştirici, epoksi reçine içine dörtte bir oranında katılmıştır. Dolgu parçacıkları öncelikle belirlenen oranlarda hassas terazide tartılarak epoksi reçine içine katılmış ve homojenliğin sağlanması amacıyla mekanik bir çubukla 15 dakika karıştırılmıştır. Matris oranı %50 oranında tutulmuştur. B₄C ve Gr dolguları için ayrı ayrı ağırlık yüzdesi, %5, 10 ve 15 olmak üzere 3 farklı oranda matris malzeme içinde karıştırıldıktan sonra 30 x 30 cm boyutlarındaki her cam elyaf katmanına sürülerek plakalar hazırlanmıştır. Ortalama 5 mm numune kalınlığı elde etmek amacıyla 13 katman cam elyaf kullanılarak dolgulu 6 tip kompozit panel üretilmiştir. Plakaların kuruması için 1 gün boyunca kurlaşmaya bırakılmıştır. Aşınma testleri için 40 mm × 40 mm × 4 mm boyutlarında kompozitler kesilmiştir. Bu çalışmada laminatların üretiminde kullanılan matris, takviye ve dolgu maddelerinin özellikleri Çizelge 1’de sunulmuştur. Kompozitlerin üretim aşamaları ve aşınma test düzeneği Şekil 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Cam elyaf ve dolgu parçacıklarının özellikleri

	Cam Elyaf		Gr	B ₄ C
Ağırlık	220 gr/m ²	Toz Boyutu	30 mikron	30 mikron
Kopma Uzaması	%2,50	Yoğunluk	2,09-2,23 g/cm ³	2,52 g/cm ³
Çekme Mukavemeti	1300 MPa	Safılık	% 99,9	% 96
Elastisite Modülü	65 GPa	Sertlik	0,32 GPa	44 GPa



Kompozitlerin Üretim Aşaması

Aşınma Test Cihazı

Şekil 1. Kompozitlerin üretilmesi ve aşınma deney düzeneği (Gürbüz ve ark., 2024)

2.2 Aşınma Testi

Dolgulu kompozitlerin aşınma testleri için değişken yük, kayma hızı, dolgu oranı gibi tüm deney kombinasyonlarının birbiri ile etkileşiminin araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada deney sayısının belirlenmesinde Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi deneysel tasarımının

kullanılmasının amacı, aşınma testlerindeki tüm parametreleri kapsayan daha az deneyle tüm parametreler arasındaki ilişkileri belirlemektir. Aşınma deneyleri 250 m, 500 m, 750 m kayma mesafesi ve 5 N, 10 N ile 15 N yükte gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerindeki numuneler Turkey marka pin on disk cihazında 300 dev/dk hızında 6 mm çaptaki çelik bilye ile aşındırılmıştır. Testler ASTM G99 standardına göre yapılmış olup, aşınma oranının belirlenmesinde kullanılan formül Eşitlik 1’de verilmiştir.

$$AH = 2 * \pi * R[r^2 * \sin - 1(a/2 * r) - (a/4) * (4 * r^2 - a^2)^{1/2}] \quad (1)$$

Burada R: iz çapını, AH: aşınma oranını, r: bilye çapını ve a: ise iz genişliğini ifade etmektedir.

2.3 Taguchi Modelleme

Bu çalışmada deney sayısını düşürerek hem finansal hem de zaman açısından kazançlı olmak için deney tasarım yöntemlerinden biri olan Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi metodunda giriş parametreleri olarak dolgu malzemesi, katkı oranı, kuvvet ve kayma mesafesi iken çıkış parametreleri olarak aşınma oranı ve sürtünme katsayısı seçilmiştir. Giriş parametrelerin çıkış parametreleri üzerindeki etkisini belirlemek için üç faktörlü karışık seviye tasarımı kullanılmıştır. Deney sayısı, L18 (2¹–3³) düzeni Taguchi mixed (karışık) tasarım olarak seçilmiştir. Aşınma oranı ve sürtünme katsayısı deneyleri için giriş parametreleri ve seviyeleri Çizelge 2’te verilmiştir.

Çizelge 2. Aşınma deneyleri için giriş parametreleri ve seviyeleri

Seviyeler	Dolgu malzemesi	Kayma mesafesi (m)	Kuvvet (N)	Dolgu oranları (%)
1	B ₄ C	250	5	5
2	Gr	500	10	10
3		750	15	15

2.4 YSA Analizi

YSA, girdilerin çıktılar üzerindeki etkisini tahmin etmek için veri tabanı eğitimi içeren bir tekniktir. İyi tasarlanmış bir YSA’yı eğitmek için belirli bir miktarda deneysel sonuca ihtiyaç duyulmaktadır. YSA, çözülmesi güç olan denklemleri öğrendikten sonra çok sayıda deney yapmaya gerek kalmadan sonuçları tahmin edilebilmektedir. YSA, nöron adı verilen birçok çapraz bağlı basit işlem biriminden oluşan bir sistemdir. Ağ, seri bağlı üç kısımdan oluşur. Bunlar giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanıdır. YSA’da giriş katmanı işlenmemiş verileri kabul eder, gizli katmanda bu veriler işlenir ve çıkış katmanı aracılığıyla sonuçlar dışa aktarılır (Pati, 2019). Aşınma oranı ve COF değerinin tahmin etmek amacıyla, dört nöronlu bir giriş katmanı (dolgu tipi, dolgu içeriği, uygulanan yük ve kayma mesafesi), 10-8-3 nöronlu üç gizli katmanlı ve iki nöronlu bir çıkış katmanı (aşınma oranı ve COF) ile YSA modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan YSA modeli Şekil 2’de gösterilmiştir. Gizli katmandaki nöron sayısının belirlenmesi, ortalama kare hata kriterine dayalı olarak deneme-yanılma yöntemiyle yapılmıştır. YSA’yı geliştirmek ve giriş parametrelerine bağlı olarak çıkış parametrelerini tahmin etmek amacıyla, COF için 18 veri kümesi ve aşınma oranı için 18 veri kümesinden oluşan deneysel bir veri tabanı kullanılmış, Çizelge 5 ve Çizelge 6’da gösterilmiştir. Oluşturulan YSA modelinde, deneysel verilerin, %70’ni eğitim ve %15’ini test verileri ve geriye kalan %15’ini doğrulama verileri olarak seçilmiş ve MATLAB programına yüklenmiştir. Bu çalışmada, COF ve aşınma oranlarını tahmin etmek için ileri beslemeli geri yayımlı ağ tipi (Feed-Forward Back Propagation Network), Levenberg–Marquardt eğitim algoritması ve tansig transfer

fonksiyonu uygulanmıştır. YSA modelinde verilerin tahmininde kullanılan genel formül Eşitlik 2’de verilmiştir.

$$NET_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} + w_{bi} \quad (2)$$

Burada; satır numarasını “i”, deney sayısını “n”, sütun numarasını “j”, nöronların ağırlığını “w” ve ağırlığa ait dengelemeyi “w_b” ifade etmektedir. Kullanılan transfer fonksiyonu Eşitlik 3’te verilmiştir.

$$tansig(n) = \frac{2}{(1 + e^{-2NET_i})} - 1 \quad (3)$$

YSA modellemesi için MATLAB yazılım paketi kullanılmıştır. Tahmini hata miktarının hesaplanmasında Eşitlik 4’deki formül kullanılmıştır.

$$\text{Tahmini hata} = (\text{Deneyssel veri} - \text{YSA verisi}) \quad (4)$$

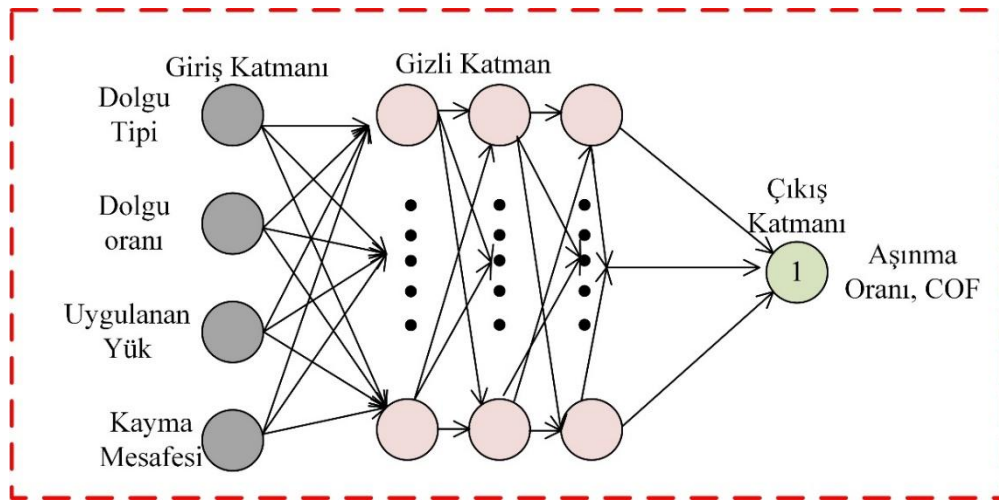
Deney parametrelerinin 0-1 arasında olması YSA modelinin daha doğru sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Bu amaçla deney parametrelerinin minimize edilmesinde kullanılan formül Eşitlik 5’te verilmiştir.

$$\bar{x} = \frac{(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} \quad (5)$$

Bu eşitlikte $\bar{x}$ normalize edilmiş veriyi, x_{min} en düşük veriyi, x_{max} en büyük veriyi ve X ise ölçülen veriyi ifade etmektedir. Regresyon katsayısının hesaplanmasında kullanılan formül Eşitlik 6’te verilmiştir.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{gerçek} - Z_{tahmini})^2}{\sum_{i=1}^n (Z_{gerçek} - Z_{ortalama})^2} \quad (6)$$

Eşitlik 6’da $Z_{gerçek}$ gerçek veriyi, $Z_{tahmini}$ tahmin edilen veriyi, $Z_{ortalama}$ verilerin ortalamasını, R^2 regresyon katsayısını ve n ise toplam gözlem sayısını ifade etmektedir.



Şekil 2. Deneyisel verilerin YSA modeli

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Aşınma ve COF için Levenberg–Marquardt eğitim algoritması sürecinden elde edilen değerler Çizelge 3 ve Çizelge 4’te verilmiştir. COF için eğitim algoritması 12. döngüde, aşınma oranı için ise 7. döngüde tamamlanmıştır. Mu değeri, Levenberg-Marquardt algoritmasının eğitim sürecinde ayarlanan bir parametre olarak kullanılmaktadır. Bu parametre başlangıçta 0,001 olarak belirlenmiş ve eğitim süreci ilerledikçe $1e-07$ değerine kadar düşmüştür. Burada Mu değerinin başlangıçtan itibaren belirgin şekilde azaldığı gözlenmiştir.

Çizelge 3. COF için Levenberg–Marquardt eğitim algoritması süreci

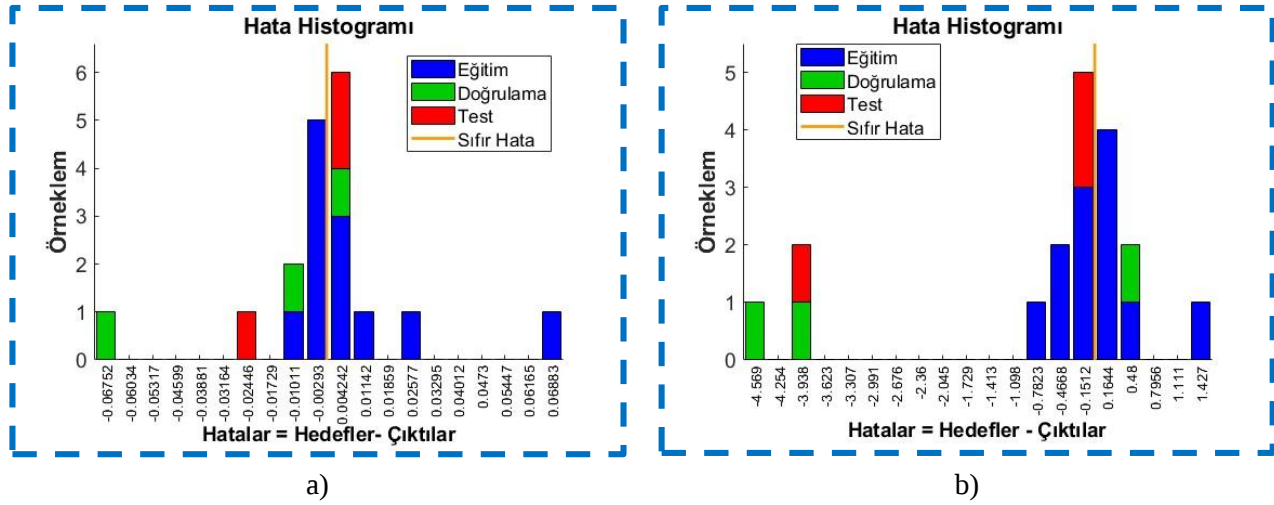
Eğitim İşlemi	Başlangıç Değeri	Durma Değeri	Hedef Değer
Döngü	0	12	1000
Geçen Süre	-	00:00:00	-
Performans	0,152	7,96e-21	-
Gradient	0,352	9,23e-12	1e-07
Mu	0,001	1e-07	1e+10
Doğrulama	0	3	6

Çizelge 4. Aşınma oranı için Levenberg–Marquardt algoritması eğitim prosesi

Eğitim İşlemi	Başlangıç	Durma Değeri	Hedef Değer
Döngü	0	7	1000
Geçen Süre	0	00:00:00	-
Performans	157	1,16E-18	0
Gradient	385	1,44E-08	1e-07
Mu	0,001	0,00001	1e+10
Doğrulama	0	3	6

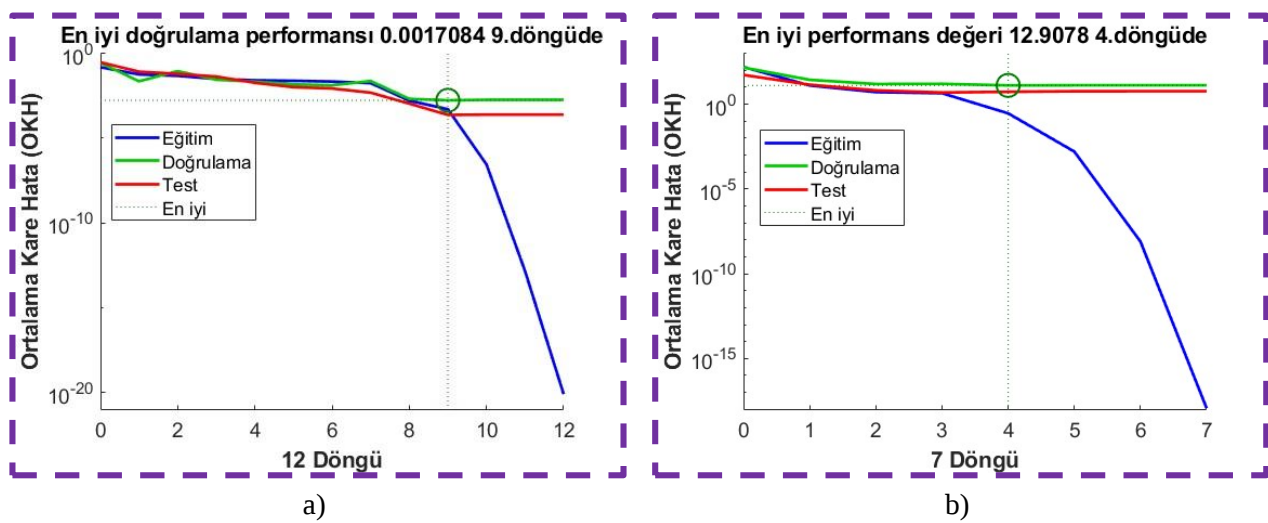
COF ve aşınma oranları için oluşturulan YSA’dan elde edilen hata histogram grafikleri Şekil 3a ve Şekil 3b’de sunulmuştur. Deneyisel verilerin hata histogramını gösteren Şekil 3a ve Şekil 3b’deki veri kümelerinin çoğunun sıfır hata çizgisine yakın olan -0,00293 ve -0,1512’lik bir hataya sahip olduğu ortaya çıkmıştır. COF ve aşınma oranı için elde edilen genel veri kümelerinin hata miktarlarının sırasıyla 0,07’den ve 4,6’dan az olduğu gözlenmiştir ve bu da tüm deneyler için

minimum bir hata olduğunu kanıtlamaktadır. Bu nedenle, deneysel veriler için geliştirilen YSA modelinin tutarlı ve doğru olduğu kabul edilebilir.



Şekil 3. Hata histogramı: a) COF, b) Aşınma oranı

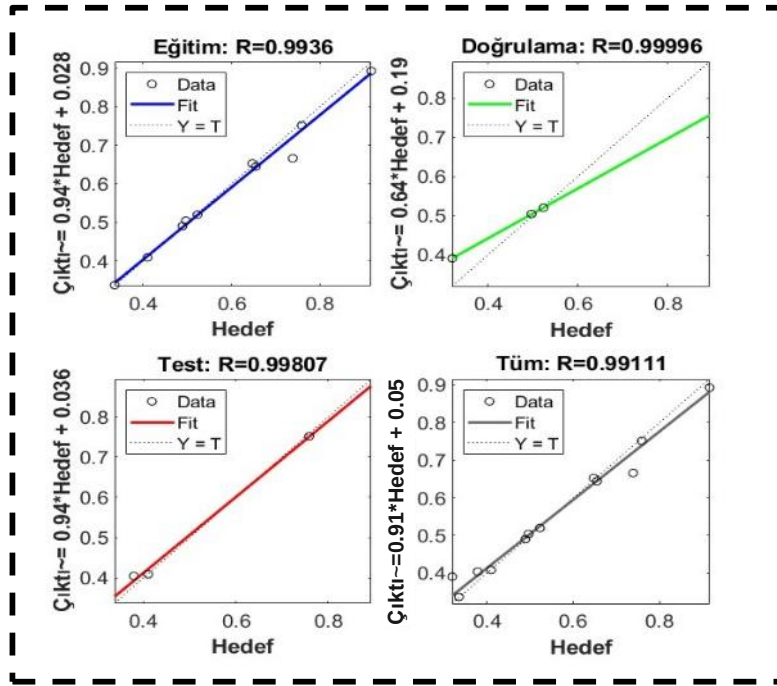
COF ve aşınma oranına ait deneysel verilerin performans grafikleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te verilen doğrulama performans grafiği, YSA modelinin doğruluğunu özetlemekte ve verilerin bütünlüğünü değerlendirmek için kullanılmaktadır. Şekil 4a'daki modelin 12. döngüye kadar eğitildiği, en iyi performans değerinin 9. döngüde elde edildiği ve 9. döngüdeki ortalama kare hata değerinin 0,0017084 olduğu belirlenmiştir. 9. döngüden sonra gerçek değerler ve tahmini değerler arasındaki hata oranı arttığından dolayı program bu döngüde sonlanmıştır. Bu, ortalama kare hata değerinin sıfıra yakın olması YSA modelinin çok iyi eğitildiğini ve dolayısıyla geliştirilen modelin hedef değerlere çok yakın değerleri tahmin edebileceğini göstermektedir. Şekil 4b'de ise aşınma oranı için modelin 7. döngüye kadar eğitildiği ve en iyi performansın 4. döngüde elde edildiği ve 4. döngü ortalama kare hata değerinin 12,9078 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4a ve Şekil 4b'de verilen COF ve aşınma oranlarına ait eğitim hata değerlerinin artan döngü sayısı ile azaldığı gözlenmiştir.



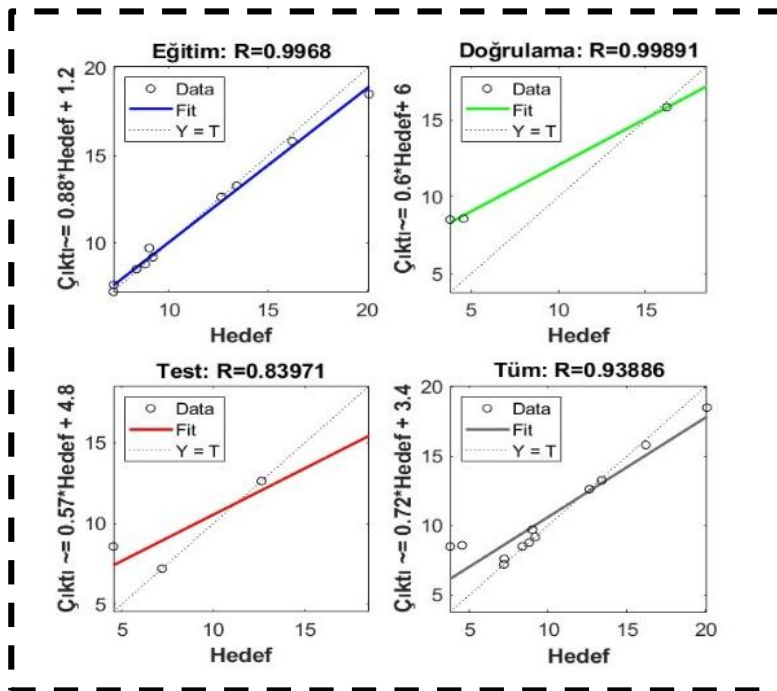
Şekil 4. Performans grafiği: a) COF, b) Aşınma oranı

Dolgulu cam elyaf takviyeli kompozitlerin COF ve aşınma oranlarına ait deneysel veriler eğitildikten sonra elde edilen regresyon grafikleri Şekil 5a ve Şekil 5b'de verilmiştir. Şekil 5'teki

COF ve aşınma oranı için verilen grafikler eğitim, doğrulama, test ve genel regresyon grafiklerini içermektedir. Şekil 5a ve Şekil 5b'deki grafiklerde görülen 45 derecelik açıya sahip çizginin etrafında yer alan hedef ve çıktılar birbirine yakın değerlerde olması istenmektedir.



a)

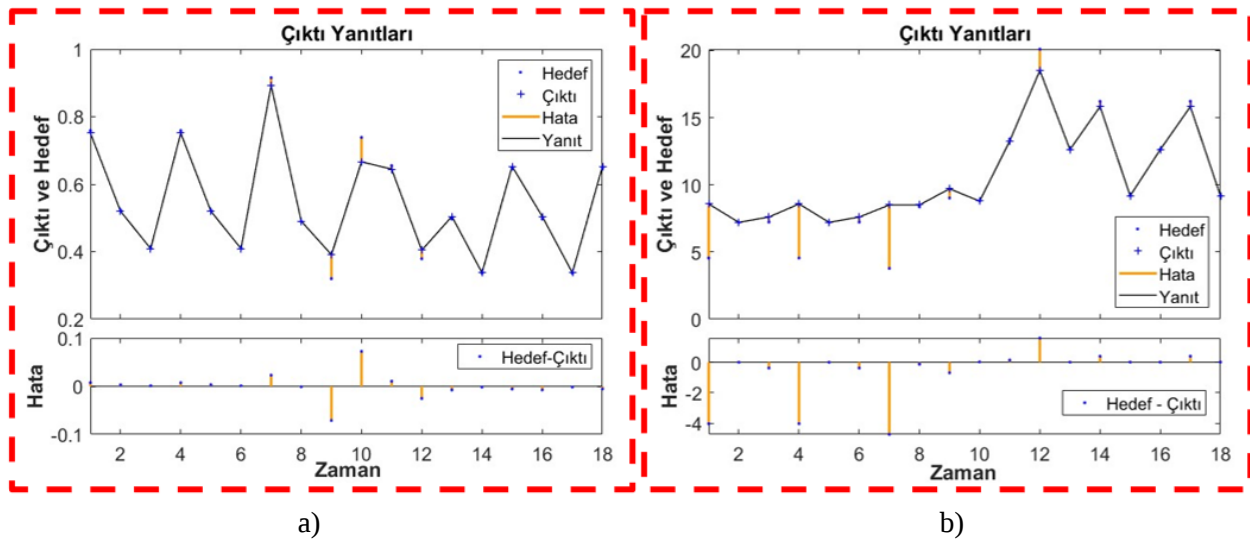


b)

Şekil 5. Regresyon grafikleri: a) COF b) Aşınma oranı

COF için eğitim, doğrulama, test ve genel regresyon katsayı değerleri sırasıyla 0,9936 – 0,99996 – 0,99807 ve 0,99111 olarak elde edilmiştir. Aşınma oranında ise eğitim, doğrulama, test ve genel regresyon katsayı değerleri sırasıyla 0,9968 – 0,99891 – 0,83971 ve 0,93886 olarak ortaya çıkmıştır. Hem COF hem de aşınma oranı için elde edilen regresyon değerlerinin 1'e çok yakın elde

edilmesi, ağın iyi eğitildiğini, güvenilir olduğunu ve deneysel veriler ile arasında güçlü bir korelasyon olduğunu kanıtlamaktadır. Bu sonuçlar, geliştirilen ağ modelinin deney sonuçlarından çok az sapmayla aşınma oranını ve COF değerini tahmin etmedeki etkinliğini doğrulamaktadır. Şekil 5b’de yer alan test regresyon katsayı değeri diğerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni olarak deneysel verilerin alınması sırasındaki hata payından kaynaklandığı düşünülmektedir. COF ve aşınma oranı için hedef, çıktı ve hata değerleri Şekil 6’da verilmiştir. Şekil 6a’da COF değerlerinin tahmin edilmesinde en fazla sapma miktarı 9. ve 10. deney verilerinde meydana gelmiştir. Genel olarak COF değerlerinin tahmin edilmesinde sapma miktarlarının çok düşük olduğu gözlenmiş, hedef ve çıktı değerlerinin birbiriyle örtüştüğü Şekil 6a’daki grafikten anlaşılmaktadır. Şekil 6b’deki aşınma oranı değerlerinin tahmininde 1, 4 ve 7. deney verilerinin diğer deney verilerine göre sapma miktarının biraz daha fazla çıktığı tespit edilmiştir. COF deneysel verilerinin tahmini, aşınma oranı verilerinin tahminine göre daha başarılı olduğu Şekil 6a ve Şekil 6b’deki çıktı ve hedef grafiklerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Çıktı ve hedef grafikleri: a) COF, b) Aşınma oranı

Farklı parametrelere bağlı olarak elde edilen COF ve aşınma oranı için deneysel veriler, tahmin değerleri ve sapma miktarları Çizelge 5 ve Çizelge 6’da verilmiştir. Çizelge 5’teki değerler incelendiğinde YSA analizi ile elde edilen tahmini COF değerlerinin deneysel veriler ile oldukça örtüştüğü görülmektedir. En düşük ve en yüksek sapma değerleri sırasıyla 0,00009 ve 0,072 olarak elde edilmiştir. Aşınma oranları için verilen Çizelge 6’ daki değerler incelendiğinde tahmin değerleri ile deneysel değerlerin birbirine genel olarak yakın olduğu tespit edilmiştir. En yüksek sapma miktarı 7. deney verisinde (4,72707) ve en düşük sapma değeri ise 2. deney verisinde (0,00147) ortaya çıkmıştır. COF ve aşınma oranı tahminlerindeki sapma miktarlarını sıfıra yakın elde edilmesi deneysel veriler için uygulanan YSA modelinin geçerliliğini göstermektedir.

Çizelge 5. Farklı parametrelere bağlı gerçek ve tahmini COF değerleri

Katkı	Dolgu oranı (%)	Kuvvet	Mesafe	Gerçek COF	Tahmini COF	Sapma
Gr	5	5	250	0,758695327	0,76613	0,0070
Gr	10	10	500	0,522985143	0,52609	0,0030
Gr	15	15	750	0,410057631	0,41098	0,00009
Gr	5	5	250	0,758695321	0,76613	0,00700
Gr	10	10	500	0,522985143	0,52609	0,0030

Çizelge 5. Farklı parametrelere bağlı gerçek ve tahmini COF değerleri (devamı)

Katkı	Dolgu oranı (%)	Kuvvet	Mesafe	Gerçek COF	Tahmini COF	Sapma
Gr	15	15	750	0,410000004	0,41098	0,0009
Gr	5	5	500	0,915565003	0,93852	0,0229
Gr	10	10	750	0,489149649	0,48796	-0,0010
Gr	15	15	250	0,320000000	0,24889	-0,0710
B ₄ C	5	5	750	0,738546406	0,8109	0,0720
B ₄ C	10	10	250	0,655046567	0,66538	0,0100
B ₄ C	15	15	500	0,378975930	0,35354	-0,0250
B ₄ C	5	10	750	0,496672426	0,48895	-0,0070
B ₄ C	10	15	250	0,335832063	0,33411	-0,0010
B ₄ C	15	5	500	0,647040914	0,641314	-0,0050
B ₄ C	5	10	750	0,496672426	0,48895	-0,0070
B ₄ C	10	15	250	0,335832063	0,33411	-0,0010
B ₄ C	15	5	500	0,647040914	0,64131	-0,0050

Çizelge 6. Farklı parametrelere bağlı gerçek ve tahmini aşınma oranı değerleri

Katkı	Dolgu oranı (%)	Kuvvet	Mesafe	Gerçek Aşınma Oranı	Tahmini Aşınma Oranı	Sapma
Gr	5	5	250	4,550992	0,523157	-4,02784
Gr	10	10	500	7,205745	7,204267	-0,00147
Gr	15	15	750	7,223641	6,842672	-0,38097
Gr	5	5	250	4,550992	0,523157	-4,02784
Gr	10	10	500	7,205745	7,204267	-0,00148
Gr	15	15	750	7,223643	6,842672	-0,38097
Gr	5	5	500	3,777776	-0,94929	-4,72707
Gr	10	10	750	8,372175	8,240603	-0,13157
Gr	15	15	250	9,013273	8,319442	-0,69383
B ₄ C	5	5	750	8,808456	8,829651	0,021196
B ₄ C	10	10	250	13,41386	13,55868	0,144815
B ₄ C	15	15	500	20,09887	21,68337	1,584496
B ₄ C	5	10	750	12,63095	12,63568	0,004729
B ₄ C	10	15	250	16,21653	16,60995	0,393425
B ₄ C	15	5	500	9,193006	9,202908	0,009902
B ₄ C	5	10	750	12,63095	12,63568	0,004729
B ₄ C	10	15	250	16,21653	16,60995	0,393425
B ₄ C	15	5	500	9,193006	9,202908	0,009902

Çizelge 5'te dolgu tiplerinin etkisi incelendiğinde, Gr dolgulu cam elyafli kompozitlerin sürtünme katsayılarının B₄C dolgulu cam elyafli kompozitlere nazaran daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun aşınma sırasında B₄C parçacıklarının matris içinden çıkarak çelik pin ile malzeme arasında sıkışıp sürtünme katsayısının artışına neden olduğu düşünülmektedir. Dolgu oranının etkisine bakıldığında ise artan dolgu oranlarında hem Gr hem de B₄C dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayılarının düştüğü gözlemlenmiştir. Gr parçacıklarının yağlayıcı özelliği ve B₄C parçacıklarının yüksek sertliği Gr ve B₄C dolgulu kompozitlerin sürtünme katsayılarının artan dolgu oranlarında düşmesini sağlamıştır. Çizelge 6'daki aşınma oranları incelendiğinde, B₄C dolgusunun Gr dolgusuna kıyasla aşınma oranını daha çok arttırdığı anlaşılmaktadır. Literatür incelendiğinde Gr'nin katı yağlayıcı özelliğe sahip olmasından ötürü aşınmaya karşı olan direnci arttırdığı

bilinmektedir (Bheemappa ve ark., 2007; Sudheer ve ark., 2014). Uygulanan yükün aşınma oranı üzerindeki etkisi incelendiğinde yük artışının aşınma oranını belirgin ölçüde arttırdığı anlaşılmaktadır. Elde edilen sonuçlar literatür çalışmalarıyla paralellik arz etmektedir (Kim ve ark., 2012; Arun ve Kumar Singh, 2017).

4. SONUÇ

Mikro parçacık dolgulu cam elyaf takviyeli kompozitlerde farklı dolgu parçacıklarının ve aşınma parametrelerinin COF ve aşınma oranı üzerindeki etkisi YSA ile incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Geliştirilen ağ modelindeki hata histogramına göre veri kümelerinin çoğunun sıfır hata çizgisine yakın olan -0,00293 ve -0,1512’lik bir hataya sahip olduğu görülmüştür.
- Oluşturulan YSA modelinden elde edilen COF için regresyon katsayı değerleri; eğitim, doğrulama, test ve genel olmak üzere sırasıyla 0,9936 – 0,99996 – 0,99807 ve 0,99111 değerlerinde elde edilmiştir. Aşınma oranı için regresyon katsayı değerleri ise eğitim, doğrulama, test ve genel olmak üzere sırasıyla 0,9968 – 0,99891 – 0,83971 ve 0,93886 olarak ortaya çıkmıştır.
- YSA analizi ile elde edilen tahmin sonuçlarına göre en düşük ve en yüksek COF ve aşınma oranlarının sapma değerleri sırasıyla 0,00009 – 0,072 ve 0,00147 – 4,72707 olarak elde edilmiştir. Aşınma oranı ve COF değerlerinin tahmini sapma miktarlarının sıfıra yakın olarak elde edilmesi oluşturulan YSA modelinin geçerli olduğunu göstermiştir.
- YSA modelinin aşınma oranı ve COF değerlerini tahmin etmede oldukça yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu görülmüştür.

İlave edilen hem Gr hem de B₄C dolgu tipide kompozitlerin aşınma dirençlerini arttırdığı tespit edilmiştir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “BTÜBAP-2021-YL-020” kodlu proje ile desteklenmiştir.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. YAZAR KATKISI

Hüseyin GÜRBÜZ, Mehmet Emin DEMİR, Şehmus BADAY ve İbrahim Halil AKCAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fıkırsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk kısımlarında katkıda bulunmuştur.

8. KAYNAKLAR

- Abenojar J., Martínez M. A., Velasco F., Pascual-Sánchez V., Martín-Martínez J. M., Effect of Boron Carbide Filler on the Curing and Mechanical Properties of an Epoxy Resin. *The Journal of Adhesion* 85, 216-238, 2009.
- Agrawal S., Singh K. K., Sarkar P. K., A comparative study of wear and friction characteristics of glass fibre reinforced epoxy resin, sliding under dry, oil-lubricated and inert gas environments. *Tribology International* 96, 217-224, 2016.
- Arun A., Kumar Singh K., Friction and Wear Behaviour of Glass Fibre Reinforced Polymer Composite (GFRP) under Dry and Oil Lubricated Environmental Conditions. *Materials Today: Proceedings* 4, 7285-7292, 2017.
- Chowdhury M. A., Helali M., The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials. *Tribology International* 41, 307-314, 2008.
- Chowdhury M. A., Shuvho B. A., Debnath U. K., Nuruzzaman D. M., Prediction and Optimization of Erosion Rate of Carbon Fiber–Reinforced Ebonite Using Fuzzy Logic. *Journal of Testing and Evaluation* 47, 1244-1258, 2019.
- Ciurana J., Quintana G., Garcia-Romeu M. L., Estimating the cost of vertical high-speed machining centres, a comparison between multiple regression analysis and the neural networks approach. *International Journal of Production Economics* 115, 171-178, 2008.
- Çetkin E., Demir M. E., Ergün R. K., The effect of different fillers, loads, and sliding distance on adhesive wear in woven e-glass fabric composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*:095440892211368, 2022.
- Demir M. E., Cetkin E., Ergün R. K., Denizhan O., Tribological and mechanical properties of nanofilled glass fiber reinforced composites and analyzing the tribological behavior using artificial neural networks. *Polymer Composites* 45, 4233-4249, 2024.
- Demir M. E., Çelik Y. H., Kilickap E., Effect of matrix material and orientation angle on tensile and tribological behavior of jute reinforced composites. *Materials Testing*, 61(8), 806-812, 2019.
- Demir M. E., Investigation of The Abrasive Wear Behavior of GFRC And CFRC with Different Parameters Using Taguchi And Artificial Neural Networks Method. *Politeknik Dergisi* 28(1), 215-228, 2024.
- Divya G. S., Keshavamurthy R., Siddaraju C., Murthy K. V. S., Investigation on Sliding Wear Properties of Nano Metallic Particle Reinforced Hybrid Composites Through Design of Experiments and ANN. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D* 105(3), 1551-1562, 2023.
- Findik F., Yilmaz R., Köksal T., Investigation of mechanical and physical properties of several industrial rubbers. *Materials & Design* 25, 269-276, 2004.
- Friedrich K., Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 1, 3-39, 2018.
- Gürbüz H., Akcan İ. H., Baday Ş., Demir M. E., Investigation of Drilling Performances, Tribological and Mechanical Behaviors of GFRC Filled with B4C and Gr. *Arabian Journal for Science and Engineering* 1-18, 2024.
- Gyurova L. A., Friedrich K., Artificial neural networks for predicting sliding friction and wear properties of polyphenylene sulfide composites. *Tribology International* 44, 603-609, 2011.
- Jayan J. S., Appukuttan S., Wilson R., Joseph K., George G., Oksman K., An introduction to fiber reinforced composite materials. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and*

- Engineering. (ed by K Joseph, K Oksman, G George, R Wilson & SBT-FRC Appukuttan) Woodhead Publishing, pp 1–24, 2021.
- Jiang Z., Zhang Z., Friedrich K., Prediction on wear properties of polymer composites with artificial neural networks. *Composites Science and Technology* 67, 168-176, 2007.
- Kim S. S., Shin M. W., Jang H., Tribological properties of short glass fiber reinforced polyamide 12 sliding on medium carbon steel. *Wear* 274, 34-42, 2012.
- Kose H., Bayar I., Ergün R. K., Experimental optimization of CuO and MgO hybrid nanoparticle reinforcement ratios to enhance fatigue life of GFRP composites. *Polymer Composites* 45, 11125-11137, 2024.
- Kranthi G., Satapathy A., Evaluation and prediction of wear response of pine wood dust filled epoxy composites using neural computation. *Computational Materials Science* 49, 609-614, 2010.
- Kumar S., Priyadarshan, Ghosh S. K., Statistical and artificial neural network technique for prediction of performance in AlSi10Mg-MWCNT based composite materials. *Materials Chemistry and Physics* 273, 125136, 2021a.
- Kumar S., Priyadarshan, Ghosh S. K., Statistical and computational analysis of an environment-friendly MWCNT/NiSO₄ composite materials. *Journal of Manufacturing Processes* 66, 11-26, 2021b.
- Kumar S., Singh K. K., Tribological behaviour of fibre-reinforced thermoset polymer composites: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 234, 1439-1449, 2020.
- Li Y., Zhang H., Porwal H., Huang Z., Bilotti E., Peijs T., Mechanical, electrical and thermal properties of in-situ exfoliated graphene/epoxy nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 95, 229-236, 2017.
- Negi A. S., Katiyar J. K., Kumar S., Kumar N., Patel V. K., Physicomechanical and abrasive wear properties of hemp/Kevlar/carbon reinforced hybrid epoxy composites. *Materials Research Express* 6, 115304, 2019.
- Ouyang J. H., Li Y. F., Zhang Y. Z., Wang Y. M., Wang Y. J., High-Temperature Solid Lubricants and Self-Lubricating Composites: A Critical Review. *Lubricants* 10(8), 177, 2022.
- Padhi P. K., Satapathy A., Analysis of Sliding Wear Characteristics of BFS Filled Composites Using an Experimental Design Approach Integrated with ANN. *Tribology Transactions* 56, 789-796, 2013.
- Pati P. R., Prediction and wear performance of red brick dust filled glass–epoxy composites using neural networks. *International Journal of Plastics Technology* 23, 253-260, 2019.
- Ray S., Parametric Optimization and Prediction of Abrasion Wear Behavior of Marble-Particle-Filled Glass–Epoxy Composites Using Taguchi Design Integrated with Neural Network. *JOM* 73, 2050-2059, 2021.
- Rodrigues D. D., Broughton J. G., Silane surface modification of boron carbide in epoxy composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 46, 62-73, 2013.
- Shtub A., Versano R., Estimating the cost of steel pipe bending, a comparison between neural networks and regression analysis. *International Journal of Production Economics* 62, 201-207, 1999.
- Singh K. K., Ansari M. T. A., Azam M. S., Fatigue life and damage evolution in woven GFRP angle ply laminates. *International Journal of Fatigue* 142, 105964, 2021.

- Subbaya K. M., Suresha B., Rajendra N., Varadarajan Y. S., Taguchi approach for characterization of three-body abrasive wear of carbon-epoxy composite with and without SiC filler. *Composite Interfaces* 19, 297-311, 2012.
- Sudheer M., Hemanth K., Raju K., Bhat T., Enhanced Mechanical and Wear Performance of Epoxy/glass Composites with PTW/Graphite Hybrid Fillers. *Procedia Materials Science* 6, 975-987, 2014.
- Suresha B., Chandramohan G., Sadananda Rao P. R., Sampathkumaran P., Seetharamu S., Influence of SiC filler on mechanical and tribological behavior of glass fabric reinforced epoxy composite systems. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 26(6), 565-578, 2007.
- Teli G., Mahakur V. K., Paul R. Bhowmik S., Investigation of Dry Sliding Tribological Behaviour of Epoxy Composites Filled with Hemp Particulates Using Artificial Neural Networks. *Arabian Journal for Science and Engineering* 48, 3989-4001, 2023.
- Thakur R. K. Singh K. K., Abrasive waterjet machining of fiber-reinforced composites: a state-of-the-art review. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 42, 381, 2020.
- Turaka S., Reddy K. V. K., Sahu R. K., Katiyar J. K., Mechanical properties of MWCNTs and graphene nanoparticles modified glass fibre-reinforced polymer nanocomposite. *Bulletin of Materials Science* 44, 194, 2021.
- Zhang Z., Friedrich K. Velten K., Prediction on tribological properties of short fibre composites using artificial neural networks. *Wear* 252, 668-675, 2002.
- Zhao F., Li G., Österle W., Häusler I., Zhang G., Wang T., Wang Q., Tribology International Tribological investigations of glass fiber reinforced epoxy composites under oil lubrication conditions. *Tribology International* 103, 208-217, 2016.