

TEPKİ YÜZEYİ TASARIMI VE YAPAY SİNİR AĞLARI YAKLAŞIMI UYGULANARAK EPOKSİ MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMENİN AŞINMA DAYANIMININ TAHMİNİ VE MODELLENMESİ

Necip Fazıl KARAKURT*^{ID}
Aysun SAĞBAŞ**^{ID}

Alınma: 30.03.2020; düzeltme: 24.10.2020; kabul: 28.10.2020

Öz: Yapılan çalışmada; inşaat, otomotiv ve havacılık gibi birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahip olan epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma davranışına etki eden faktörler incelenmiş olup, süreç optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Cam ve ferrokrom (karbür) katkı maddelerinin epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma dayanımına etkisini tahmin etmek için, Merkezi Birleşik Tasarım (MBT) uygulanarak toplam 18 deney noktasında 54 adet deney numunesi üretilmiştir. Üretilen numunelerin aşınma tepki değerleri ölçülerek Tepki Yüzeyleri Tasarımı (TYT) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) aşınma tahmin modelleri oluşturulmuş ve bu modellerin tahmin performansı değerleri karşılaştırılmıştır. YSA yaklaşımının, sınama setinin aşınma oranı tahmininde ortalama yüzde hata değeri (*MAPE*) %8,18 olarak hesaplanmış olup, TYT yaklaşımının *MAPE* değeri %9,42 olarak bulunmuştur. Tepki değişkenindeki değişkenliğin açıklanmasında ve epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma davranışının tahmin edilmesinde R^2 ve ortalama kare hata (*MSE*) istatistikleri de incelenmiş olup, bu istatistiklerde *MSE* için 1,317 ve R^2 için %81,1 değerleri ile TYT yaklaşımının YSA yaklaşımına göre daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, cam katkı oranının artması ile aşınma oranının büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Minimum aşınma oranı; küçük parçacıklarda cam ve ferrokrom katkı oranının sırasıyla %17,07 ve %2,93 olduğu, büyük parçacıklarda iki katkı oranının da %17,07 olduğu durumda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tepki yüzeyi tasarımı, aşınma, epoksi matrisli kompozit malzeme, regresyon, yapay sinir ağları.

Prediction And Modelling Wear Resistance of Epoxy Matrix Composite Using Artificial Neural Network and Response Surface Design

Abstract: Epoxy resin is a widely used material in various of industries especially construction, aviation and automotive. Factors that affect epoxy-based composite's wear rate have been investigated and process optimization has been conducted in this paper. In order to predict the effect of glass and ferrokrom reinforcement in wear resistance of epoxy, total number of 54 sample has been produced where design points are determined by Central Composite Design (CCD). After samples have been tested via wear test machine, results are compared with Artificial Neural Network (ANN) and Response Surface Methodology (RSM) wear predictions. Mean absolute percentage error (*MAPE*) shows that ANN (8.18%) outperforms RSM (9.42%) in terms of wear prediction accuracy. Mean square error (*MSE*) and R^2 statistics are also examined in order to explain variability in response variable and it is concluded that RSM yields better

* Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 59860, Tekirdağ/Çorlu

** Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 59860, Tekirdağ/Çorlu

İletişim Yazarı: Necip Fazıl KARAKURT (nfkarakurt@gmail.com)

results which are 1.317 and %81.1, respectively. Besides, it is found that glass reinforcement results in decrease in wear rate. Minimum wear rate for small sized particle is obtained at level where glass and ferrochromium reinforcement rates are 17.07% and 2.93%, respectively. For large sized particles, minimum wear rate is obtained where both reinforcements are at rate 17.07%.

Keywords: Response surface design, wear, epoxy matrix composite, regression, artificial neural networks.

1. GİRİŐ

Epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma davranışının tahmini ve modellenmesi Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmaları açısından oldukça önemlidir. Epoksi malzeme inşaat, havacılık ve otomotiv sanayi gibi farklı alanlarda; onarım, boyama, yüzey kaplama ve yapıştırma işlemleri için yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle fren sistemlerinde fren balatası olarak kullanıldığında, malzemenin aşınmaya karşı dirençli olması ve uzun süre yıpranmadan kullanılabilmesi gerekmektedir. Bu eksende malzemenin aşınma dayanıklılığının yüksek olması, kullanım ömrü ve etkinliğinin artırılmasında büyük önem arz etmektedir. Epoksiye üretimi sırasında eklenecek inorganik katkılar malzemeyi güçlendirir. Bu şekilde malzemenin aşınma dayanımının artırılması mümkündür (Briscoe ve diğ., 1974). Zhang ve diğ. (2004) yaptıkları çalışmada farklı katkılarla epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma dayanımında iyileştirmeler yapılabileceğini göstermişlerdir. Suresha ve diğ. (2006) çalışmalarında cam-epoksi kompoziti için farklı karışımlar denemişlerdir. SiC (Silisyum Karbür) katkısının eklendiği karışımın çalışmada kullanılan diğer karışımlara kıyasla aşınma dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. Kranthi ve Satapathi (2010), Siddharta ve diğ. (2011), Basaravajappa ve diğ. (2011) ve Rout ve Satapathy (2012) yaptıkları çalışmalarda malzeme karışımına farklı katkı malzemeleri ekleyerek epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma oranını en aza indirmeye çalışmışlardır.

Yapılan çalışmada; yüksek aşınma performansı gerektiren alanlarda ve uygulamalarda epoksi matrisli kompozit malzemenin kullanım ömrünün artırılması amacıyla, aşınmaya etki eden faktörler araştırılarak etki düzeyleri tahmin edilmiş ve süreç optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, belli oranlarda cam ve ferrokrom (karbür) tozları epoksi malzemeye eklenerek epoksi matrisli kompozit malzeme numuneleri oluşturulmuş ve oluşturulan numunelerin abrasif aşınma davranışı araştırılmıştır. Cam katkı oranı, karbür katkı oranı ve parçacık büyüklüğü girdi değişkenleri olarak seçilmiş olup, Tepki Yüzeyleri Tasarımı (TYT) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yaklaşımları ile aşınma tahmin modeli oluşturularak, aşınma tepki değişkeninin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışma literatürdeki birçok çalışmadan, kullanılan katkı maddelerinin cinsi ve uygulanan yöntem açısından farklılık göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmaların önemli bir bölümünde, cam ve karbür katkı maddeleri epoksi malzemeye ayrı ayrı denemelerde eklenerek kullanılmış olup, bu katkıların birlikte kullanımı durumunda epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma davranışının incelendiği çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca, literatürde yapılmış olan çalışmaların büyük bir kısmı aşınma test parametrelerinde değişiklik yaparak sadece bu parametrelerin aşınma tepki değişkeni üzerindeki etkisini tahmin etmeye yöneliktir. Yapılan çalışma ile; cam ve karbür katkılarının birlikte kullanılması durumunda; epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma davranışı, TYT ve YSA yaklaşımları ile karşılaştırılmalı biçimde araştırılmış ve optimum aşınma değerleri tahmin edilmiştir. Aşınma tepki değişkeninin girdi değişkenleri ile matematiksel olarak modellenmesinin çok zor olması nedeniyle, TYT ve YSA yaklaşımları bu süreçte önemli bir modelleme yaklaşımı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, literatürdeki çalışmaların önemli bir bölümünde, YSA yaklaşımının az sayıda parametresi ve sınırlı sayıda YSA mimarisi kullanılarak aşınma tahmin modelleri oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada ise; genelleştirilmiş regresyon ağı (GRNN), radyal tabanlı ağ (RBF) ve ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağları (FFBP) yaklaşımları ile çok sayıda YSA parametresinin etkisi dikkate alınarak, epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma davranışı modellenmiştir. Çalışmada, TYT çalışmalarında sıklıkla kullanılan deneysel tasarım yöntemlerinden Merkezi

Birleşik Tasarım (MBT) uygulanarak aşınma tahmin modeli oluşturulmuş olup, YSA ve TYT tahmin modellerinin performans karşılaştırması yapılarak optimum aşınma değerini sağlayan girdi değişkenlerinin değeri belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde YSA modellerinin; hızlı sonuç verdiği ve malzemenin mekanik özelliklerinin ve aşınma davranışının modellenmesinde tahmin hatasının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, TYT yaklaşımının malzeme özelliklerinin araştırılmasında ve tahmin edilmesinde sıklıkla kullanıldığı belirlenmiştir. Literatürde incelenen çalışmalar ekseninde; YSA ve TYT yaklaşımlarının epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma özelliklerinin tahmin edilebilmesi amacıyla birlikte kullanıldığı çok az çalışmaya rastlanmış olup, çalışmaların önemli bir bölümünde YSA yaklaşımı ve Taguchi metodunun kullanıldığı görülmüştür. Farklı kompozit malzemelerin aşınma davranışı ve farklı mekanik özelliklerinin tahmini ve modellenmesi konusunda yapılan çalışmaların özeti Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kompozit Malzeme Özelliklerinin Araştırılması Konusunda Yapılan Çalışmalar

Çalışmanın Adı	Yıl	Çalışmanın Amacı	Uygulanan Metodoloji	İncelenen Girdi Değişkenleri	Tepki Değişkeni
Interactions between HA/GO/epoxy resin nanocomposites: optimization, modeling and mechanical performance using central composite design and genetic algorithm	2019	Katkı maddelerinin epoksi kompozit malzeme özellikleri üzerindeki etkisi ve Genetik Algoritma (GA) ile aşınma optimizasyonu	Tepki Yüzevi, GA, Yapay Sinir Ağları, Karar Ağacı Yöntemi	Hidroksiapatit, grafenoksit katkı oranları	Basma mukavemeti ve katsayısı, eğilme mukavemeti ve katsayısı, uzama, enerji
Optimizing Wear Behavior of Epoxy Composites Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Networks	2018	Epoksi kompozit malzemenin aşınmasının çok amaçlı optimizasyonu	Yapay Sinir Ağları	Yük, kayma hızı, kayma mesafesi	Aşınma kütle kaybı, sürtünme katsayısı
Solid Particle Erosion Behavior of BFS-Filled Epoxy-SGF Composites Using Taguchi's Experimental Design and ANN	2014	BFS-epoksi kompozit malzemenin aşınma davranışının incelenmesi	Taguchi L ₁₆ Deneysel Tasarım, Yapay Sinir Ağları	Çarpma hızı, çarpma açısı, BFS, aşındırıcı büyüklüğü, aşındırıcı sıcaklığı	Aşınma oranı
Prediction and simulation of wear response of Linz-Donawitz (LD) slag filled glass-epoxy composites using neural computation	2014	LDS katkılı epoksi kompozit malzemenin aşınma performansının YSA ile incelenmesi	Taguchi Deneysel Tasarımı, Yapay Sinir Ağları	Çarpma hızı ve açısı, LDS oranı, aşındırıcı boyutu ve sıcaklığı	Aşınma oranı
Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al-SiCp composites using central composite design	2013	Alüminyumun aşınma davranışının incelenmesi	Merkezi Birleşik Tasarım	Hacim payı, matris ve güçlendirici parçacık büyüklüğü	Aşınma oranı
Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al ₂ O ₃ /B4C	2013	Toz metalürjisi ile üretilen alüminyum kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin tahmini	Yapay Sinir Ağları	Katkı büyüklüğü, katkı oranı ve parçacıkların işlem süresi	Yoğunluk, sertlik ve gerilme dayanımı

composites produced by powder metallurgy					
Analysis of dry sliding wear behaviour of rice husk filled epoxy composites using design of experiment and ANN	2012	Pirinç çeltiği ile güçlendirilmiş epoksi kompozit malzemenin aşınma dayanımının incelenmesi	Taguchi L ₁₆ Deneysel Tasarım	Kayma hızı, yük, kayma mesafesi	Aşınma oranı
Abrasive wear behaviour of hard powders filled glass fabric-epoxy hybrid composites	2011	Karbür katkı maddesinin epoksi kompozit malzemenin aşınma dayanımına etkisinin incelenmesi	Kontrollü Deneysel	Farklı karbür katkıları	Aşınma oranı
Abrasive Wear Behavior of Granite-Filled Glass-Epoxy Composites by SiC Particles Using Statistical Analysis	2011	Cam katkılı epoksi kompozit malzemenin aşınma dayanımının incelenmesi	Taguchi L ₂₇ Deneysel Tasarım	Yük, hız, mesafe, granit oranı	Aşınma sonrası kütle kaybı
Prediction of wear behaviour of A356/SiCp MMCs using neural networks	2009	A356/SiCp metal kompozit malzemenin aşınma davranışının tahmini	Yapay Sinir Ağları	SiC parçacık büyüklüğü, SiC katkı oranı, uygulanan yük	Aşınma oranı
Prediction on wear properties of polymer composites with artificial neural networks	2007	Polimer kompozitlerin aşınma tahmininin yapılması	Yapay Sinir Ağları	Malzeme yapısı, ölçüm parametreleri	Mekanik özellikler, aşınma karakteristiği
Modeling of tribological properties of alumina fiber reinforced zinc-aluminum composites using artificial neural network	2003	Fiber katkıyla alüminyum kompozitin aşınma dayanımının modellenmesi	Yapay Sinir Ağları	Kullanılan fiber oranı, Yük	Aşınma oranı, sürtünme çarpanı
Prediction on tribological properties of short fibre composites using artificial neural networks	2002	Çok katmanlı YSA kullanımı ile tepki değişkenlerinin tahmini	Yapay Sinir Ağları	Malzeme bileşimi, mekanik özellikler, ölçüm parametreleri	Aşınma oranı, sürtünme çarpanı

3. ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEME VE UYGULANAN METODOLOJİ

Yapılan çalışmada; birçok olumlu özelliği nedeniyle elektronik, kimya, inşaat, tekstil, plastik ve otomotiv sektörlerinde yaygın bir kullanıma sahip olan epoksi malzemenin aşınma dayanımının artırılması amacıyla, farklı katkı maddeleri (cam ve karbür) eklenerek epoksi matrisli kompozit malzeme numuneleri üretilmiştir. Epoksi matrisli kompozit malzeme deney numunelerinin üretiminde “L285” kodlu reçine ve “H285” kodlu sertleştirici ana malzeme olarak kullanılmıştır. Epoksi matrisli kompozit malzeme, aşınmaya karşı koruyucu malzeme olarak kullanıldığından, aşınma oranının minimize edilmesi oldukça önemlidir. Epoksi matrisli kompozit malzeme dayanımının artırılması amacıyla kullanılan girdi faktörleri; karbür ve cam katkı oranı (devamlı faktörler) ve katkı büyüklüğü (kategorik faktör) olarak belirlenmiştir. Katkı büyüklüğü faktörü için deneysel tasarımda en düşük seviye 0-50 µm (küçük parçacıklar) ve en yüksek seviye 50-75 µm (büyük parçacıklar) seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu seviyeler çalışmanın yapıldığı laboratuvarında bulunan eleklerle göre seçilmiştir. Bir adet 50 µm elek ve bir adet 75 µm elek yardımı ile karbür ve cam parçacıkları sırasıyla elenerek, 50 µm altı ve 50-75 µm arası olacak şekilde katkı boyutlarına göre ikiye ayrılmıştır. Boner (1962) ve Rothon’a (1997) göre µm boyutundaki parçacıkların katkı olarak kullanılmasında, %20’nin üzerindeki seviyeler; malzemenin görünüşü, yoğunluk ve yıpranma gibi özellikler açısından malzemeyi olumsuz

şekilde etkilemektedir. Bu nedenle, oluşturulan deneysel tasarım noktalarında literatürde belirtilen değerler esas alınmıştır. Tüm deney noktalarında üç deney tekrarı gerçekleştirilmiş olup, kodlanmış ve gerçek değişkenler için katkı faktör seviyeleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan Katkı Maddeleri İçin Deneysel Tasarımı Noktaları

Cam ve Karbür Katkı Büyüklüğü	Kodlanmış Değişken	Gerçek Değişken (μm)
	-1	0-50
	1	50-75
Cam ve Karbür Katkı Oranı	Kodlanmış Değişken	Gerçek Değişken (%)
	-1,41421	0
	-1	2,929
	0	10
	1	17,071
	1,41421	20

Elde edilen karışım bir karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Karbür parçacıkları ağır olduğundan, küçük parçacıklar için 30 dakika, büyük parçacıklar için 40 dakika bekleme süresi ile epoksi matrisli kompozit malzemede kısmi katılaşma başladıktan sonra, karışımlar tekrar karıştırılmıştır. Bekleme sonrasında karıştırma işleminin tekrarlanması, dibe çöken katkının minimize edilmesi ve tekrar homojenliğin sağlanması hususunda gereklidir. Kalıba döküldükten sonra, oda sıcaklığında bir gün bekletilen deney numunesinin üretimi tamamlanmıştır. Tüm deney numuneleri (54 adet) için bu işlem aynı koşullarda tekrarlanmıştır. Kullanılan kalıp ile üretilen numuneler silindirik şekilde olup, çapı 10 mm, yüksekliği 24 mm ölçülerdedir.

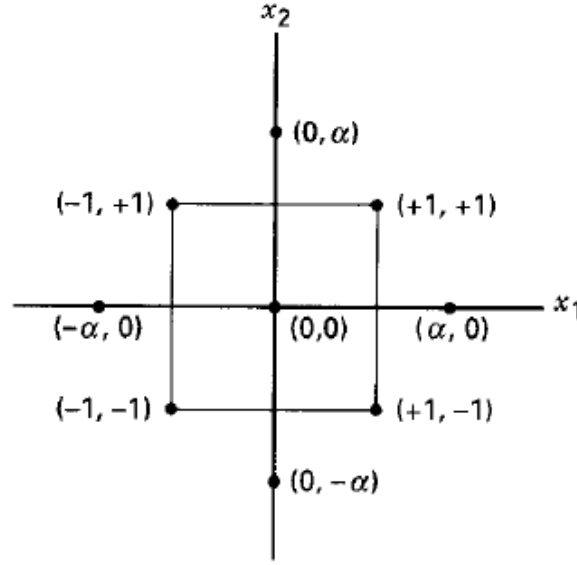
Aşınma testi, aşınma cihazına dönüştürülen torna tezgahında yapılmıştır. Test cihazında, pin on ring yöntemiyle numuneye abrasif aşınma uygulanmıştır. Abrasif aşınma, tambura sarılı aşındırıcı yüzey olan zımpara kâğıdı ile numunelerin sürtünmesiyle oluşmaktadır. Kullanılan aşınma test cihazı Şekil 1’de verilmiştir. Aşınma testi için 184 devir/dakika hızla dönen ve çapı 165 mm olan tambura 320 kumluk zımpara kâğıdı sarılmıştır. Yukarıdan 1480 g ağırlığındaki yükün etkisiyle numuneler 30 saniye boyunca zımpara kağıdına maruz bırakılmıştır. Testten önce hassas terazide kütleleri ölçülen numunelere testin uygulanmasından sonra tekrar ölçüm yapılarak aşınma ile oluşan kütle kaybı, aşınma oranı (%) olarak belirlenmiştir.



şekil 1:
Aşınma Testinde Kullanılan Cihaz

Çalışmada TYT metodolojisi kullanılmış olup, uygulanan yaklaşımda faktörlerin tepki değişkenine olan etkisinin, faktör etkileşimlerinin ve tepkinin tahmini amacıyla Varyans Analizi (ANOVA) yapılmış ve regresyon modeli oluşturulmuştur. TYT modelleme yaklaşımında toplanan verilerin analizi, Design Expert programı ile gerçekteşirilmış olup, Minitab ve SPSS programlarından da faydalanılmıştır. TYT tahmin modeli oluşturulduktan sonra YSA yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda MatLab programı ile veri analizi ve ağların eğitimi gerçekteşirilerek numunelerin aşınma davranışı araştırılmıştır. Farklı yapıda YSA'lar oluşturulmuş ve bu ağlar 54 adet TYT modelinde kullanılan veri ile eğitilmıştir. Bu ağ yapıları GRNN, RBF ve FFBP olarak üç gruba toplanmıştır. Eğitim için GRNN ve RBF ağlarında farklı yayılma katsayıları, FFBP ağlarında ise farklı nöron sayıları, aktivasyon fonksiyonları ve öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Ağların eğitimi sonrasında sına ma seti oluşturulmuş ve eğitimde kullanılmayan bu setteki aşınma verisi ile ağların başarı durumları karşılaştırılmıştır. Belirlenen kriterler bazında farklı YSA modelleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Alternatif YSA yapıları arasında en başarılı olan YSA modelinin performansı TYT modelindeki ile karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. YSA, öğrenme süreci için belirli kuralları olmayan sistemler olduğu için çalışmada deneme yanılma yoluyla yüksek sayıda alternatif ağ denenerek tahmin doğruluğu en yüksek olan ağ belirlenmiştir.

TYT metodolojisi, bağımsız değişkenlerle (faktör) bağımlı değişkenler (tepki) arasındaki ilişkinin tahmin edilmesi ve optimize edilmesi amacıyla kullanılan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bütünüdür. Birden çok faktör ve bunların etkileşimleri söz konusu olduğunda TYT uygun bir metodolojidir. TYT yaklaşımında; modelleme ve optimizasyon çalışmalarında, MBT ve faktöriyel tasarım gibi farklı deneysel tasarımları kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada kompozit tasarımı yapıldığından MBT kullanılmıştır. MBT, faktöriyel tasarım noktalarına ilave olarak (α) tasarım noktaları ile sistemi daha detaylı analiz ederek, sistemin daha geniş çalışma aralıklarında modellenenebilmesi amacıyla kullanılmaktadır. İki farklı girdi değişkeni (X_1 ve X_2) için MBT'nin geometrik gösterimi şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2:
MBT'nin Kübik Gösterimi (Montgomery, 2001)

TYT yaklaşımında; birinci dereceden genel regresyon denklemi eşitlik (1) ile gösterilmiştir (Khuri ve Mukhopadhyay, 2010). En küçük kareler metoduyla hesaplanan regresyon katsayılarının %95 güven aralığındaki değerleri için alt ve üst sınırlar eşitlik (2) ile hesaplanmaktadır (Montgomery, 2001).

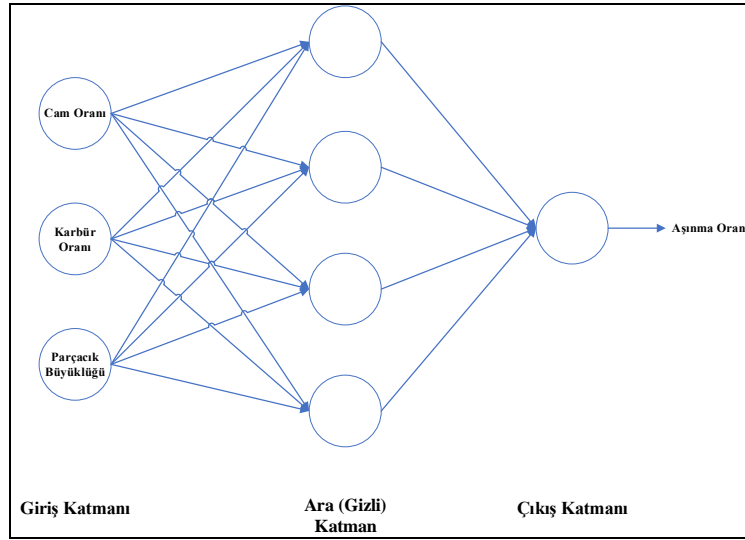
$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (1)$$

$$\hat{\beta}_i - t_{\alpha/2, n-p} se(\hat{\beta}_i) \leq \beta_i \leq \hat{\beta}_i + t_{\alpha/2, n-p} se(\hat{\beta}_i) \quad (2)$$

Eşitlik (1) ile gösterilen genel regresyon denkleminde Y bağımlı değişkeni ile X bağımsız değişkeni arasındaki bağıntı görülmektedir. Burada β_i terimleri regresyon katsayılarını ifade ederken, ε terimi tahmin hatasını göstermektedir. Eşitlik (2) ile verilen denklemde ise β_i terimleri için belirlenen alfa seviyesi ve serbestlik derecesindeki güven aralığı verilmiştir. Burada t değeri, t dağılım tablosu yardımıyla belirlenir ve β_i değerinin standart hatasıyla çarpılarak eşitliğin sağ tarafına eklenip sol tarafından çıkartılır. Böylece güven aralığının alt ve üst sınırları bulunur.

Aşınma oranının matematiksel olarak kolayca modellenememesi nedeniyle, aşınmanın tahmini ve optimizasyonu çözümü zor problemlerdendir. Modelleme sürecinde karşılaşılan bu zorluğun üstesinden gelebilmek için, son yıllarda YSA yaklaşımı bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Matematiksel olarak modellenmesi zor olan sistemlerde, YSA öğrenmeyi gerçekleştirdikten sonra öğrendiği bilgiyi genelleyerek, yeni bilgiler üretmekte ve bu genelleme yardımıyla daha sonra karşılaştığı yeni veriyi yorumlayabilmektedir. YSA'da nöronlar birbirlerine belirli ağırlık değerine sahip ağlarla bağlıdır. YSA yaklaşımlarında, ağların çalışma şekli tam olarak açıklanamamış olup, ağ parametrelerinin seçimi için belirli bir kriter, istatistik

veya metodoloji henüz kesin olarak belirlenememiştir. Ağın eğitilmesi sürecinin ne zaman sonlandırılacağı da tam olarak bilinmemektedir. Bu dezavantajlarına rağmen YSA; sınıflandırma, tahmin, optimizasyon ve örüntü tanıma gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Öztemel, 2012). YSA, girdi ile çıktı arasındaki ilişkiyi verilecek temel kurallar ile öğrenmek yerine, danışman tarafından sağlanan veriyi kullanarak deneme-yanılma (ağırlıkların güncellenmesi) yoluyla öğrenmektedir. Karşılaşılan problemin çözümü için literatürde geliştirilmiş bir kural tabanı bulunmamaktadır. YSA yaklaşımında; başlangıçtaki ağırlıklar ve yanlılık (bias) değerleri rassal olma özelliğine sahiptir. Bu nedenle farklı alternatiflerin denenerek tahmin gücünün ölçülmesi, YSA ile problem çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada, farklı ağ mimarileri kullanılarak 57 adet ağ alternatifi oluşturulmuştur. FFBP (Şekil 3), GRNN ve RBF mimarilerinin oluşturulmasından sonra, bu ağlar TYT modelinin oluşturulmasında kullanılan 54 adet aşınma deney verisi kullanılarak eğitilmiştir.



Şekil 3:
Dört Nöronlu FFBP Yapısı

YSA yaklaşımında, MatLab programı ile veri analizi gerçekleştirilmiştir. Ağların geçerlilik testi için dışarıda tutma (hold-out) metodu kullanılmıştır. Bu metotta eğitimi tamamlanan ağların performansının değerlendirilebilmesi amacıyla rassal ve bağımsız bir sına (test) seti oluşturulur. Ağın tahminleri bu sına setinin gözlem sonuçları ile karşılaştırılır ve ağın tahmin gücü belirlenir. Fazla sayıda ağın kullanıldığı ve eğitildiği çalışmalarda zaman önemli bir kısıt olduğundan, bu doğrulama yöntemi seçilmiştir. MatLab programının eğitim parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmadan GRNN, RBF ve FFBP ağlarının eğitimleri yapılmıştır. Eğitimde; GRNN ve RBF ağları için farklı yayılma katsayıları, FFBP ağı için farklı nöron sayıları, aktivasyon fonksiyonları ve öğrenme algoritmaları kullanılmıştır. Ağların eğitimi sonrasında, ağın daha önce karşılaşmadığı bir sına seti oluşturmak üzere numune üretimleri yapılmış ve bu setteki numunelerin aşınma verisi ile ağların başarı durumları karşılaştırılmıştır. Çalışmada 54 adet veri ile eğitilen ağları ve oluşturulan TYT modelini test için 18 adet sına verisi kullanılmıştır. Farklı YSA modellerinin performanslarını karşılaştırmak için; R^2 , ortalama kare hata (MSE) ve ortalama mutlak yüzde hata (MAPE) olmak üzere üç farklı performans kriteri belirlenmiş olup, bu kriterler bazında alternatif YSA yapıları arasında en başarılı olan YSA modelinin performansı, TYT modelinin performansı ile karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

4. AŞINMA TAHMİN MODELİ VE İSTATİSTİKSEL ANALİZ

4.1. Aşınma Test Sonuçları

MBT ile belirlenen deney noktalarında üretilen numuneler için, abrasif aşınma testleri gerçekleştirilmiş olup, 54 deney numunesi için elde edilen sonuçlar Tablo 3 ile verilmiştir.

Tablo 3. Test Sonuçları

Numune	Cam Oranı (%)	Karbür Oranı (%)	Katkı Büyüklüğü (µm)	Aşınma (%)
1	2,929	2,929	0-50	9,87
2	2,929	2,929	0-50	10,01
3	2,929	2,929	0-50	9,84
4	17,071	2,929	0-50	9,80
5	17,071	2,929	0-50	8,13
6	17,071	2,929	0-50	9,40
7	2,929	17,071	0-50	10,85
8	2,929	17,071	0-50	10,70
9	2,929	17,071	0-50	12,18
10	17,071	17,071	0-50	10,71
11	17,071	17,071	0-50	9,61
12	17,071	17,071	0-50	8,70
13	0	10	0-50	11,96
14	0	10	0-50	12,73
15	0	10	0-50	10,70
16	20	10	0-50	10,84
17	20	10	0-50	8,21
18	20	10	0-50	10,85
19	10	0	0-50	11,47
20	10	0	0-50	10,11
21	10	0	0-50	9,50
22	10	20	0-50	12,98
23	10	20	0-50	11,08
24	10	20	0-50	12,89
25	10	10	0-50	8,17
26	10	10	0-50	9,27
27	10	10	0-50	9,72
28	2,929	2,929	50-75	11,09
29	2,929	2,929	50-75	10,45
30	2,929	2,929	50-75	9,76
31	17,071	2,929	50-75	12,46
32	17,071	2,929	50-75	9,12
33	17,071	2,929	50-75	11,42
34	2,929	17,071	50-75	13,85
35	2,929	17,071	50-75	11,96
36	2,929	17,071	50-75	12,70
37	17,071	17,071	50-75	9,53
38	17,071	17,071	50-75	8,49
39	17,071	17,071	50-75	9,20
40	0	10	50-75	9,11
41	0	10	50-75	9,74
42	0	10	50-75	10,97
43	20	10	50-75	9,30
44	20	10	50-75	7,81
45	20	10	50-75	9,71
46	10	0	50-75	19,49
47	10	0	50-75	18,42
48	10	0	50-75	19,12
49	10	20	50-75	12,81
50	10	20	50-75	16,05
51	10	20	50-75	15,09
52	10	10	50-75	15,48
53	10	10	50-75	18,61
54	10	10	50-75	17,51

4.2. TYT Aşınma Tahmin Modeli

Aşınma deney sonuçlarının istatistiksel analizi için ANOVA testi uygulanacağından, öncelikle testin yapılabilmesi için gerekli olan; normallik, varyansların homojenliği ve uç noktaların olmaması varsayımları test edilmiş ve verinin ANOVA'ya uygun olduğu görölmüştür. Aşınma verisinin Design Expert programında analiz edilmesi sonucunda elde edilen ANOVA tablosu Tablo 4 ile verilmiştir.

Tablo 4. Aşınma Modeli ANOVA Tablosu

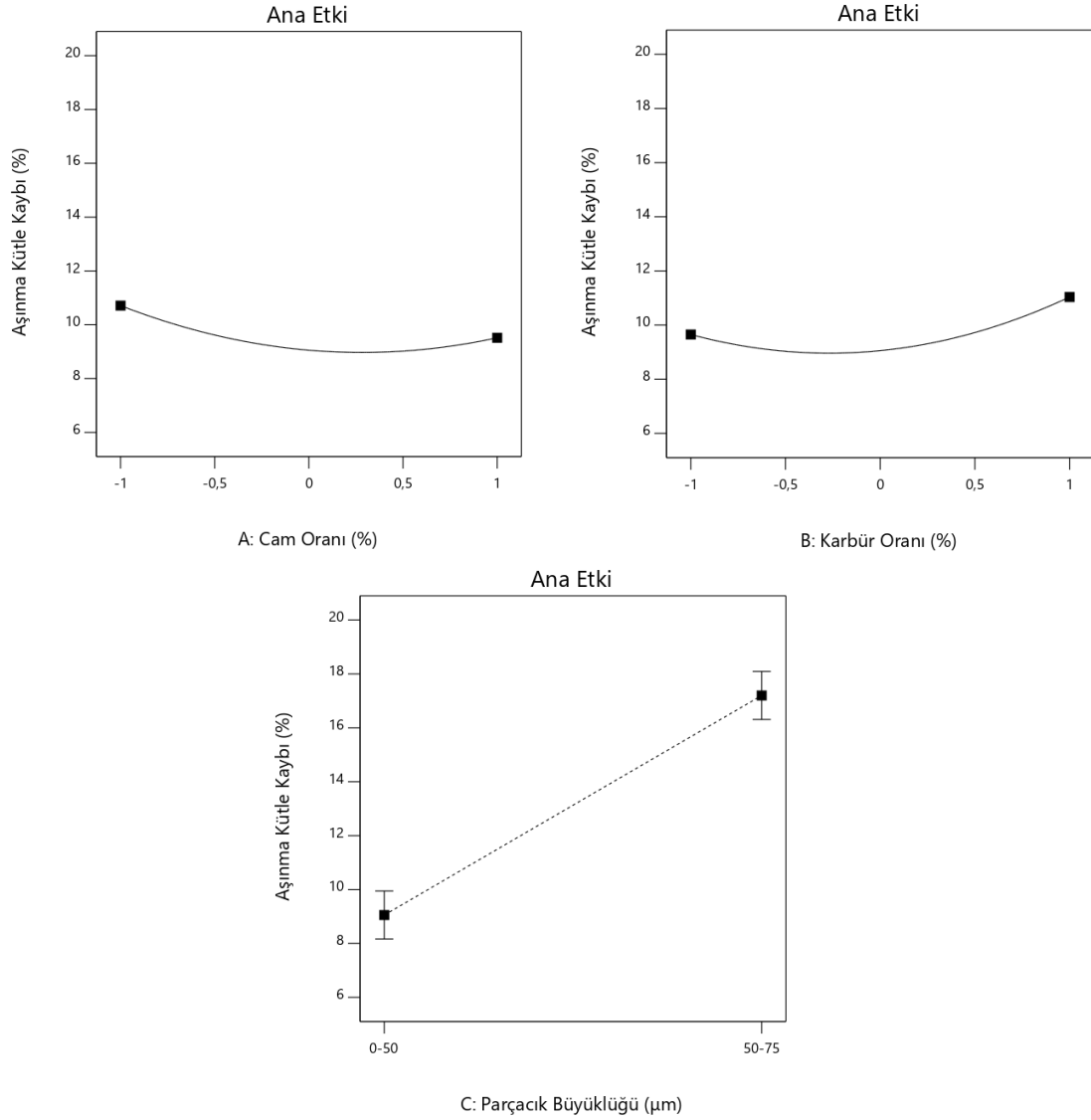
Terim	Kareler Toplamı	Ortalama Kare	F-değeri	p-değeri
Model	412,76	25,80	20,99	<0.001*
A-Cam Oranı	6,01	6,01	4,89	0,033*
B-Karbür Oranı	4,35	4,35	3,54	0,067*
C-Parçacık Büyüklüğü	99,55	99,55	81,01	<0.001*
AB	9,78	9,78	7,96	0,008*
AC	0,52	0,52	0,42	0,520
BC	29,96	29,96	24,38	<0.001*
A ²	35,25	35,25	28,68	<0.001*
B ²	3,66	3,66	2,98	0,093*
ABC	4,73	4,73	3,85	0,057*
A ² B	6,27	6,27	5,10	0,030*
A ² C	112,96	112,96	91,92	<0.001*
AB ²	0,4610	0,46	0,38	0,544
B ² C	11,46	11,46	9,32	0,004*
A ² B ²	35,18	35,18	28,63	<0.001*
A ² BC	10,57	10,57	8,60	0,006*
AB ² C	0,75	0,75	0,61	0,439
Artık	45,47	1,23		
Toplam	458,23			

*: Modelde kullanılacak terimler

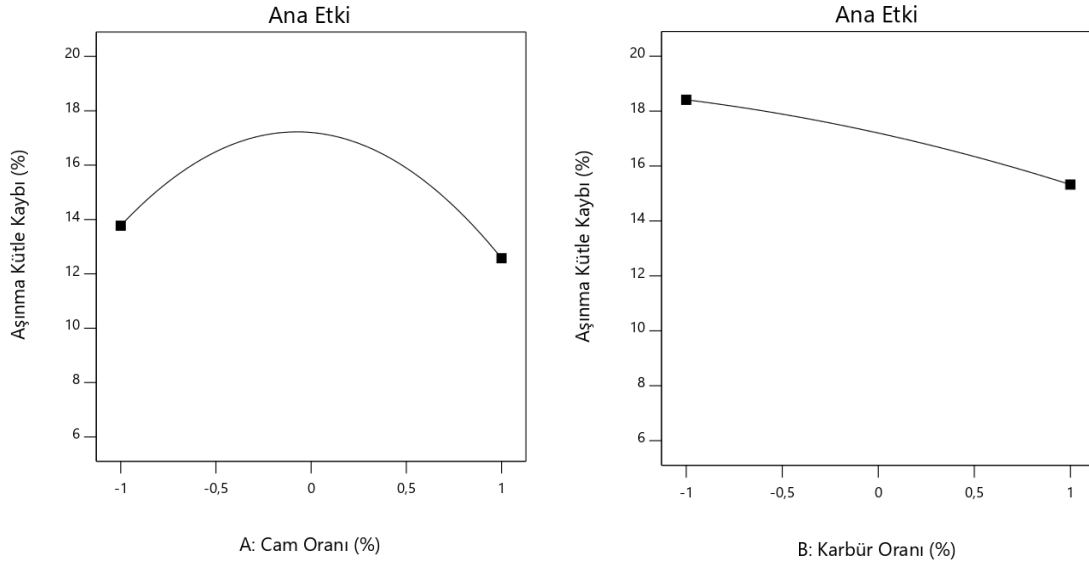
Modelin anlamlılık değerinin (p), %5 olarak seçilen anlamlılık düzeyinden küçük olması nedeniyle, oluşturulan aşınma modelinin anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Modelde (*) ile işaretlenmiş terimler, istatistiksel olarak aşınma üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğu belirlenen terimler olup tahmin modelinde kullanılmışlardır. Tablo incelendiğinde; ana etkiler için parçacık büyüklüğü (C) faktörünün abrasif aşınma üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu, cam oranı girdi değişkenin de aşınma üzerindeki etkisinin önemli olduğu görölmektedir. Ana etki grafikleri Şekil 4 ve Şekil 5 ile verilmiştir. Ana etki grafiklerinde cam ve karbür oranı için, kodlanmış değişken seviyelerinin gerçek değişken seviyesi karşılıkları Tablo 5 ile verilmiştir.

Tablo 5. Cam Oranı ve Karbür Oranı İçin Kodlanmış ve Gerçek Değişken İlişkisi

Kodlanmış Değişken	Gerçek Değişken (%)
-1	2,929
-0,5	6,465
0	10
0,5	13,536
1	17,071



Şekil 4:
Aşınma Tepki Değişkeni İçin Ana Etkiler Grafiği (Küçük Parçacıklar)



Şekil 5:
Aşınma Tepki Değişkeni İçin Ana Etkiler Grafiği (Büyük Parçacıklar)

Ana etkiler grafiği incelendiğinde; küçük parçacık büyüklüğü kullanıldığında cam oranı (0) ile (0,5) aralığında iken aşınma oranının minimum olduğu görülmüştür. Benzer şekilde karbür oranının (-0,5) ile (0) aralığında olduğu durumda da aşınma minimum olmaktadır. Parçacık büyüklüğü bazında bakıldığında; küçük parçacıkların kullanımıyla aşınmanın %8-10, büyük parçacıkların kullanımıyla aşınmanın %16-18 değer aralığında olduğu görülmektedir. Büyük parçacık kullanıldığında; cam katkı oranı üst seviyede iken aşınma değeri minimum olmuştur. Epoksi malzemeye eklenen cam katkı maddesinin, deneysel tasarımın orta noktasına (0) kadar aşınma değerini artırdığı görülmüştür. Orta noktadan sonraki cam katkı oranındaki artış aşınma oranında azalma meydana getirmiştir. Deneysel tasarım sınırları içerisinde karbür katkı oranının arttırılması, abrasif aşınma oranının %16 seviyesinin altına kadar azalmasına neden olmuştur. Sonuç olarak; küçük parçacık büyüklüğünde karbür tozu oranındaki artışın aşınmaya etkisi olumsuz iken, cam tozu oranındaki artışın aşınmaya olumlu etki etmiştir. Büyük parçacık büyüklüğünde ise; cam katkı oranının (0) seviyesi ve karbür oranının (-1) seviyesi aşınma miktarını olumsuz etkilemiştir. Karbür oranının artışı aşınmayı azaltıcı etki göstermiştir. Aşınma oranı, özellikle parçacık büyüklüğünün yüksek olduğu durumlarda, cam ve karbür oranı değişimlerinden yüksek oranda etkilenmiştir. Bu etkilenme küçük katkı büyüklükleri için daha düşük seviyede olmuştur. Küçük parçacıklarda karbür tozu artışı genel olarak aşınma üzerinde olumsuz etki gösterirken, büyük parçacıklarda bu artış olumlu olmuştur.

Ana etkilerin yanı sıra, ikili ve üçlü etkileşim terimlerinin de incelenmesiyle abrasif aşınma üzerinde etkisi önemli olan ve modele dahil edilecek terimler belirlenmiştir. Modele dahil olan terimlerle elde edilen aşınma tepki değişkeni regresyon denklemi eşitlik (3) ile verilmiştir. Eşitlik 3'te; A, B ve C terimleri modelin girdi değişkenleri olup, kodlanmış seviyeler için verilmiştir.

$$y_{Aşınma} = 13,13 - 0,60A - 0,43B + 4,07C - 0,64AB - 1,12BC - 1,48A^2 + 0,48B^2 - 0,44ABC + 0,72A^2B - 2,54A^2C - 0,81B^2C - 1,71A^2B^2 + 0,94A^2BC \quad (3)$$

A: cam oranı, B: karbür oranı, C: parçacık büyüklüğü

Çalışmada kullanılan kodlanmış girdi değişkeni ile gerçek değişken arasındaki ilişki eşitlik (4) ile verilmiştir. Orta nokta ve yarı genişlik terimleri, kullanılan tasarım aralığının parametreleri olup 10 olarak belirlenmiştir.

$$x_i = \frac{(X_i - X_0)}{\Delta X_i} \quad (4)$$

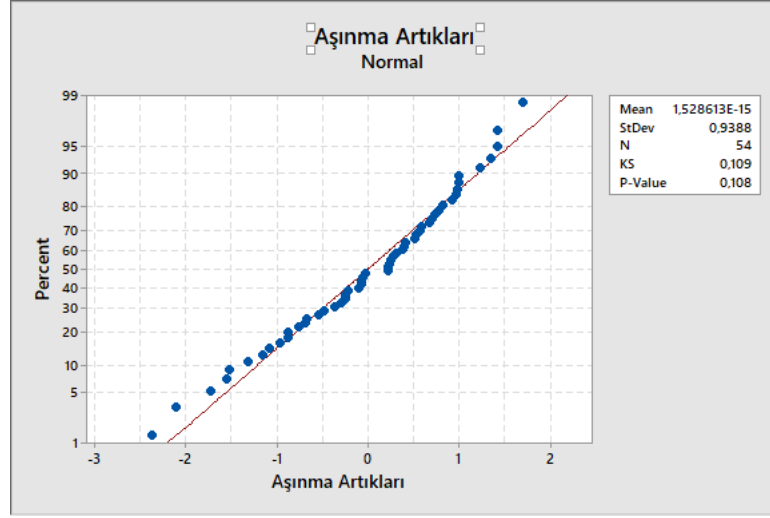
X_0 : orta nokta X_i : gerçek değişken
 x_i : kodlanmış değişken ΔX_i : yarı genişlik

Regresyon modelinin uyum istatistikleri (R^2 , $R^2_{düzeltmiş}$, R^2_{tahmin}) Tablo 6 ile verilmiş olup, elde edilen model istatistiklerinin tahmin gücünün %80-90 aralığında olduğu belirlenmiştir. Aşınma tepki değişkeni modelinin R^2 , R^2_{tahmin} ve $R^2_{düzeltmiş}$ değerlerinin %80'in üzerinde olması modelin tahmin gücünün yüksek olduğunu göstermektedir. Test sonucu elde edilen gözlem verisinin %89,81'lik bölümü, çizilen regresyon eğrisinin üzerine düşmektedir. Dolayısı ile tepkideki değişimlerin %89,81'i model ile açıklanabilmektedir. R^2_{tahmin} ve $R^2_{düzeltmiş}$ değerleri arasındaki fark 0,2'den küçük olduğundan aralarında bir uyumsuzluk olmadığı görülmüştür. Kesinlik yeterliliği 18,94 olarak bulunmuş ve modelin yeterli olduğu belirlenmiştir.

Tablo 6. Regresyon Modelinin Uyum İstatistikleri

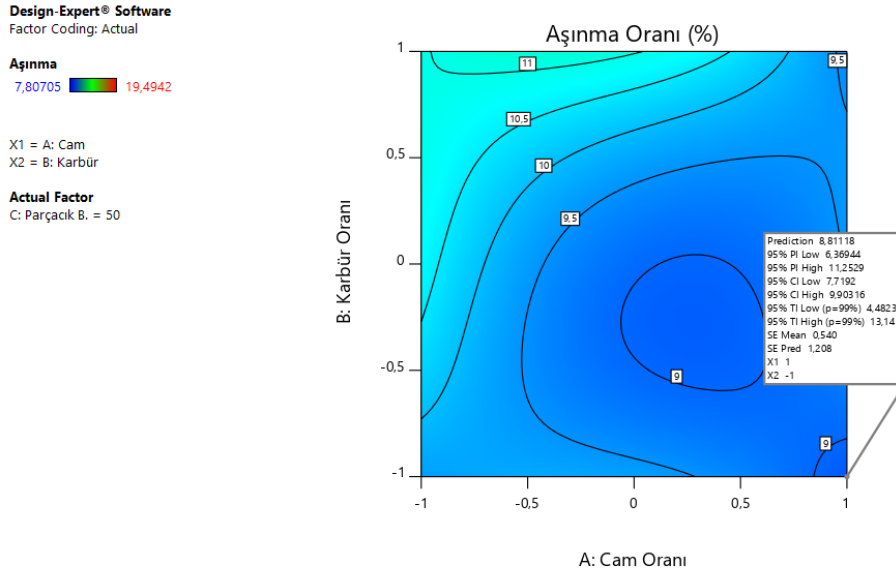
İstatistik	Aşınma Modeli
R^2	0,8981
$R^2_{düzeltmiş}$	0,8649
R^2_{tahmin}	0,8108
Kesinlik Yeterliliği	18,9402

Regresyon modeli kullanılarak elde edilen tahmini değerler ile gözlem değerleri arasındaki fark (artık değerler) modelin tahmin gücünü ve yansız olduğunu göstermek için analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen artıkların normallik grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir. Veri adedi 50'den büyük olduğundan artıklar için Kolmogorov-Smirnov normallik testi uygulanmıştır. Bu testte p değerinin anlamlılık değeri olan %5'ten büyük olduğu durumda sıfır hipotezi kabul edilerek verinin normal dağıldığı sonucuna ulaşılır (Ghasemi ve Zahediasl, 2012). Şekil 6'da artıkların ortalamasının sıfır olduğu ve normallik testi için oluşturulan p değerinin 0,05'ten yüksek olduğu görülmüştür.



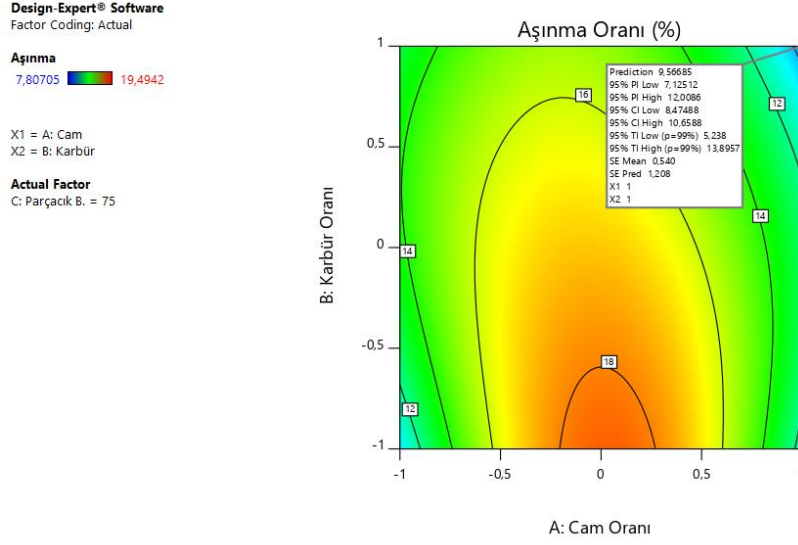
Şekil 6:
Model Artıklarının Normallik Testi

Model artıklarının sıfırın etrafında ve normal dağılması, modelin yansız ve iyi bir tahminleyici olduğunu göstermektedir. Aşınma oranını optimize eden girdi değişkenlerinin değeri farklı parçacık büyüklükleri için Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 7:
Aşınma Tepki Değişkeninin İzdüşüm Grafiği (Küçük Parçacıklar)

Şekil 7’de görüldüğü üzere; küçük parçacıklar için aşınmanın minimum olduğu nokta %8,81 değeri ile cam oranı ve karbür oranının (1, -1) olduğu nokta olarak belirlenmiştir. Aşınmayı minimize eden ikinci optimum noktanın ise; %8,89 aşınma değeri ile cam ve karbür oranının (0,274, -0,269) olduğu nokta olarak tespit edilmiştir.

**Şekil 8:**

Aşınma Tepki Değişkeninin İzdüşüm Grafiği (Büyük Parçacıklar)

Şekil 8 incelendiğinde; büyük parçacıklar için aşınma oranını %9,56 değeri ile minimum yapan cam ve karbür katkı maddelerinin optimum seviyesinin (1, 1) noktası olduğu belirlenmiştir.

Aşınma direnci; çalışmada kullanılan katkı büyüklüğü açısından ana etkiler grafiği bazında incelendiğinde; karbür katkı maddesinin cam katkı maddesine kıyasla aşınma direncini daha çok arttırdığı gözlenmiştir. Bu sonuç, Suresha ve diğ. (2006) çalışmasında elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Ancak küçük parçacık özelinde karbür seviyesinin %10'un üzerine çıkmasının aşınma direncini düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır.

4.3. YSA Aşınma Tahmin Modeli

YSA yaklaşımı için uygun ağı seçimi sürecinde deneme yanılma sistematiği kullanılmıştır. Bu kapsamda; 4 adet GRNN, 5 adet RBF ve 48 adet FFBP olmak üzere 57 farklı ağ eğitilmiştir. Ağların eğitiminde TYT model oluşturma aşamasında kullanılan 54 adet aşınma verisi kullanılmıştır. Eğitimi tamamlanan ağların performansları oluşturulan 18 adet sınav seti verisi ile test edilmiştir. GRNN ve RBF ağlarının eğitiminde sadece yayılma katsayısında değişiklik yapılmıştır. GRNN'de yayılma katsayısı olarak 0,05, 0,1, 0,15 ve 0,2 değerleri kullanılmıştır. GRNN ağı modelinde dört farklı ağ oluşturulmuş olup, eğitilen dört alternatif ağı sınav seti sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. En başarılı tahmin yapan ağ 0,2 yayılma katsayısına sahip ağ olmuştur.

Tablo 7. GRNN Sınama Veri Seti Sonuç İstatistikleri

Sınama Veri Seti		MAPE	R ²	MSE
Yayılma Katsayısı	0,05	14,00	53,44	4,47
	0,1	13,92	53,79	4,41
	0,15	12,52	60,42	3,46
	0,2*	10,04	68,58	2,21

RBF ağıının eğitimi sırasında hedeflenen *MSE* istatistiği tüm ağlar için 0,001 olarak belirlenmiştir. Tablo 8 ile verilen sonuçlar incelendiğinde, en başarılı ağ yayılma katsayısı 0,7 olarak seçilen ağ olmuştur.

Tablo 8. RBF Sınama Verisi Sonuç İstatistikleri

Sınama Veri Seti	<i>MAPE</i>	R^2	<i>MSE</i>	
Yayılma Katsayısı	0,1	16,82	1,78	4,37
	0,3	11,45	66,59	2,56
	0,5	11,78	71,41	2,74
	0,7*	9,62	76,51	1,55
	0,9	10,13	76,78	1,57

GRNN ve RBF ağlarına ek olarak FFBP ağları oluşturulmuş ve bu ağların eğitim ve testleri tamamlanmıştır. İleri beslemeli geri yayımlı ağlarda iki farklı öğrenim algoritması; Levenberg-Marquardt (LM) ve Değişken öğrenme hızlı geri yayılım (GDX) kullanılmıştır. Dört farklı gizli katman nöron sayısı (4, 8, 12 ve 16) ve üç farklı transfer fonksiyonu; Log-sigmoid (logsig), Hiperbolik Tanjant Sigmoid (tansig) ve Lineer Transfer Fonksiyonu (purelin) kullanılarak 48 adet alternatif ağ oluşturulmuştur. FFBP ağlarının sınama verisi ile performans ölçümü sonrasında 48 adet ağın *MAPE* değerleri %8 ile %18 aralığında bulunmuştur. Çalışmada kullanılan üç farklı YSA yapısının performans istatistiği ortalaması Tablo 9 ile verilmiştir.

Tablo 9. Aşınma Tahmin Modeli İçin Yapay Sinir Ağları Performansı

	<i>MAPE</i>	R^2	<i>MSE</i>
GRNN	12,62	59,06	3,64
RBF	11,96	58,61	2,56
FFBP	12,39	61,36	3,65

Tablo 9 incelendiğinde; *MAPE* istatistiği için, RBF ağ yapısı tahmin gücü en yüksek ağ olmuştur. *MSE* istatistiği için, GRNN ve FFBP yakın sonuçlar verirken RBF ağ yapısının diğer iki YSA modeline kıyasla daha başarılı tahmin yapmış olduğu görülmüştür. R^2 istatistiğine göre, FFBP ağ yapısı daha iyi sonuç vermiştir.

TYT modeli ile tahmin gücü açısından karşılaştırmak üzere, kullanılan 57 ağın arasından *MAPE* değeri en düşük olup diğer iki istatistikte de iyi sonuçlar vermiş olan bir ağ seçilmiştir. En başarılı YSA olarak seçilen bu ağ, 48 adet FFBP alternatiflerinden birisi olup katmanlarda sırasıyla tansig ve logsig fonksiyonları kullanılan, 16 nörondan oluşan ve öğrenmesi GDX ile gerçekleşen bir ağıdır.

4.4. TYT ve YSA Model Performansı

TYT ve YSA yaklaşımlarının aşınma tahmin modeli sonuçları; Design Expert ve Matlab programları kullanılarak analiz edilmiştir. YSA ve TYT tahmin modellerinin eğitim ve sınama veri seti karşısındaki *MSE*, R^2 ve *MAPE* istatistikleri ölçülmüş olup Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. Tahmin Modellerinin Sonuç İstatistikleri

Veri Seti	İstatistik	TYT	YSA
Eğitim	<i>MAPE</i>	6,980	6,633
	R^2	89,807	90,965
	<i>MSE</i>	0,865	0,767
Sınama (Test)	<i>MAPE</i>	9,420	8,183
	R^2	81,131	77,860
	<i>MSE</i>	1,317	1,333

Tablo 10'daki sınama seti sonuçları incelendiğinde; *MAPE* model performans istatistiği için, YSA modelinin TYT modeline göre daha başarılı olduğu görülmüştür. R^2 ve *MSE* performans kriterleri için TYT modelinin daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Her iki tahmin modelinde de *MAPE* performans ölçütü %10 değerinden küçük olarak bulunmuştur. Witt ve Witt'in (1992) ölçülendirmesine göre *MAPE* değeri %10'dan küçük olan modeller başarılı tahmin modeli olarak nitelendirilmektedir. Tabloda eğitim seti sonuçlarının sınama seti sonuçlarından daha başarılı olduğu görülmüştür. Eğitim sonuçları açısından YSA modelinin başarısı TYT modeline kıyasla daha yüksek olmuştur. Bu nedenle YSA yaklaşımının daha iyi bir öğrenme gerçekleştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca; Tablo 6'da verilen R^2_{tahmin} (%81,08) model istatistiği ile sınama verisinde hesaplanan R^2 (%81,13) değerleri birbirine oldukça yakın seviyede bulunmuştur. Bu durum TYT modelindeki R^2_{tahmin} değerinin oldukça gerçekçi sonuç verdiğinin bir göstergesidir. Padhi ve Satapathi (2014) ve literatürdeki diğer çalışmalarda genellikle YSA yaklaşımının TYT yaklaşımına göre tahmin gücü açısından daha üstün olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, TYT yaklaşımında çok sayıda model terimi kullanıldığından ve YSA yaklaşımının eğitimi için kullanılan veri setinin az olmasından dolayı TYT ve YSA yaklaşımlarının tahmin gücünün birbirine yakın seviyede olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, mühendislik malzemeleri arasında önemli bir yere sahip epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma davranışı TYT ve YSA yaklaşımlarıyla tahmin edilmiş ve bu yaklaşımların tahmin performansları karşılaştırılmıştır. Cam ve karbür katkı maddeleri ile malzemenin aşınma dayanımı geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla; TYT ve YSA yaklaşımları ile aşınma tahmin modeli oluşturulmuştur. Analiz sonuçlarına göre; TYT modelinde cam oranı ve parçacık büyüklüğü faktörleri aşınma tepki değişkenini etkileyen faktörler olurken, karbür oranının etkisi istatistiksel olarak ihmal edilebilir düzeyde bulunmuştur. Küçük boyutlu katkı kullanımının aşınma tepki değişkeni üzerindeki etkisinin olumlu olduğu belirlenmiştir. TYT ile küçük ve büyük parçacıklar için aşınmanın minimum olduğu noktalar belirlenmiştir. Küçük parçacık için minimum aşınma, %8,81 ile cam ve karbür katkı malzemesinin (1, 1) olduğu noktada gerçekleşmiştir. Büyük parçacık için ise cam ve karbür katkı malzemesinin (1, -1) noktasında aşınma minimum değerinde (%9,57) bulunmuştur. Kodlanmış değişken seviyesi gerçek seviyeye dönüştürüldüğünde bu noktalar sırasıyla (%17,07, %17,07) ve (%17,07, %2,93) noktalarıdır. Literatürde incelenen çalışmalarda görüldüğü gibi bu çalışmada da cam katkı oranının yüksek seviyede olması, epoksi matrisli kompozit malzemede aşınmayı en aza indiren faktör olmuştur.

YSA modellerinin tahmin performansının karşılaştırılması amacıyla, farklı özelliklere sahip 57 adet YSA modeli oluşturulmuştur. Gözlem sonuçları ile model tahmin sonuçları karşılaştırılmış *MAPE*, R^2 ve *MSE* performans istatistikleri hesaplanarak ağların tahmin performansları ölçülmüştür. Alternatif YSA yaklaşımları arasında en başarılı tahmini yapan ağ (FFBP ağı) belirlenmiş olup bu ağın performansı TYT modeli ile karşılaştırılmıştır. *MAPE* istatistiğine göre YSA, %8,18 değeri ile daha başarılı sonuç verirken diğer iki istatistikte TYT

modeli *MSE* için 1,317 ve R^2 için %81,1 değerleri ile daha iyi sonuç vermiştir. Literatürde incelenen çalışmalarda YSA yaklaşımı, malzeme özelliklerinin tahmini açısından genellikle TYT yaklaşımına göre daha başarılı bulunmuştur. Bu alışmada TYT yaklaşımının bu kadar başarılı sonuçlar vermesi, TYT modelinde yüksek sayıda terim kullanılması sonucu modelin tahmin gücünün artmasından kaynaklanmıştır. Bununla birlikte YSA 54 adet veriyle eğitilmiştir. Eğitim veri seti arttırıldığı takdirde YSA'nın performans istatistikleri iyileşecektir. YSA alternatifleri arasında; FFBP ağ yaklaşımında *MAPE* model performans istatistiği açısından çok sayıda başarılı alternatif ağ belirlenmiştir. GRNN ve RBF ağ yapıları *MAPE* istatistiği temelinde daha başarısız olmuştur. FFBP ağ alternatiflerinde çok farklı parametreler denendiği için tahmin hatalarının standart sapmasının yüksek olduğu grlmştir. Bu nedenle ağ yaklaşımlarının performans ortalamaları alındığında RBF ağ yaklaşımında en başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Her iki yöntemin başarılı tahmin sonuçları göstermektedir ki; YSA ve TYT yaklaşımlarının epoksi matrisli kompozitlerin aşınma oranının tahmininde kullanımı uygundur. Bu yöntemlerin kullanımı, *MAPE*, R^2 ve *MSE* gibi ölçütler baz alındığında doğruya yakın sonuçlar vermekle birlikte, üretim ve test gerçekleştirilmeden belirli öngörülerde bulunmaya olanak sağladığından zaman ve kaynak tasarrufu yapılmış olacaktır.

Çalışmada kullanılan aşınma test cihazı, önceden torna tezgâhı olarak kullanılan cihazın revizyonu ile elde edilmiş bir cihazdır. İlerideki çalışmalarda kalibrasyonlu ve sertifikalı bir cihaz kullanılarak daha geniş deney noktalarını kapsayan çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, numune üretiminde kullanılacak karışımların endüstriyel karıştırıcılarla daha homojen bir sistemlikle karıştırılması gelecek çalışmalar için büyük önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Basavarajappa, S., Yadav, S.M., Kumar, S., Arun, K.V. ve Narendranath, S. (2011) Abrasive Wear Behavior of Granite-Filled Glass-Epoxy Composites by SiC Particles Using Statistical Analysis, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 50, 516-524. doi: 10.1080/03602559.2010.543734
2. Bonner, W.H. (1962) Aromatic polyketones and preparation thereof, U.S. Patent Specification.
3. Briscoe, B., Pogolian, A. ve Tabor, D. (1974) The friction and wear of high density polythene: The action of lead oxide and copper oxide fillers, *Wear*, 27, 19-34. doi: 10.1016/0043-1648(74)90081-7
4. Dadrasi, A., Fooladpanjeh, S. ve Gharahbagh, A.A. (2019) Interactions between HA/GO/epoxy resin nanocomposites: optimization, modeling and mechanical performance using central composite design and genetic algorithm, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(2). doi: 10.1007/s40430-019-1564-7
5. Diler, E. A. ve Ipek, R. (2013) Main and interaction effects of matrix particle size, reinforcement particle size and volume fraction on wear characteristics of Al-SiCp composites using central composite design, *Composites Part B: Engineering*, 50, 371-380. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.02.001
6. Genel, K., Kurnaz, S., & Durman, M. (2003) Modeling of tribological properties of alumina fiber reinforced zinc-aluminum composites using artificial neural network, *Materials Science and Engineering: A*, 363(1-2), 203-210. doi: 10.1016/s0921-5093(03)00623-3
7. Ghasemi, A. ve Zahediasl, S. (2012) Normality Tests for Statistical Analysis: A Guide for Non-Statisticians, *Int J Endocrinol Metab*, 10, 486-489. doi: 10.5812/ijem.3505

8. Jiang, Z., Zhang, Z. ve Friedrich, K. (2007) Prediction on wear properties of polymer composites with artificial neural networks, *Composites Science and Technology*, 67(2), 168–176. doi: 10.1016/j.compscitech.2006.07.026
9. Khuri, A.I. ve Mukhopadhyay, S. (2010) Response surface methodology, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2, 128-149. doi: 10.1002/wics.73
10. Kranthi, G. ve Satapathy, A., (2010) Evaluation and prediction of wear response of pine wood dust filled epoxy composites using neural computation, *Computational Materials Science*, 49, 609–614. doi: 10.1016/j.commatsci.2010.06.001
11. Kumar, D.S. ve Rajmohan, M. (2018) Optimizing Wear Behavior of Epoxy Composites Using Response Surface Methodology and Artificial Neural Networks, *Polymer Composites*, 40(7), 2812–2818. doi: 10.1002/pc.25089
12. Mohan, N., Natarajan, S. ve Kumareshbabu, S. (2011) Abrasive wear behaviour of hard powders filled glass fabric–epoxy hybrid composites, *Materials & Design*, 32, 1704-1709. doi: 10.1016/j.matdes.2010.08.050
13. Montgomery, D.C. (2001) *Design and Analysis of Experiment*. John Wiley and Sons Inc, 12-13, ABD.
14. Öztemel, E. (2012) *Yapay sinir ağları*, Papatya yayıncılık, İstanbul.
15. Padhi, P.K. ve Satapathy, A. (2014) Solid Particle Erosion Behavior of BFS-Filled Epoxy–SGF Composites Using Taguchis Experimental Design and ANN. *Tribology Transactions*, 57, 396-407. doi: 10.1080/10402004.2013.877178
16. Pati, P. R. ve Satapathy, A. (2014) Prediction and simulation of wear response of Linz-Donawitz (LD) slag filled glass-epoxy composites using neural computation, *Polymers for Advanced Technologies*, 26(2), 121–127. doi: 10.1002/pat.3421
17. Rashed, F. ve Mahmoud, T. (2009) Prediction of wear behaviour of A356/SiCp MMCs using neural networks, *Tribology International*, 42(5), 642–648. doi: 10.1016/j.triboint.2008.08.010
18. Rethon, R.N. (1997) Mineral Fillers in Thermoplastics: Filler Manufacture, *Journal of Adhesion*, 64, 87–109. doi:10.1007/3-540-69220-7_2
19. Rout, A. ve Satapathy, A. (2012) Analysis of Dry Sliding Wear Behaviour of Rice Husk Filled Epoxy Composites Using Design of Experiment and ANN, *Procedia Engineering*, 38, 1218-1232. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.153
20. Siddhartha, S., Patnaik, A. ve Bhatt, A.D. (2011) Mechanical and dry sliding wear characterization of epoxy–TiO₂ particulate filled functionally graded composites materials using Taguchi design of experiment, *Materials & Design*, 32, 615-627. doi:10.1016/j.matdes.2010.08.011
21. Suresha, B., Chandramohan, G., Prakash, J.N., Balusamy, V. ve Sankaranarayananasamy, K. (2006) The Role of Fillers on Friction and Slide Wear Characteristics in Glass-Epoxy Composite Systems, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 5, 87-101. doi: 10.4236/jmmce.2006.51006
22. Varol, T., Canakci, A. ve Ozsahin, S. (2013) Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al₂O₃–B₄C composites produced by powder metallurgy, *Composites Part B: Engineering*, 54, 224–233. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.05.015

23. Witt, S.F. ve Witt, C.A. (1992) *Modeling and forecasting demand in tourism*, Academic, Londra.
24. Zhang, Z., Breidt, C., Chang, L., Hauptert, F. ve Friedrich, K. (2004), Enhancement of the wear resistance of epoxy, *Composites: Part A*, 35, 1385-1392. doi: 10.1016/j.compositesa.2004.05.005
25. Zhang, Z., Friedrich, K. ve Velten, K. (2002) Prediction on tribological properties of short fibre composites using artificial neural networks, *Wear*, 252(7-8), 668–675. doi: 10.1016/s0043-1648(02)00023-6