



3B yazıcıda üretilen plakaların sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin YSA ile tahmini

Estimation of friction stir welding parameters of 3D printed sheets using ANN

Nergizhan Anaç¹ , Oğuz Koçar^{2,*} , Erhan Baysal³ 

^{1,2} Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak, Türkiye

³ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Alaplı Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 67850, Zonguldak, Türkiye

Öz

Bu çalışmada 3B yazıcı kullanılarak PLA Wood (Ahşap katkılı polilaktik Asit) ve PLA-CF (karbon fiber katkılı polilaktik Asit) filamentlerden plakalar basılmıştır. Hazırlanan plakalar SKK metodu kullanılarak birleştirilmiştir. SKK metodunda işlem parametreleri farklı karıştırıcı uç geometrisi (kare, üçgen ve vida), takım ilerleme hızı (20, 40 ve 60 mm/dk) ve takım dönme hızı (1250, 1750 ve 2250 dev/dk) olarak seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veri seti (54 deney) yapay sinir ağlarının eğitim ve testi için kullanılmıştır. YSA modelinin optimizasyonu için eğitim algoritması, transfer fonksiyonu ve gizli katmandaki nöron sayısı değiştirilerek 30 model oluşturulmuştur. Modellerin eğitim ve test sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak en iyi tahmin modelinde (trainlm, nöron sayısı 14 ve tansig) eğitim sonucu %99, test sonucu %96 doğrulukla yapılmıştır. YSA modelinin eğitim ve test sonuçları, YSA'nın SKK metodunda işlem parametrelerinin değerini tahmin etmek için kullanılabilirliğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Eklemeli imalat, 3B yazdırma, Dolgu takviyeli filament, Sürtünme karıştırma kaynağı, Yapay sinir ağları (YSA)

1 Giriş

Termoplastik malzemelerin kolay işlenebilirlik, hafiflik, dayanıklılık ve geri dönüşüm gibi özelliklerinden dolayı kullanımları her geçen gün artmaktadır. Parçalarda ağırlığı azaltmak için metal malzeme yerine geçmeleri sayesinde mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda (özellikle otomobil sektöründe) yaygın olarak tercih edilmektedirler [1]. Ayrıca, son yıllarda 3B yazıcı teknolojisindeki gelişmeler bu yöntemin sarf malzemesi olan termoplastik filamentlere ilginin artmasını sağlamıştır. Bu yüzden, yeni termoplastik malzemelerin geliştirilmesine ve mevcut malzemelere dolgu (karbon fiber, cam elyaf lifleri vb) katılarak özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmaktadır. Fakat 3B yazıcılardaki yazıcı tablalarının boyutsal sınırlılığı, büyük parçaların üretiminin çok parçalı yapılması ve parçaların sonradan bir araya getirilerek tamamlanması zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Bu durum daha geniş ele alındığında; benzer veya benzer olmayan termoplastiklerin birleştirilmesi için inovatif ve güvenli yöntemler

Abstract

In this study, sheets were printed from PLA Wood and PLA-CF filaments using a 3D printer. The prepared sheets were welded using the FSW method. The process parameters were selected as different mixed tip geometries, tool feed rate, and rotational tool speed. The data set obtained from the experiments was used to train and test artificial neural networks. To optimize the ANN model, 30 models were created by changing the training algorithm, transfer function, and the number of neurons in the hidden layer. The training and test results of the models were statistically evaluated. As a result, in the best prediction model (trainlm, number of neurons 14 and tansig), the training result was 96% accurate and the test result was 99% accurate. The training and testing results of the ANN model show that ANN can be used to estimate the value of process parameters in the FSW method.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, Filler reinforced filament, Friction stir welding, Artificial neural networks (ANN)

geliştirilmesi veya hâlihazırda bilinen yöntemlerin etkinliğinin artırılması gerekmektedir [2].

Plastik malzemelerin birleştirilmesinde mekanik birleştirme, yapıştırma ve kaynak yöntemleri, malzemelerin uzun zamandır kullanılan üç temel yöntemdir. Mekanik birleştirmede yer alan ilave parçaların sisteme fazladan yük getirmesi, yapıştırma işleminde yapıştırıcıların termal ve mekanik zorlamalar karşısındaki düşük performansları bu yöntemlerin dezavantajlarıdır. Plastik malzeme kaynak uygulamalarında ise geleneksel metal malzeme kaynak tekniklerinden farklı yönler bulunmaktadır. Plastiklerde kullanılan kaynak yöntemleri titreşim kaynağı [3], lazer kaynağı [4], sürtünme kaynağı [5], sürtünme karıştırma nokta kaynağı [2], dikiş kaynağı, ultrasonik kaynak, yüksek frekans kaynağıdır. Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) özellikle farklı malzemelerin kaynak edebilmesi, yüksek verimlilik, enerji tasarrufu ve çevre dostu olmasıyla dikkat çekmektedir [6]. Günümüzde, sürtünme karıştırma kaynağının polimerlerin birleştirilmesindeki uygulamaları önemli ölçüde artmıştır [7]. SKK, 1991 yılında İngiliz

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oguz.kocar@yahoo.com.tr (O. Koçar)

Geliş / Received: 11.05.2023 Kabul / Accepted: 15.11.2023 Yayınlanma / Published: 15.01.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1295673

Kaynak Enstitüsü'nde (TWI) W. Thomas tarafından icat edilen bir katı hal kaynağıdır [8]. SKK yönteminde; omuz ve karıştırıcı uç geometrisine sahip pimden oluşan bir takım, kaynak çizgisi boyunca belirlenen bir hızda ve devirde ilerlemektedir. Bu sırada takım omuzu ve parça arasındaki sürtünmeden oluşan ısı, kaynak bölgesinin plastikleşmesine sebep olurken, karıştırıcı uç ise malzeme akışını sağlayarak birleştirme işlemini gerçekleştirir [9, 10].

SKK işleminde malzeme çeşidi ve işlem parametreleri (takım uç geometrisi, takım omuz geometrisi, takım eğim açısı, kaynak hızı, takım dönme hızı, takım eğim açısı), kaynak kalitesi ve üretim verimliliği üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, doğru işlem parametrelerinin belirlenmesi, başarılı bir kaynak sürecinin anahtarıdır. SKK yönteminde işlem parametreleri takım ilerleme ve dönme hızı, takım omuz şekli, karıştırıcı uç profili, takım ve omuz batma derinliği, takım eğim açısı, ilk dalma hızı ve bekleme süresi olarak sıralanabilir. Bunun yanında kullanılan malzemenin özellikleri de (erime sıcaklığı, mikro yapı ve mekanik özellikler) bilinmelidir. Fakat, hali hazırda işlem parametrelerinin belirlenmesi deneme yanılma yöntemi ile yapılmaktadır. Bu deneme yanılma yöntemi, hem zaman hem de malzeme israfına neden olmaktadır. Bu tür doğrusal olmayan tahmin problemlerinin çözümünde yapay sinir ağları (YSA) modeli sıklıkla kullanılmaktadır. YSA, işlem parametreleri ve kaynak kalitesi arasındaki ilişkinin belirlenmesi için matematiksel bir model oluşturarak çalışmaktadır. Oluşturulan model esnek olduğu için yeni veriler eklenerek tahmin alanı genişletilebilir. Tablo 1'de SKK yöntemi kullanılarak birleştirilen termoplastik malzemeler ve kullanılan işlem parametreleri yer almaktadır.

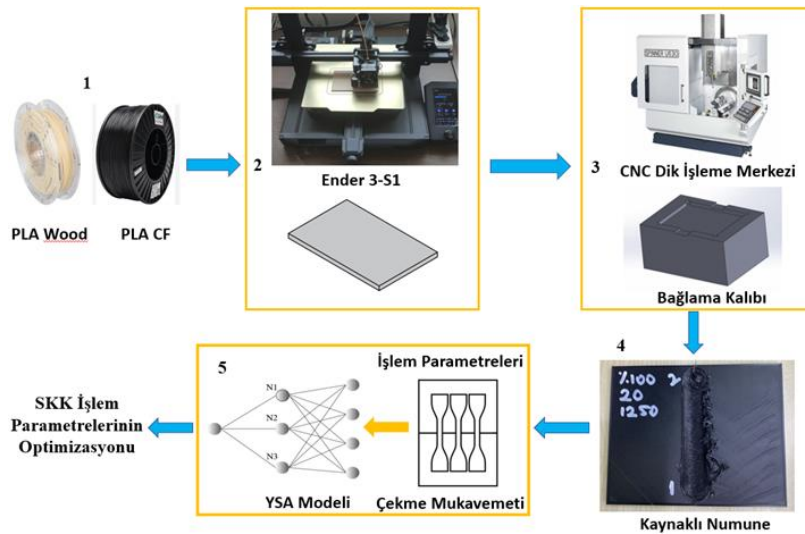
Tablo 1 incelendiğinde kaynak kalitesinin belirlenmesi için farklı birçok işlem parametresi değerinin kullanıldığı görülmektedir. Genel olarak SKK'nın endüstriyel ve akademik uygulamalarında işlem parametrelerinin malzemeye göre deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu durum işlemin hem uzun sürmesine hem de maliyetinin artmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple uygun parametrelerin daha kısa sürede belirlenmesi için yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. YSA modeli

kullanılarak yapılan bu çalışma, SKK için daha hızlı ve doğru bir şekilde parametrelerin tahminine dayanmaktadır.

Yapılan bu çalışmada; 3B yazıcıda PLA-CF (karbon fiber katkılı) ve PLA Wood (ahşap katkılı) filamentlerden basılan levhalar SKK metodu ile birleştirilmiştir. SKK işlemi için üç farklı karıştırıcı uç geometrisi (üçgen, kare ve vida), takım ilerleme hızı (20, 40 ve 60 mm/dk) ve takım dönme hızı (1250, 1750 ve 2250 dev/dk) olarak kullanılmıştır. Kaynak kalitesinin belirlenmesi için, SKK işlemi sonrası çekme numuneleri elde edilmiştir. Daha sonra SKK işlem parametrelerinin daha hızlı ve doğru belirlenebilmesi için yapay sinir ağları (YSA) modeli oluşturulmuştur. YSA modeli dört nöronlu giriş katmanı (SKK işlem parametreleri) ve tek nöronlu çıkış katmanından (kaynak kalitesi) oluşmaktadır. YSA modelinin optimizasyonu için üç farklı eğitim algoritması, iki farklı transfer fonksiyonu ve gizli katmandaki nöron sayıları değiştirilmiştir. Modeller istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. YSA'nın kaynak kalitesini tahmin etme kabiliyeti tartışılmıştır. Bu çalışma ile SKK metodunda işlem parametrelerinin hızlı ve doğru belirlenmesi için alternatif bir metod önerilmiştir.

2 Materyal ve metod

Yapılan çalışmada PLA-CF ve PLA Wood plakalarının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi gerçekleştirilmiş ve kaynak performansı incelenmiştir. Şekil 1'de çalışmanın genel akış şeması verilmiştir. Filament olarak temin edilen PLA-CF ve PLA Wood (1) malzemeler 3B yazıcı ile plaka şeklinde (2) basılmıştır. Daha sonra sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi kullanılarak plakalar birleştirilmiştir (3-4). Kaynak kalitesini belirlemek için üç tekrarlı çekme testleri yapılmış ve YSA modeli oluşturulmuştur (5). YSA modelinin giriş katmanı; SKK işlem parametrelerinden (malzeme çeşidi, karıştırıcı uç profili, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı), çıkış katmanı ise kaynak kalitesinden oluşmaktadır. Deneyler, YSA modelinin SKK işlem parametreleri ve kaynak kalitesi arasındaki ilişkiyi tahmin etme kabiliyeti üzerine tasarlanmıştır.



Şekil 1. Genel akış şeması

Tablo 1. Literatürden SKK yöntemi kullanılarak birleştirilen malzeme ve işlem parametreleri

Malzeme	Takım ilerleme hızı (mm/dk)	Takım dönme hızı (dev/dk)	Karıştırıcı uç geometrisi
HDPE [11]	45,75,115	1500, 2000, 3000	Silindirik
HDPE [12]	15	1200-2000	Silindirik
PLA [13]	20, 30, 40	700, 1400, 2000	Silindirik, vida ve konik
PLA/Al [14]	20, 30, 40	800,1100, 1400	Silindirik
PLA [15]	10, 14, 20	800, 1400, 2000	Konik pin
PLA [16]	3, 6, 9	600, 1000, 1400	Kesik koni ve silindirik
PE [17]	16, 29, 44	900, 1280, 1700	Vida M10, M12, M14
HDPE [18]	20, 40, 63	500, 710, 1000, 1400, 2000	Silindirik
PE-PP [19]	8, 10, 12,5	900, 1860, 2920	Vida, kare, üçgen, düz ve silindir
PP [20]	8	2000	Kare, konik vida, dört ağızlı vida

2.1 Filament malzemeleri

3B yazıcılar da sarf malzemeleri olarak genel kullanım amacıyla PLA (polilaktik asit), ABS, PETG gibi filamentler, mühendislik işleri veya daha özel sektörlerin kullanımı için ise farklı çeşitlerde kompozit filamentler bulunmaktadır.

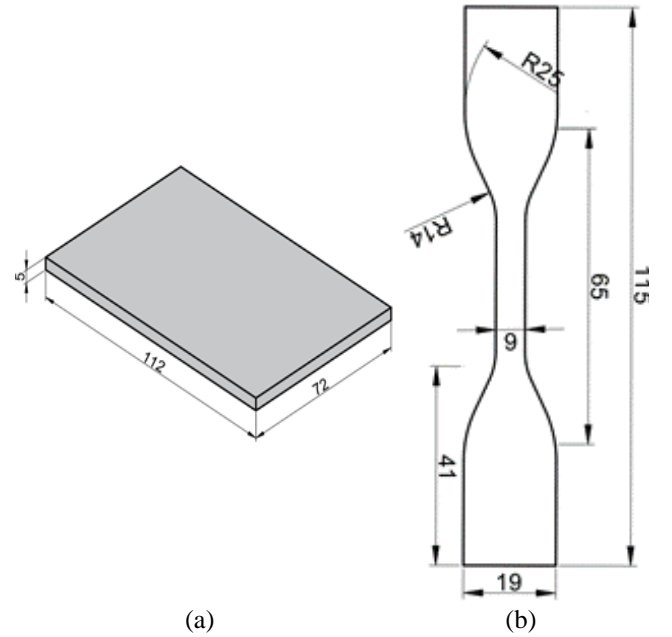
PLA; hem filamenti oluşturan ana malzeme olarak hem de içerisine dolgu eklenmesi sayesinde geliştirilebilir olması sebebiyle çok tüketilen bir malzemedir. PLA filamentler; düşük sıcaklıklarda basılması, tabla ısıtmasına ihtiyaç duyulmaması ve baskı sırasında oluşabilecek hataların azlığı nedeniyle tercih edilmektedirler. PLA; mısır, patates, şeker kamışı vb. yenilebilir kaynaklardan üretilebilen organik bir malzeme olduğu için insan sağlığına zararsızdır ve belli şartlarda doğada ayrışabilen biyopolimerlerdendir [21-23]. Bu özelliklerinden dolayı petrol bazlı polimerlere (polipropilen (PP), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), polistiren (PS) ve poliamid (PA)) alternatif olarak kullanılmaktadır [24, 25]. PLA filamentler, farklı uygulamalarda kullanılabilmesi için çeşitli dolgu malzemeleri eklenerek modifiye edilmektedir. Eklemeli imalatta sarf malzeme olarak kullanılan filamentlerin çeşitleri her geçen gün artmaktadır. SKK metodunda kaynak kalitesini etkileyen fazla sayıda parametre olduğu ve eklenen her parametre ciddi sayıda deney sayısını arttırdığı için yapılan çalışma malzeme olarak PLA-CF ve PLA Wood ile sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada, karbon fiber katkılı PLA (PLA-CF) ve ahşap katkılı PLA (PLA Wood) olmak üzere iki kompozit termoplastik filament kullanılmıştır. PLA-CF filament, karbon lif takviyeli (%15) PLA kompozit filamenttir. Ana matris içinde yer alan karbon lifler kristalleşmeyi iyileştirerek sade PLA'ya kıyasla daha iyi mekanik ve termal özellikler göstermesine olanak sağlamaktadır [22, 26]. PLA Wood ise, %30 oranında ağaç lifi (çam, sedir, bambu, meşe ve zeytin vb.) içeren kompozit PLA filamenttir. Düşük mukavemetine rağmen doğal görünümü ve ahşap hissi vermesinden dolayı özellikle görselliğin önemli olduğu mimari ve ev dekorasyon modelleri ürünlerinde tercih edilmektedir [27]. PLA-CF ve PLA Wood filamentlerin özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Filamentlerin teknik özellikleri

Mekanik Özellikler	PLA-CF[28]	PLA-Wood[29]
Çap ölçüsü (mm)	1.75	1.75
Marka	Filameon	Filameon
Renk	Siyah	Açık Kahverengi
Çekme Mukavemeti (MPa)	55	47
Yoğunluk (g/cm ³)	1.23	1.13

2.2 Deney numunelerinin üretimi

Deneylerde, eriyik yığıma modelleme prensibi ile çalışan Ender 3-S1 3B yazıcı kullanılarak SKK için 72x114x5 mm ölçülerinde plakalar (Şekil 2a) ve filamentlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D638-10 [30] standartlarına uygun numuneler (Şekil 2b) basılmıştır. PLA-CF ve PLA Wood numunelerin baskı parametreleri sırasıyla; nozul sıcaklığı 215/220 °C, tabla sıcaklığı 65/65 °C, basım hızı 45/50 mm/sn ve basım yönü XYZ olarak kullanılmıştır. Numuneler, katman kalınlığı 0.2 mm ve %100 doluluk oranında basılmıştır. Her malzeme için 5 adet çekme numunesi basılarak çekme mukavemetlerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 2. SKK kaynağı plaka ve çekme numune ölçüleri (mm)

2.3 Sürtünme karıştırma kaynağı işlemleri

SKK yönteminde malzeme çiftlerinin birleştirilmesinde kaynak kalitesi işlem parametrelerinden doğrudan etkilenmektedir. Kaynak kalitesini etkileyen başlıca işlem parametreleri takım ilerleme hızı [31], takım dönme hızı [32-34], takım omuz şekli [35], karıştırıcı uç geometrisi [36, 37] ve eğim açısı [38] olarak sıralanabilir. İşlem parametreleri kaynak bölgesinde sürtünmeden kaynaklı üretilen ısı miktarı

ve malzeme akışı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle işlem parametrelerinin doğru belirlenmesi çok önemlidir. Hali hazırda işlem parametreleri deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. Bu yapılan çalışmada da iki farklı malzeme, üç karıştırıcı uç profili, üç takım ilerleme hızı ve üç takım dönme hızı belirlenmiştir. Kullanılan işlem parametreleri **Tablo 3**'te verilmiştir. **Tablo 3**'teki değişkenlere göre 54 tane deney gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. SKK işlem parametreleri

Malzeme	Uç profili	Takım ilerleme hızı (mm/dk)	Takım dönme hızı (dev/dk)
PLA-CF	Üçgen	20	1250
PLA-Wood	Kare	40	1750
	Vida	60	2250

Numunelerin SKK ile birleştirilmesi için 22 kW motor gücü, max. 12000 dev/dk, kesici takım hareket mesafesi 465x530 mm ve tabla ölçüsü ø650 mm olan Spinner U630 CNC dik işleme merkezi kullanılmıştır. **Şekil 3a**' da sabit alınan omuz batma derinliği (1 mm), karıştırıcı uç batma derinliği (4.5 mm), **Şekil 3b**'de karıştırıcı uç geometrileri ve ölçüleri verilmiştir. **Şekil 3c**'de karıştırıcı uç giriş-çıkış noktaları, kaynak yönü ve kaynak kalitesinin belirlenmesinde kullanılan çekme numunelerinin çıkarıldığı yerler gösterilmiştir. Çekme numuneleri EBH marka lazer kesim tezgahında (100 W güç ve 8 mm/s kesme hızında) kesilmiştir. Çekme testleri 3 tekrarlı olarak yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır.

2.4 YSA tabanlı tahmin metodolojisi

SKK Yapay sinir ağı (YSA), insan beyninde bilgi işleme sistemini oluşturan nöron hücrelerinin ve bunlar arasında kurulan sinaptik bağlantı yapısını esas alan öğrenme modelidir [39]. YSA, bilgi nöronlar üzerinde dağıtılır ve paralel işlem yaparak karmaşık problemleri hızlı ve verimli bir şekilde çözme yeteneğine sahiptir. Nöronlar arasındaki bağlantılar sinyalleri iletir ve her bağlantının bir ağırlık değeri vardır. Her bir nöronun ağ çıktısını elde etmek için, nöronun ağ girdisini bir aktivasyon fonksiyonundan geçirerek elde ettiği varsayılır [40, 41]. Böylece ortaya çıkan ağ, öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi matematiksel bir modele dönüştürme yeteneğine sahip olur. YSA, tanımlanan girdi bağımsız değişkenleri ve çıktı bağımlı değişkeni arasında bir genelleme yaparak matematiksel model oluşturmaktadır. Genellemenin doğruluğunun kontrol edilmesi için, test amaçlı değişkenler ağa verildiğinde, modelden elde edilen çıktı değerlerinin istenilen değerler arasındaki % hata oranı kontrol edilir [42]. **Şekil 4**'te YSA'nın genel yapısı verilmiştir. YSA giriş katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Girdi katmanı problemin doğasına göre belirlenmektedir. Yapılan çalışmada bağımsız değişken olarak malzeme, karıştırıcı uç geometrisi, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı seçildiğinden dolayı giriş katmanı dört nörondan oluşmaktadır. Gizli katman sayısı ve gizli katmandaki nöron sayısı deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir [43]. Çıkış katmanı ise bağımlı değişken olan kaynak kalitesini temsil etmektedir. Veriler, giriş katmanı dışarıdan verildikten sonra rastgele ağırlıklarla

çarpılarak toplama fonksiyonundan geçirilerek gizli katmana aktarılır. Aynı işlemler gizli katmanda tekrarlanarak çıkış katmanına yönlendirilir. Algoritma tahmin değeri ile deneysel sonuçları karşılaştırır. Aradaki hata oranı kabul edilebilirse algoritma sonlandırılır. Hata oranı kabul edilemez ise işlem başa dönerek tekrar ettirilir.

YSA ağ yapısı beş temel unsur içerir: girdi değerleri (X_n), ağırlıklar (W_n), sabit değer (b), toplama fonksiyonu (Σ), aktivasyon fonksiyonu ($f(\Sigma)$) ve çıktı (y). Bir yapay sinir sisteminin öğrenme kabiliyeti, seçilen algoritma dahilinde ağırlıkların uygun şekilde ayarlanmasına bağlıdır. YSA modelinin mimarisi, modelin bilgi akışını, genel yapısını ve dolayısıyla tahmin yeteneğini etkilemektedir [44]. Nöron çıkışı **Denklem (1)** ile hesaplanır:

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n W_{j,i} + b_j\right) \quad (1)$$

Çok katmanlı bir perceptron modeli olan ileri beslemeli sinir ağı, bilginin girdi katmanından ağa yayılmaya başladığı ve çıktı katmanına doğru sadece tek bir yönde hareket ettiği en yaygın kullanılan YSA mimarisidir [45]. Çok katmanlı algılayıcı modelinin yaygın olarak kullanılmasının nedeni doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde iyi sonuçlar vermesidir [45, 46]. Yapılan çalışmada, girdi katmanında dört nöron (malzeme, karıştırıcı uç profili, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı) ve çıkış katmanı tek nöron (kaynak mukavemeti) bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan YSA modeli ileri beslemeli/çok katmanlı algılayıcı özelliğine sahip olup, hata kriteri olarak ortalama karesel hata (MSE) ve çıkış katmanı transfer fonksiyonu olarak "purelin" kullanılmıştır. YSA modelinin optimizasyonu için gizli katmandaki nöron sayısı, giriş/gizli katmandaki transfer fonksiyonu ve eğitim fonksiyonu değiştirilmiştir. YSA modelinde kullanılan algoritmalar ve fonksiyonlar **Tablo 4**'te ve açıklamaları **Tablo 5**'te verilmiştir.

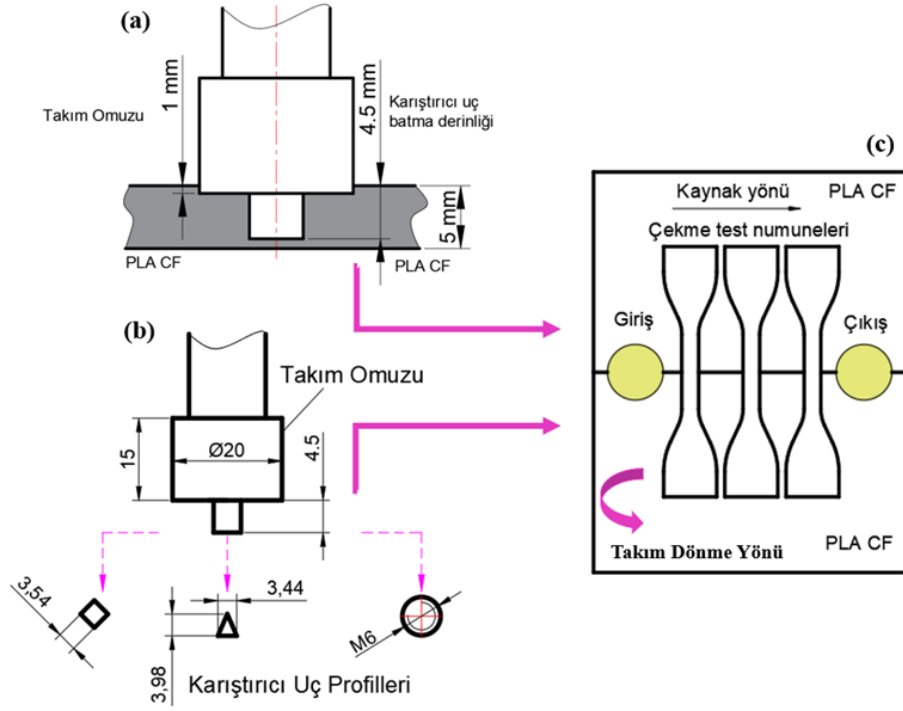
Tablo 4. YSA modelinde kullanılan değişkenler

Eğitim Algoritması	Giriş/Gizli Katman Transfer Fonksiyonu	Çıkış Katman Transfer Fonksiyonu	Gizli Katmandaki Nöron Sayısı
Trainlm Trainrp Traingda	Tansig, Logsig	Purelin	5, 8, 11, 14, 17

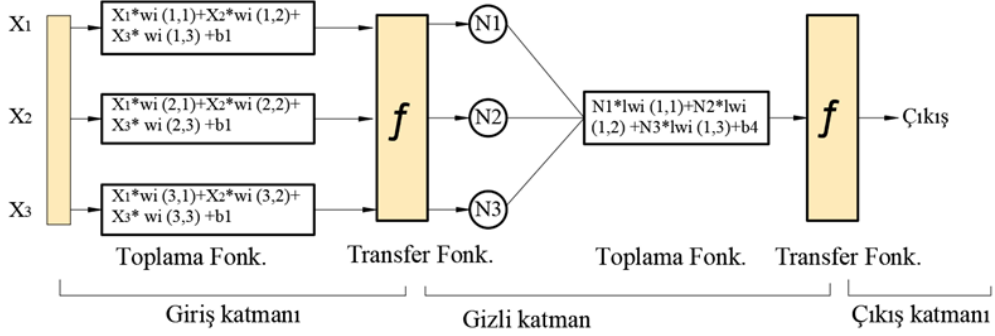
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (k_{\text{exp}(i)} - k_{\text{ANN}(i)})^2}{\sum_{i=1}^N (k_{\text{exp}(i)})^2} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |k_{\text{exp}(i)} - k_{\text{ANN}(i)}|^2} \quad (3)$$

Oluşturulan modellerin performansının istatistiksel olarak karşılaştırılması R-kare (R^2) ve kök ortalama kare hatası (RMSE) kullanılarak hesaplanmıştır (**Denklem 2-3**).

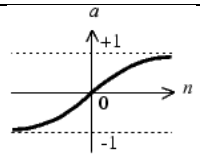
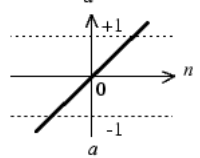
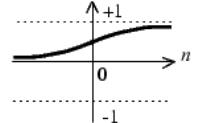


Şekil 3. SKK karıştırıcı uç ve omuz özellikleri (a-b), SKK işlem yönlerinin gösterimi (c)



Şekil 4. YSA genel yapısı

Tablo 5. YSA modelde kullanılan algoritma/fonksiyonların tanımı

Algoritma/Fonksiyon	Tanımlama	
Eğitim Fonksiyonu	Trainlm (LM)	Levenberg – Marquardt
	Trainrp (RP)	Esnek geriye yayılım algoritması
	Traingda (GDA)	Gradyan inişli adaptif geriye yayılım algoritması
Tansig	Hyperbolic tangent sigmoid transfer fonksiyonu	
Purelin	Linear transfer fonksiyonu	
Logsig	Log – Sigmoid transfer fonksiyonu	

3 Bulgular ve tartışma

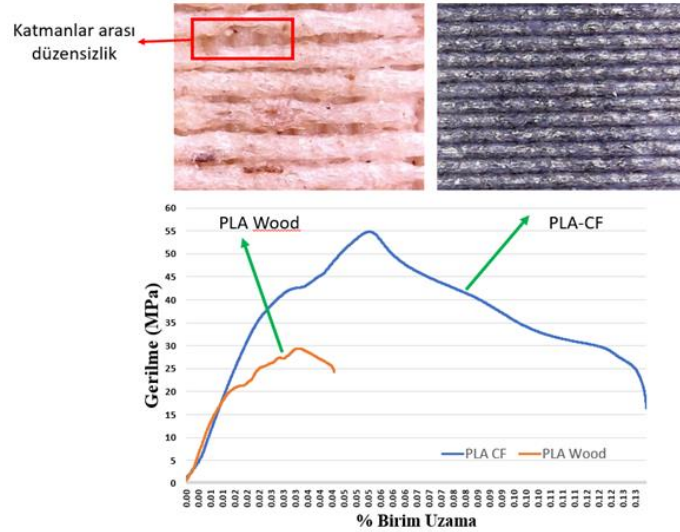
3.1 Filamentlerin mekanik özellikleri

Yapılan çalışmada PLA-CF ve PLA Wood filamentlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için oda sıcaklığında 2 mm/dk hızında çekme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda PLA-CF için çekme mukavemetinin 54.81 MPa ve PLA Wood için çekme mukavemetinin 29.37 MPa olduğu görülmüştür. Şekil 5'te PLA-CF ve PLA Wood'un gerilme-gerinim diyagramı verilmiştir. PLA-CF'nin dolgu malzemesinin mekanik özellikleri olumlu etkilediği ve PLA Wood'a göre çekme dayanımının ve % uzama değerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin karbon liflerinin ana matris içinde homojen olarak dağılması ve ekstrüzyon yönüne paralel biçimde konumlanmasından kaynaklandığı söylenebilir [47]. Ahşap katkısının polimerle bağlandığı ve yük altında mikromekanik deformasyon sürecinin geçerli olduğu belirtilmiştir. Polimerle katkı malzemesi arasında bağ oluşumunu etkileyen önemli etkenlerden birisi partiküllerin büyüklüğü ve partiküllerin mekanik özellikleridir. Polimer

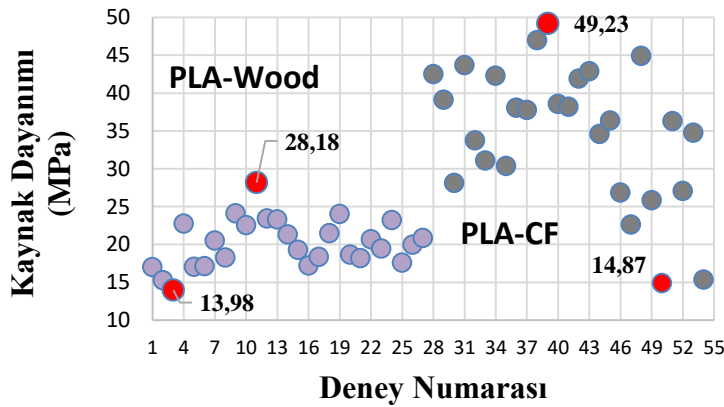
malzemenin içine eklenen partikülün boyutu büyüdükçe, kuvvete karşı göstermiş olduğu direnç azalmakta ve daha kolay ayrışma ile birlikte kırılma olasılıkları artmaktadır [48-50]. Ahşap katkısının ise katmanlar arasındaki yapışmayı olumsuz etkilediği ve düzensizliklere sebep olduğu için çekme dayanımını ve uzamayı olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Şekil 5'te 3B baskı sonrasında dijital mikroskopla alınan yüzey görüntüleri verilmiştir. Yüzey görüntülerinde ahşap katkıdan dolayı meydana gelen hatalar ve düzensizlikler görülmektedir.

3.2 Sürtünme karıştırma kaynağı işlem sonuçları

Şekil 6'da PLA Wood ve PLA-CF'nin SKK ile birleştirme sonrasında çekme testi ile elde edilen kaynak sonrası çekme dayanımları görülmektedir. Tablo 6'da SKK sonrası en yüksek ve en düşük kaynak mukavemet değerleri ve işlem parametreleri verilmiştir. Şekil 6'da PLA Wood, üçgen uç profil 1-9, kare profil 10-18 ve vida uç profili 19-27 numaralı deneylerde, PLA Cf için üçgen uç profil 28-36, kare uç profil 37-45 ve vida uç profil 46-54 numaralı deneylerde kullanılmıştır.



Şekil 5. PLA-CF ve PLA Wood gerilme gerinim diyagramı



Şekil 6. SKK sonrası çekme dayanımı (PLA Wood ve PLA-CF)

Tablo 6. SKK en yüksek ve en düşük kaynak mukavemet değerleri

Deney No	Filament	Karıştırıcı Uç Geometrisi	Takım İlerleme Hızı (mm/dk)	Takım Dönme Hızı (dev/dk)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Verim (%)
3	PLA Wood	Üçgen	20	2250	13.98	47.60
11	PLA Wood	Kare	20	1750	28.18	95.95
39	PLA CF	Kare	20	2250	49.23	89.92
50	PLA CF	Vida	40	1750	14.87	27.13

PLA Wood için en yüksek kaynak mukavemeti kare karıştırıcı uç, 20 mm/dk ilerleme hızı ve 1750 dev/dk takım dönme hızında 28.18 MPa, PLA-CF için en yüksek kaynak mukavemeti kare karıştırıcı uç, 20 mm/dk ilerleme hızı ve 2250 dev/dk takım dönme hızında 49.23 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 6’da PLA-CF kaynak sonrası çekme dayanım değerlerinin PLA Wood kaynak sonrası çekme dayanım değerlerine göre daha geniş bir aralıkta dağıldığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak PLA-CF malzemenin karbon fiber katkısından dolayı SKK işlem parametrelerindeki değişimden etkilendiği söylenebilir.

3.3 YSA sonuçlarının değerlendirilmesi

Yapılan çalışmada SKK metodunda kaynak kalitesinin tahmini için YSA kullanılabilirliği incelenmiştir. YSA modelinin optimizasyonu için farklı eğitim fonksiyonları (trainp, trainlm ve traingda), transfer fonksiyonları (logsig ve tansig) ve gizli katmanda nöron sayıları (5, 8, 11, 14 ve 17) değiştirilerek 30 farklı model oluşturulmuştur. YSA modellerinin özellikleri Tablo 7’de verilmiştir. Malzeme çeşidi, karıştırıcı uç profili, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı değiştirilerek oluşturulan veri seti (54 deney), eğitim seti ve test seti olmak üzere ikiye bölünmüştür. Test seti, veri setinin %15-20 kadarı olması tavsiye edilmektedir [51]. Bu doğrultuda rastgele 10 deney verisi seçilerek ayrılmış ve modelin doğrulanması için kullanılmıştır. Test seti oluşturmak için seçilen veriler PLA Wood için 2, 6, 10, 16 ve 20 numaralı deneyler, PLA-CF için 4, 11, 16, 20 ve 26 olarak seçilmiştir. Ayrıca YSA eğitim ve test sonuçlarına göre istatistiksel değerlendirme (R^2 ve RMSE) Tablo 7’de görülmektedir. Kaynak kalitesinin tahmininde en uygun YSA modelinin belirlenmesi için R^2 değerinin 1’e yakın (ama $R^2 < 1$), RMSE değerinin ise sıfıra yakın olması istenmektedir.

Tablo 7’de $R^2=1$ olduğu durumlar görülmektedir. YSA’da tahmin oranının %100 olması beklenmez. Bunun birçok nedeni olmakla beraber başlangıçta nörona atanan ağırlık değerleri rastgeledir ve gerçek değerlerle tahmin değerleri arasındaki farka göre geriye dönük bu değerler değiştirilir. Burada bir yakınsama söz konusu olduğu için tahmin değerlerinin %100 doğrulukla tahmini beklenemez. İkinci sebep olarak $R^2=1$ durumu aşırı öğrenmeyi gösterir. Aşırı öğrenme, YSA modelinin verilere aşırı uyum sağladığı (ezber yaptığı) ve yeni verilerde düşük performans gösterdiği durumu ifade etmektedir. Bundan dolayı Tablo 7’de $R^2=1$ durumları değerlendirmeye alınmamıştır. Tablo 7’de yüksek performans gösteren YSA modelleri (3, 6, 19, 20, 28 ve 30) işaretlenmiştir. Yüksek performans gösteren modellerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi için Şekil 7’de R^2 ve Şekil

8’de RMSE değeri eğitim ve test sonuçları verilmiştir. İstatistiksel değerlendirme sonucunda 20 numaralı modelin eğitim ve test sonuçlarında en başarılı olduğu belirlenmiştir.

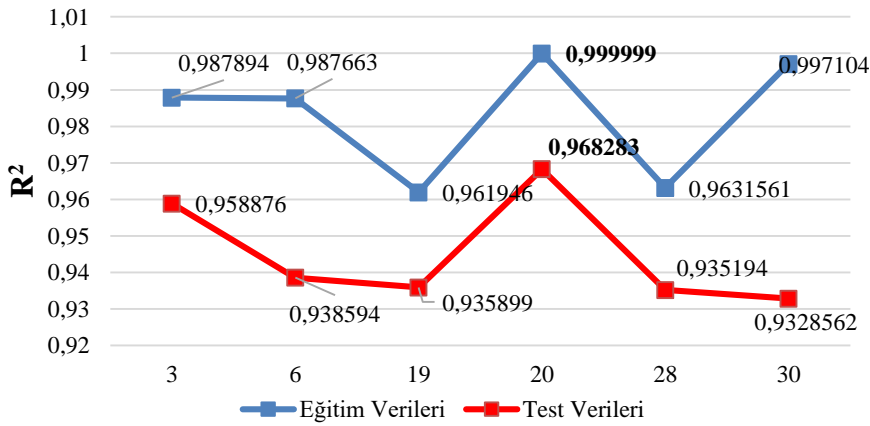
İstatistiksel olarak genel bir değerlendirme yapıldığında eğitim algoritması “traingda”nın tahmin performansının düşük olduğu ve bu problemin çözümüne uyum sağlayamadığı belirlenmiştir. Ayrıca gizli katmandaki nöron sayısının artmasıyla tahmin kabiliyetinde bir iyileşme elde edilmiştir. Transfer fonksiyonlarının ise problemle yüksek uyum sağladığı ve bundan dolayı logsig ve tansig arasında çok belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Seçilen model karakteristik özellikleri (YSA model numarası 20): bir gizli katman sayısı, gizli katmanda 14 nöron, eğitim algoritması trainlm, gizli katmandaki transfer fonksiyonları tansig, çıkış katmanındaki transfer fonksiyonu purelin, iterasyon sayısı 5000 ve öğrenme oranı 0.001 olarak belirlenmiştir. Şekil 9’da deneysel sonuçlarla YSA tahmin sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir. Grafikler incelendiğinde deneysel sonuçlarla YSA tahmin sonuçları arasında küçük sapmalar olmasına rağmen sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.

Literatürde SKK’ında YSA’nın kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde; Okuyucu vd. alüminyum levhaların SKK ile birleştirilmesinde takım ilerleme hızı (6.25, 10, 16 ve 20 mm/dk), takım dönme hızı (500, 800, 1000, 1250 ve 1500 rpm) işlem parametrelerini kullanarak kaynak sonrası mekanik özellikleri %99 doğrulukla tahmin etmişlerdir [52]. Diğer bir çalışmada farklı malzemelerin birleştirilmesinde mekanik özellikler ANN kullanılarak %95 doğrulukla tahmin edilmiştir [53]. Diğer bir çalışmada yüzey yanıt yöntemi ve YSA kullanılarak AA7039 Al alaşımının SKK yöntemi ile birleştirilmesinde kaynak sonrası çekme dayanımını tahmin etmişlerdir. ANN modelinin çekme dayanımının tahmininde yüzey yanıt yöntemine göre daha başarılı olduğunu belirtmişlerdir [54]. Genel bir değerlendirme yapıldığında makine öğrenmesi algoritmalarının kullanıldığı çalışmalarda oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiş olup ortalama %96 doğruluk oranına sahip olduğu belirtilmiştir. YSA ile yapılan çalışmalarda kaynak sonrası çekme mukavemeti, ITAB bölgesinin sertliği, mikroyapı veya tane boyutu gibi FSW parametre tahmininde uygulanan YSA teknikleri için ortalama hatanın yaklaşık %5 olduğu görülmüştür [55]. Sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında YSA’nın SKK işlemi sonrası mekanik özellikleri tahmin etmede başarılı olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada literatürden farklı olarak SKK öncesi işlem parametreleri tahmin edilmiş ve yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir. Sonuçlar literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir.

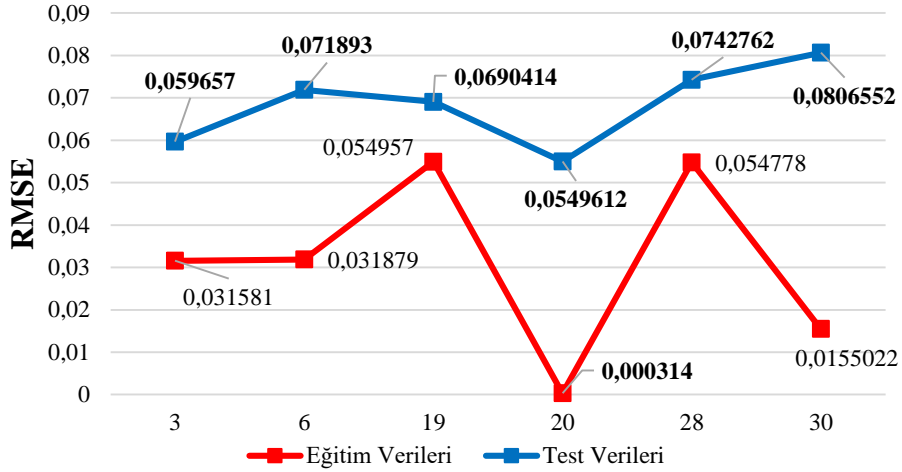
Tablo 7. YSA modellerin karakteristik özellikleri

GKNS	TF	TF (GK)	TF (ÇK)	Eğitim			Test		
				R ²	RMSE	R	R ²	RMSE	
1	5	Traingda	Tansig	Purelin	0.95215	0.06131	0.76026	0.90957	0.083809
2	5	Trainlm	Tansig	Purelin	0.99746	0.014518	0.98808	0.84419	0.106803
3	5	Trainrp	Tansig	Purelin	0.987894	0.031581	0.94226	0.958876	0.059657
4	5	Traingda	Logsig	Purelin	0.928946	0.075244	0.60387	0.830979	0.110205
5	5	Trainlm	Logsig	Purelin	0.996121	0.017950	0.98162	0.909702	0.085166
6	5	Trainrp	Logsig	Purelin	0.987663	0.031879	0.94113	0.938594	0.071893
7	8	Traingda	Tansig	Purelin	0.948201	0.063158	0.74406	0.922601	0.077107
8	8	Trainlm	Tansig	Purelin	0.999993	0.000759	0.99994	0.745104	0.227640
9	8	Trainrp	Tansig	Purelin	0.993963	0.022368	0.97147	0.908136	0.086505
10	8	Traingda	Logsig	Purelin	0.929418	0.072528	0.65594	0.825520	0.112154
11	8	Trainlm	Logsig	Purelin	1	0.0000311	1	0.628529	0.178477
12	8	Trainrp	Logsig	Purelin	0.996225	0.017709	0.98222	0.892841	0.089403
13	11	Traingda	Tansig	Purelin	0.926345	0.076246	0.58948	0.865507	0.1023430
14	11	Trainlm	Tansig	Purelin	1	0.000166	1	0.791056	0.1469504
15	11	Trainrp	Tansig	Purelin	0.995500	0.019323	0.97879	0.829712	0.1263580
16	11	Traingda	Logsig	Purelin	0.955809	0.058575	0.78886	0.886184	0.0904167
17	11	Trainlm	Logsig	Purelin	1	0.0000141	1	0.887144	0.1018352
18	11	Trainrp	Logsig	Purelin	0.995467	0.019382	0.97871	0.916048	0.0853224
19	14	Traingda	Tansig	Purelin	0.961946	0.054957	0.81295	0.935899	0.0690414
20	14	Trainlm	Tansig	Purelin	0.999999	0.000314	0.99999	0.968280	0.0549612
21	14	Trainrp	Tansig	Purelin	0.994891	0.020561	0.97603	0.936934	0.0743872
22	14	Traingda	Logsig	Purelin	0.960114	0.0560123	0.8053	0.924677	0.0781520
23	14	Trainlm	Logsig	Purelin	1	0.0000037	1	0.864355	0.1075845
24	14	Trainrp	Logsig	Purelin	0.998862	0.0097285	0.99498	0.908844	0.0869771
25	17	Traingda	Tansig	Purelin	0.968691	0.0504734	0.84635	0.910368	0.083675
26	17	Trainlm	Tansig	Purelin	0.99999	0.0003125	0.9999	0.892448	0.092303
27	17	Trainrp	Tansig	Purelin	0.997425	0.0146179	0.98897	0.899960	0.099194
28	17	Traingda	Logsig	Purelin	0.9631561	0.0547780	0.81432	0.9351940	0.0742762
29	17	Trainlm	Logsig	Purelin	1	0.0000291	1	0.9030325	0.094853
30	17	Trainrp	Logsig	Purelin	0.997104	0.0155022	0.98646	0.9328562	0.0806552

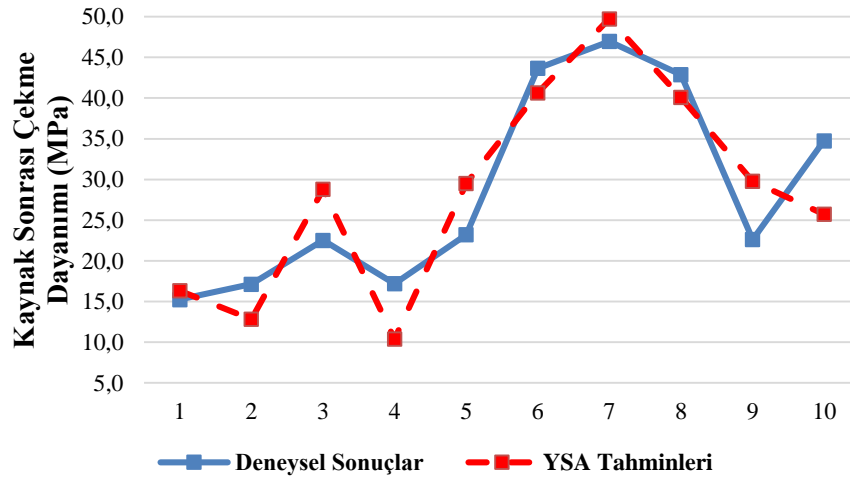
GKNS: Gizli katman nöron sayısı, TF: Transfer fonksiyonu, GK: Gizli katman, ÇK: Çıkış katmanı



Şekil 7. En iyi YSA modellerinin R² değerleri



Şekil 8. En iyi YSA modellerinin RMSE değerleri



Şekil 9. Deneysel sonuçlarla YSA tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

4 Sonuçlar

Yapılan çalışmada PLA Wood ve PLA-CF plakaların SKK metodu ile birleştirilebilirliği ve YSA kullanılarak işlem parametrelerinin tahmin edilebilirliği araştırılmıştır. SKK metodunda işlem parametreleri olarak üçgen, kare ve vida karıştırıcı uç geometrisi, 20, 40 ve 60 mm/dk ilerleme hızı, 1250, 1750 ve 2250 dev/dk takım dönme hızı kullanılmıştır. YSA modelinin optimizasyonu için eğitim algoritması (trainrp, trainlm ve traingda), transfer fonksiyonu (giriş katmanındaki transfer fonksiyonu olarak logsig ve tansig) ve gizli katmandaki nöron sayısı (5, 8, 11, 14 ve 17) değiştirilerek eğitim ve test sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. PLA Wood ve PLA-CF plakaların kaynak sonrası çekme dayanımları değerlendirildiğinde; PLA Wood için en yüksek kaynak sonrası çekme dayanımı (28.18 MPa) kare karıştırıcı uç, ilerleme hızı 20 mm/dk ve takım dönme hızı 1750 dev/dk, PLA-CF için en yüksek kaynak sonrası çekme dayanımı (49.23 MPa) kare karıştırıcı uç, ilerleme hızı 20 mm/dk ve takım dönme hızı 2250 dev/dk işlem parametrelerinde elde edilmiştir.

Elde edilen veri setleri kullanılarak YSA modeli geliştirilmiştir. YSA modelinin giriş katmanı malzeme, karıştırıcı uç geometrisi, takım ilerleme hızı ve takım dönme hızı olmak üzere dört nöron, çıkış katmanı ise kaynak sonrası çekme dayanımı değerini temsil eden tek bir nöron oluşmaktadır. En iyi YSA tahmin modelini bulmak için üç farklı eğitim fonksiyonu, iki farklı transfer fonksiyonu ve gizli katmandaki farklı nöron sayıları kullanılarak 30 model geliştirilmiştir. En yüksek doğruluk oranına sahip tahmin sonuçlarının "trainlm" eğitim fonksiyonu, gizli katmandaki nöron sayısı "14" ve transfer fonksiyonu olarak "tansig ve purelin" kullanılarak elde edilmiştir. İstatistiksel olarak eğitim sonuçlarında sırasıyla 0.99999 ve 0.000314, test sonuçlarında ise 0.968280 ve 0.0549612 R^2 ve RMSE değerleri elde edilmiştir.

Bazı modellerde aşırı öğrenme olduğu belirlenmiş ve değerlendirmeden çıkarılmıştır. Eğitim algoritması olarak "traingda"nın tahmin performansının düşük olduğu ve bu problemin çözümünde kullanımının uygun olmadığı belirlenmiştir. Gizli katmandaki nöron sayısının artmasıyla tahminde bir iyileşme elde edilmiştir.

SKK kaynak parametrelerinin belirlenmesinde deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu durum, zaman kaybına sebep olurken hurda malzeme miktarını da arttırmaktadır. YSA modelinin özellikle doğrusal olmayan problemlerin çözümündeki kabiliyeti kullanılarak SKK işlem parametrelerini tahmin kabiliyeti incelenmiştir. YSA tahmin sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların yüksek doğruluğa sahip olduğu belirlenmiştir. Bu da YSA'nın SKK işlem parametrelerinin tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] M. R. Hajideh, M. Farahani, S. A. D Alavi, N. M. Ramezani, Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 269-279, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.018>
- [2] S.H. Dashatan, T. Azdast, S. R. Ahmadi, A. Bagheri, Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets. *Materials & Design*, 45, 135-141, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.071>
- [3] P. J. Bates, C. Dyck, and M. Osti, Vibration welding of nylon 6 to nylon 66. *Polymer Engineering & Science*, 44(4), 760-771, 2004. <https://doi.org/10.1002/pen.20068>
- [4] M. Farahani, I. S. Far, D. Akbari and R. Alderliesten, Numerical and experimental investigations of effects of residual stresses on crack behavior in Aluminum 6082-T6. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 226(9), 2178-2191, 2012. <https://doi.org/10.1177/095440621143266>
- [5] M. Tabasi, M. Farahani, M. K. B. Givi, M. Farzami and A. Moharami, Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 705-715, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8211-y>
- [6] H. M. Jamalain, M. Farahani, M. K. B. Givi and M. A. Vafaei, Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, p. 611-621, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7581-5>
- [7] V. Jaiganesh, B. Maruthu, and E. Gopinath, Optimization of process parameters on friction stir welding of high density polypropylene plate. *Procedia Engineering*, 97, 1957-1965, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.350>
- [8] W. M. Thomas, Friction stir butt welding. *International patent application No.9125978.8*, 6 December 1991.
- [9] W. K. Kim, B. C. Goo and S. T. Won, Optimal design of friction stir welding process to improve tensile force of the joint of A6005 extrusion. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(7), 637-643, 2010. <https://doi.org/10.1080/10426910903365745>
- [10] A. Mirjalili, S. Serajzadeh, H. J. Aval and A. H. Kokabi, Modeling and experimental study on friction stir welding of artificially aged AA2017 plates. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(6), 683-688, 2013. <https://doi.org/10.1080/10426914.2012.746782>
- [11] Y. Bozkurt, The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets. *Materials & Design*, 35, 440-445, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.008>
- [12] S. Saeedy and M. K. B. Givi, Experimental application of friction stir welding (FSW) on thermo plastic medium density polyethylene blanks. *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, pp. 841-844, Istanbul, Turkey, 2010. <https://doi.org/10.1115/ESDA2010-25344>
- [13] A. K. R. Sharma, M. R. Choudhury and K. Debnath, Experimental investigation of friction stir welding of PLA. *Welding in The World*, 64(6), 1011-1021, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00890-7>
- [14] R. Kumar, N. Ranjan, V. Kumar, J. S. Chokan, A. Yadav, N. Piyush, S. Sharma, C. Prakash, S. Singh, C. Li, Characterization of friction stir-welded polylactic acid/aluminum composite primed through fused filament fabrication. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(3), 2391-2409, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06329-4>
- [15] S. M. Senthil and M.B. Kumar, Effect of tool rotational speed and traverse speed on friction stir welding of 3d-printed polylactic acid material. *Applied Science and Engineering Progress*, 15(1), 2022. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.09.002>
- [16] N. Vidakis, M. Petousis, N. Mountakis and J. D. Kechagias, Material extrusion 3D printing and friction stir welding: an insight into the weldability of polylactic acid plates based on a full factorial design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(5-6), 3817-3839, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09595-1>
- [17] M. A. Rezgui, M. Ayadi, A. Cherouat, K. Hamrouni, A. Zghal and S. Bejaoui, Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of polyethylene. *EPJ Web of Conferences* 6, 07003 pp. 1-8, Poitiers, France, 2010. <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20100607003>
- [18] E. Raouache, Z. Boumerzoug, S. Rajakumar and F. Khalfallah, Effect of FSW process parameters on strength and peak temperature for joining high-density polyethylene (HDPE) sheets. *Revue des Composites et des Materiaux Avances*, 28(2), 149, 2018. <https://doi.org/10.3166/RCMA.28.149-160>
- [19] M. R. Hajideh, M. Farahani, S. A. D. Alavi and N. M. Ramezani, Investigation on the effects of tool geometry

- on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 269-279, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.018>
- [20] F. Kordestani, F. A. Ghasemi and N. B. M. Arab, Effect of pin geometry on the mechanical strength of friction-stir-welded polypropylene composite plates. *Mechanics of Composite Materials*, 53(4), 525-532, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11029-017-9682-8>
- [21] Incorporated. P.S. 3 Types of Plastic Used in 3D Printing. <https://www.polymersolutions.com/blog/plastic-in-3d-printing/>, Accessed 12 February 2023.
- [22] H. Kyutoku, N. Maeda, H. Sakamoto, H. Nishimura and K. Yamada, Effect of surface treatment of cellulose fiber (CF) on durability of PLA/CF bio-composites. *Carbohydrate Polymers*, 203, 95-102, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.033>
- [23] R.M. Rasal, A.V. Janorkar and D.E. Hirt, Poly (lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science*, 35(3), 338-356, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.12.003>
- [24] D. Garlotta, A literature review of poly (lactic acid). *Journal of Polymers and The Environment*, 9, 63-84, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1020200822435>
- [25] L. T. Lim, R. Auras and M. Rubino, Processing technologies for poly (lactic acid). *Progress in Polymer Science*, 33(8), 820-852, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004>
- [26] A. E. Magri, K. E. Mabrouk, S. Vaudreuil and M. E. Touhami, Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(5), 581-595, 2021. <https://doi.org/10.1177/0892705719847244>
- [27] N. Ayırlımis, M. Kariz, J. H. Kwon and M. K. Kuzman, Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 2195-2200, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03299-9>
- [28] Filameon PLA-CF 15 Filament. <https://www.filameon.com/urun/filameon-pla-cf-15-filament/#%20>, Accessed 6 September 2022.
- [29] Filameon PLA Wood. <https://www.filameon.com/urun/filameon-pla-wood-filament/>, Accessed 5 November 2022.
- [30] B. Erdoğan, M. Bağatur, G. Göktürk, S. O. Yavuz, T. B. Yılmaz, O. Koçar and O. Özdamar, Experimental investigation of tensile strength and thermal conductivity of nanoparticle reinforcement composite materials. *Journal of Materials and Manufacturing*, 1(1), 14-22, 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7107345>
- [31] V. Devuri, M. M. Mahapatra, S. P. Harsha and N. R. Mandal, Effect of shoulder surface dimension and geometries on FSW of AA7039. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 14(3), 183-194, 2014. <https://doi.org/10.1515/jmsp-2014-0008>
- [32] N. R. J. Hynes and P. S. Velu, Effect of rotational speed on Ti-6Al-4V-AA 6061 friction welded joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 288-297, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.02.014>
- [33] H. Lombard, D. G. Hatting, A. Steuwer and M. N. James, Effect of process parameters on the residual stresses in AA5083-H321 friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*, 501(1-2), 119-124, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.078>
- [34] S. Rajakumar, C. Muralidharan and V. Balasubramanian, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints. *Materials & Design*, 32(2), 535-549, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.025>
- [35] T. Sun, A. P. Reynolds, M. J. Roy, P. J. Withers and P. B. Prangnell, The effect of shoulder coupling on the residual stress and hardness distribution in AA7050 friction stir butt welds. *Materials Science and Engineering: A*, 735, 218-227, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.018>
- [36] N. Sharma, A. N. Siddiquee, Z. A. Khan and M. T. Mohammed, Material stirring during FSW of Al-Cu: Effect of pin profile. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(7), 786-794, 2018. <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1388526>
- [37] P. S. Kumar and M. S. Chander, Effect of tool pin geometry on FSW dissimilar aluminum alloys-(AA5083 & AA6061). *Materials Today: Proceedings*, 39, 472-477, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.204>
- [38] A. Arici and S. Selale, Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene. *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(6), 536-539, 2007. <https://doi.org/10.1179/174329307X173706>
- [39] J. P. Davim, V. N. Gaitonde and S. R. Karnik, Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models. *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1-3), 16-23, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.082>
- [40] C. Hamzaçebi, Forecasting of Turkey's net electricity energy consumption on sectoral bases. *Energy Policy*, 35(3), 2009-2016, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.03.014>
- [41] C. Hamzaçebi, Improving artificial neural networks' performance in seasonal time series forecasting. *Information Sciences*, 178(23), 4550-4559, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.07.024>
- [42] G. Serin, M. Kahya, M. Özbayoğlu ve H. Ö. Ünver, Ti6Al4V malzemesinin tornalama işleminde özgül kesme enerjisi ve yüzey pürüzlüğünün incelenmesi ve yapay sinir ağları temelli tahmin modeli geliştirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 517-536, 2019. <https://doi.org/10.17482/uumfd.301128>

- [43] E. N. Dizdar and O. Koçar, İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinde risklerin yapay sinir ağlarıyla değerlendirilmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 6(3), 73-83, 2018. <https://doi.org/10.21541/apjes.426502>
- [44] H. R. Maier, A. Jain, G. C. Dandy and K. P. Sudheer, Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions. *Environmental Modelling & Software*, 25(8), 891-909, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.02.003>
- [45] S. Razavi and B.A. Tolson, A new formulation for feedforward neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 22(10), 1588-1598, 2011. doi: 10.1109/TNN.2011.2163169.
- [46] A. B. Colak, Experimental study for thermal conductivity of water-based zirconium oxide nanofluid: developing optimal artificial neural network and proposing new correlation. *International Journal of Energy Research*, 45(2), 2912-2930, 2021. <https://doi.org/10.1002/er.5988>
- [47] H. K. Sezer, O. Eren, ve H. R. Börklü, Ergiyik biriktirme yöntemi ile karbon fiber takviyeli plastik kompozitlerin eklemeli imalatı: İşlem parametrelerinin çekme özelliklerine etkisi. 2nd International Symposium on 3D Printing Technologies, İstanbul, Türkiye, 3-4 April 2017.
- [48] G. Faludi, G. Dora, K. Renner, J. Móczó, B. Pukánszky, Improving interfacial adhesion in pla/wood biocomposites. *Composites Science and Technology*, 89, 77-82, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.09.009>.
- [49] Á. Csikós, G. Faludi, A. Domján, K. Renner, J. Móczó and B. Pukánszky, Modification of interfacial adhesion with a functionalized polymer in PLA/wood composites. *European Polymer Journal*, 68, 592-600, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.03.032>.
- [50] Z. Liu, Q. Lei and S. Xing, Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (5), 3741 - 3751, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.034>.
- [51] A. Abdullah ve M. Karabatak, Veri seti-sınıflandırma ilişkisinde performans etki eden faktörlerin değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 32(2), 531-540, 2020. <https://doi.org/10.35234/fumbd.738007>
- [52] H. Okuyucu, A. Kurt and E. Arcaklioglu, Artificial neural network application to the friction stir welding of aluminum plates. *Materials & Design*, 28 (1), 78-84, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.06.003>.
- [53] M. Krishnan, J. Maniraj, R. Deepak and K. Anganan, Prediction of optimum welding parameters for FSW of aluminium alloys AA6063 and A319 using RSM and ANN. *Materials Today: Proceedings*, 5 (1), 716-723, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.138>.
- [54] A.K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19 (1), 9-18, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60221-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60221-6).
- [55] B. Eren, M.A. Guvenc and S. Mistikoglu, Artificial Intelligence Applications for Friction Stir Welding: A Review. *Metals and Materials International*, 27, 193-219, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00854-y>.

