

## YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN LEVHALARIN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAK PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONUNDA YAPAY SİNİR AĞLARININ KULLANIMI

**Mustafa Kemal BİLİCİ<sup>1</sup>, Selim HARTOMACIOĞLU<sup>2</sup>,  
Ahmet İrfan YÜKLER<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>[mkbilici@marmara.edu.tr](mailto:mkbilici@marmara.edu.tr) Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, İstanbul

<sup>2</sup>[selimh@marmara.edu.tr](mailto:selimh@marmara.edu.tr) Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, İstanbul

<sup>3</sup>[iyukler@marmara.edu.tr](mailto:iyukler@marmara.edu.tr) Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi, İstanbul

### ÖZET

Takım dönme hızı, takım dalma derinliği ve karıştırma süresinin yüksek yoğunluklu polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağında çok önemli parametreler olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu kaynak parametrelerinin optimizasyonu için bir yapay sinir ağı modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde danışmanlı öğrenmeli, ileri beslemeli, geri yayımlı yapay sinir ağı kullanılmıştır. Hazırlanan modelin giriş katmanı üç kaynak parametresini ve çıkış katmanı kaynak kopma kuvvetini içerirken gizli katman 16 nörondan oluşmaktadır. Hazırlanan modelin polietilen sürtünme karıştırma nokta kaynağına başarı ile uygulanabileceği tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Sürtünme karıştırma nokta kaynak parametreleri, polietilenin sürtünme karıştırma nokta kaynağı, yapay sinir ağları, optimizasyon

### ABSTRACT

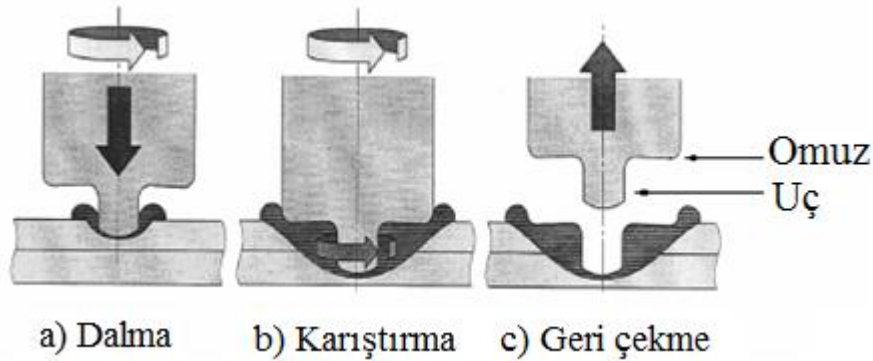
The friction stir spot welding parameters such as tool rotational speed, plunge depth and dwell time play a major role in determining the strength of polyethylene joints. An artificial neural network model was developed for the optimization of the friction stir spot welding parameters for high density polyethylene sheets. The input layer of the model consists the three welding parameters and in the output layer there is only the fracture load of the joints. There are 16 neurons in the hidden layer There is a good agreement between the model predictions and the experimental data.

**Keywords:** Friction stir spot welding parameters, polyethylene friction stir spot welding, artificial neural network, optimization.

## 1. GİRİŞ

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) 1991 yılında keşfedilen bir kaynak yöntemidir [1]. Alüminyum alaşımlarının ergitmeli kaynaklarında görülen kaynak hatalarından kurtulmak için geliştirilen bu kaynak yöntemi halen birçok metale uygulanmaktadır [1]. 2001 yılında otomotiv endüstrisinde alüminyum alaşımlarda sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemi uygulanmaya başlamıştır [2]. Otomotiv endüstrisinde alüminyum saçların elektrik direnç nokta kaynağı hatalarından kurtulmak için geliştirilen SKNK yöntemi başarı ile alüminyum, magnezyum ve çelik

saclara uygulanmaktadır [2]. Bu kaynak yöntemi, çizgisel kaynak dikişi üreten sürtünme karıştırma kaynağının, nokta halinde dikiş üreten bir versiyonudur [2]. Metallere uygulanan SKNK yönteminin uygulama safhaları Şekil 1'de görülmektedir [3]. Kaynak işleminde kullanılan takım uç ve omuz adı verilen iki kısımdan oluşmaktadır [4]. Belli bir hızda dönen kaynak takımının üst üste yerleştirilmiş iş parçalarına belli bir derinliğe kadar dalması, belirlenen derinlikte kaynak takımının belli bir süre dönmesi ve dönme süresi bittiğinde kaynak takımının geri çekilmesi ile iş parçalarının SKNK birleştirilmesi gerçekleşir [3]. Yapılan tanımdan anlaşıldığı gibi bu kaynak yönteminin dalma, dönme ve geri çekme adı verilen 3 safhası mevcuttur.



Şekil 1. SKNK yönteminin üç safhası: (a) Dalma, (b) Karıştırma ve (c) Geri çekme [3].

SKNK yönteminin dalma ve karıştırma safhalarında kaynak takım ucu ve takım omuzu çevresindeki malzemeleri karıştırmaktadır. Karıştırılan malzemede ise sürtünme sebebi ile ısınma gerçekleşmektedir [4]. Sürtünme ile ısınan malzeme yumuşamaktadır. Takımın dönmesi ile alt ve üst iş parçalarının yumuşamış kısımları birbiri içersinde karışmaktadır. Kaynak takımı omuzunun kaynak bölgesine uyguladığı basma kuvveti tesiri ile metal iş parçaları arasında katı halde kaynak birleşmesi gerçekleşir [5]. Metallerin SKNK birleştirmesinde kaynak parametreleri [6] ve takım geometrisi [7] kaynak dikişi oluşumunda ve dolayısıyla kaynağın dayanım üzerinde etkili olmaktadır.

Son 10 yılda termoplastiklerin SKK ve SKNK yöntemleri ile birleştirilmeleri konusunda yapılan araştırmalarla ilgili yayınlar başlamıştır. SKK yönteminin ABS, HDPE, PP ve PC plastiklerine başarıyla uygulanabileceği tespit edilmiştir [8,9]. SKNK uygulamaları genellikle HDPE [10-16], PP [17-20] ve PMMA [21] plastik malzemeleri üzerindedir. Yapılan araştırmalarda kaynak parametrelerinin (takım dönme hızı, takım dalma derinliği, takım karıştırma süresi) ve takım geometrisinin ( uç profili, uç uzunluğu, omuz boyutu ve omuz geometrisi) dikiş oluşumu ve kaynağın mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini açığa çıkarmak amacı güdülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda termoplastik SKNK birleştirmesinin bir katı hal kaynağı olmadığı ortaya çıkarılmıştır [13,14,20,21]. Kaynak takımı ucu çevresinde karıştırılan plastik malzemeler oluşan sürtünme ısı ile ergimektedir. Bunun sonucunda ergitmeli bir kaynak birleştirmesi gerçekleşmektedir [14,20].

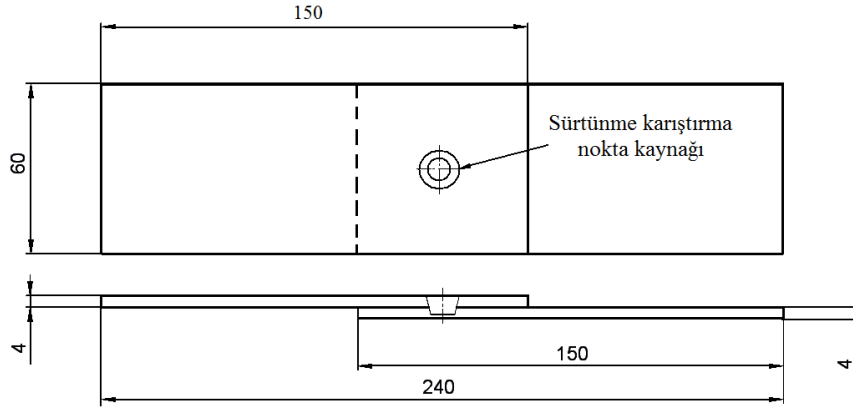
Yapay sinir ağlar (YSA), insan beyninin bilgi işleme teknolojisinden esinlenerek geliştirilmiş bir bilgi işlem teknolojisidir [22]. YSA, değişik alanlarda karmaşık fonksiyonları çözmeye kullanılan nöronlardan oluşmuş biyolojik bir ağın fonksiyonunu kopya eden hesaplama modelidir. Sistem 3 katmandan oluşur: giriş, gizli ve çıkış katmanıdır. Giriş katmanı sistemin giriş değişkenleri sayısı kadar nöronu, çıkış katmanı yanıt sayısı kadar nöronu barındırırken, gizli katman ise deneme yanılma yolu ile tespit edilen nöronları ihtiva eder. Bütün nöronlar bağlantılarla birbirlerine birleştirilir [23].

YSA yöntemi birçok endüstriyel sisteme başarı ile uygulanmıştır [23-26]. Kaynak endüstrisinde ağırlıklı olarak ergitmeli kaynakların kaynak dikiş geometrisi [27,28] ve kaynak mukavemetinin [29,30] optimizasyonu için YSA çalışmaları yapılmıştır. Son yıllarda alüminyum alaşımlarının SKK birleştirmelerinde YSA yöntemleri kaynak parametrelerinin optimizasyonu için kullanılmıştır [31-33].

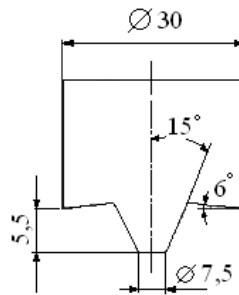
Termoplastiklerin SKNK yöntemi uygulamalarında kaynak parametrelerinin optimizasyonu için bu güne kadar sadece Taguchi tekniğinden faydalanılmıştır [34,35]. Bu nedenle bu makalede HDPE parçalarının SKNK birleştirmesinde optimum kaynak parametrelerini (takım dönme hızı, takım dalma derinliği ve takım karıştırma süresi) tespit etmek için YSA yönteminden faydalanılmıştır. Bu optimizasyonun sağlanması için kaynak parametreleri kaynak kopma kuvveti ile ilişkilendirilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada 4 mm kalınlıkta yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) levhalar kullanılmıştır. Bu levhalardan çekme-makaslama kaynak deney numuneleri kesilmiştir. Deney numunelerinin boyutu ve bunlara uygulanan kaynak Şekil 2’de görülmektedir. SKNK yöntemi uygulamasında kullanılan kaynak takımı SAE 1040 çeliğinden üretilmiş ve 40 R<sub>c</sub> sertliğine ısıl işlem ile sertleştirilmiştir. Kaynak takımının geometrisi ise Şekil 3’de görülmektedir. Kaynak parametreleri ve çalışma aralıkları ise Tablo 1’de özetlenmiştir. Takım omzunun iş parçasına dalma derinliği takım dalma derinliği olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Çekme-makaslama numunesinin şematik boyutları



Şekil 3. Kaynak takımının kesiti

Tablo 1. Kaynak parametreleri ve çalışma aralıkları.

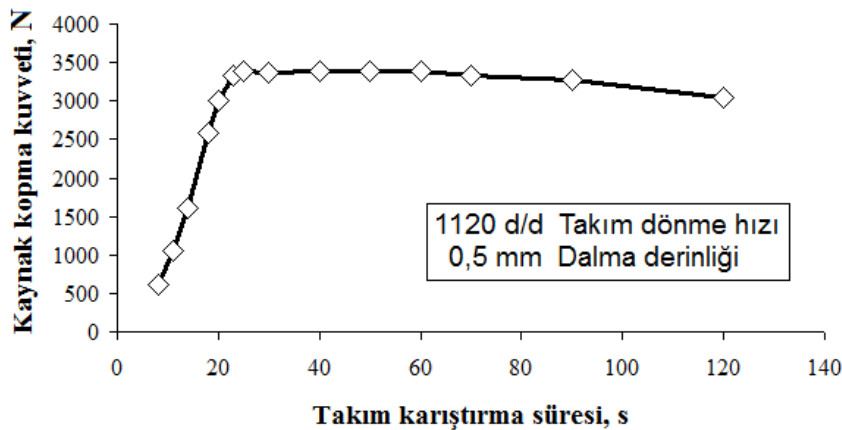
Parametreler	Birim	Aralık
Takım dönme hızı	devir / dakika (d/d)	280 – 1400
Takım dalma derinliği	milimetre (mm)	0,01-0,70
Takım karıştırma süresi	saniye (s)	8– 90

Kaynak işlemleri bir üniversal freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Kaynak birleştirme noktasının çekme-makaslama numunesinin tam ortasında teşekkül etmesi için bir bağlama kalıbı kullanılmıştır. Bu kalıp sayesinde bütün deneylerin kaynak işlemleri standart halde gerçekleştirilmiştir. Bütün kaynak işlemleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Takım dalma hızı bütün kaynak işlemlerinde 0,3 mm/s olarak sabit tutulmuştur. Bütün kaynaklarda tespit edilen karıştırma süresi biter bitmez takımın dönmesi durdurulmuştur. Kaynak işlemi bitiminde takım derhal geri çekilmemiştir. Sıvı haldeki malzemenin katılaşması maksadıyla takım 30 saniye bekletildikten sonra geri çekilmiştir. Her kaynak koşulunda 5 adet numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin çekme-makaslama deneyleri oda sıcaklığında Instron çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Bütün deneylerde çekme hızı 5 mm/s olarak sabit tutulmuştur. Çekme-makaslama deneyinde elde edilen kaynak kırılma kuvveti makale içerisinde kaynak kopma kuvveti olarak belirtilmiştir.

### 3. ÇEKME MAKASLAMA DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

Yapılan kaynaklar, üç kaynak parametresinin etkisini ortaya çıkarmak için üç gurup halinde dizayn edilmiştir. Her deney gurubunda iki parametre sabit tutulurken bir parametre değiştirilmiştir. Bu parametrenin kaynak kopma kuvveti üzerindeki tesiri çekme-makaslama deneyiyle tespit edilmiştir. SKNK birleştirmelerinde amaç en büyük kaynak kopma kuvvetini elde etmektir. Her deney şartında aynı kaynak parametreleri ile birleştirilen 5 numunenin çekme-makaslama deney sonucu tespit edilmiş ve bunların aritmetik ortalamaları tespit edilmiştir. Deney sonuçlarından faydalanılarak kaynak parametresi kaynak kopma kuvveti diyagramları çizilmiştir.

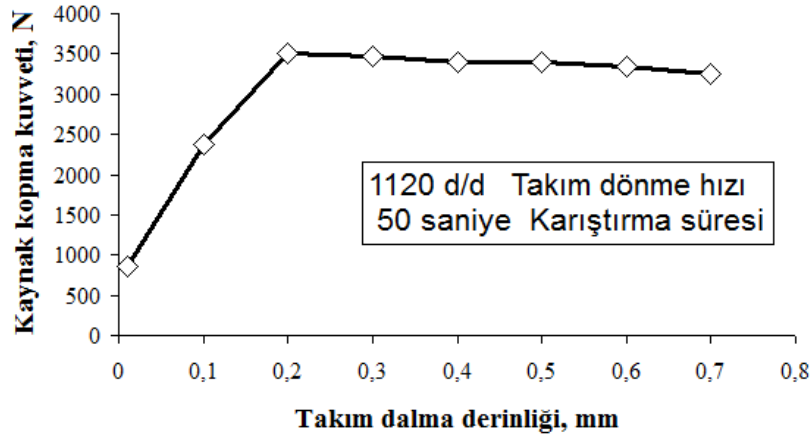
1120 devir/dakika takım dönme hızı ve 0,5 mm takım dalma derinliği ile yapılan kaynaklarda takım karıştırma süresine bağlı olarak elde edilen ortalama kaynak kopma kuvvet değerlerinden faydalanılarak Şekil 4' teki grafik çizilmiştir. Karıştırma süresi 8 saniyeden 25 saniyeye çıkana kadar kaynak kopma kuvveti hızlı bir şekilde artmaktadır. 25 saniye ile 60 saniye arasında hemen hemen aynı kaynak kopma kuvveti elde edilmektedir. 60 saniyenin üzerine çıktıkça kaynak kopma kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir.



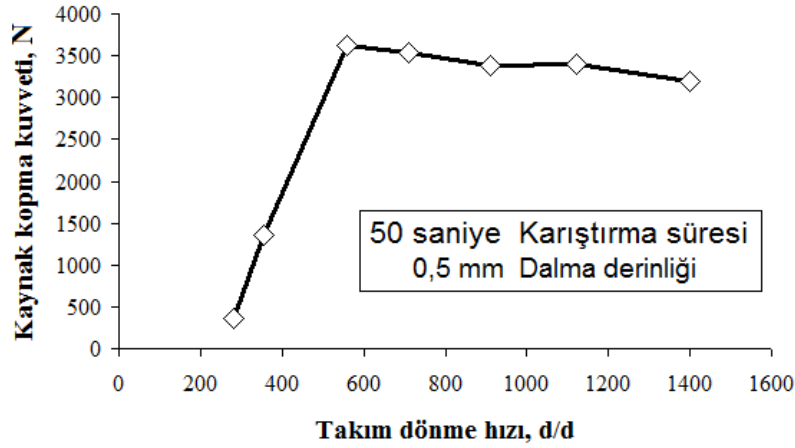
Şekil 4. Takım karıştırma süresinin kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkisi

1120 devir/dakika dönme hızı ve 50 saniye takım dönme süresi ile yapılan kaynaklarda takım dalma derinliğine bağlı olarak elde edilen ortalama kaynak kopma kuvvetlerinden faydalanılarak Şekil 5'teki grafik çizilmiştir. Takım dalma derinliği 0,01 mm'den 0,20 mm' ye kadar artması halinde kaynak kopma kuvveti yükselmiş ve 0,20 mm takım dalma derinliğinde Şekil 5' de görüldüğü gibi maksimum ortalama değer olan 3510 N kuvvetine ulaşılmıştır. 0,20 mm takım dalma derinliğinden

0,70 mm takım dalma derinliğine kadar ise kaynak kopma kuvvetinin giderek azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Takım dalma derinliğinin kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkisi



Şekil 6. Takım dönme hızının kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkisi.

50 saniye takım karıştırma süresi ve 0,50 mm takım dalma derinliğinde yapılan kaynaklarda takım dönme hızının ortalama kaynak kopma kuvveti üzerindeki tesiri Şekil 6'da görülmektedir. 280 devir/dakika takım dönme hızından 560 devir/dakika takım dönme hızına kadar kaynak kopma kuvvetinin arttığı ve 560 devir/dakikada 3623 N'luk en yüksek değere ulaştığı tespit edilmiştir. 560 devir/dakika takım dönme hızından 1400 devir/dakika takım dönme hızına kadar kaynak kopma kuvvetinin sürekli azaldığı tespit edilmiştir.

Şekil 4, 5 ve 6'daki grafiklerin benzer trendlere sahip olduğu görülmektedir. Değişken olan parametre (örneğin takım karıştırma süresi) çok küçük değerlerde ise kaynak bölgesinde yeteri kadar sürtünme ısı oluşmadığından elde edilen kaynak dikişi boyutu küçük olmaktadır [13-15]. Küçük kaynak dikiş boyutu kaynak kopma kuvvetinin zayıflığına sebep olmaktadır. Parametrenin değeri optimum seviyesine çıkana kadar kaynak ısı yükselmekte ve kaynak kopma kuvveti artmaktadır [14]. Optimum değer üzerine çıkan kaynak parametrelerinde ise kaynak bölgesinde aşırı ısınma meydana gelmektedir. Bu kaynak şartlarında dikiş boyutu büyük olmasına rağmen kaynak dikişinde oluşan aşırı ısınma nedeniyle mekanik bölünme gerçekleşmekte ve kaynak kopma kuvveti düşmektedir [20].

#### 4. YAPAY SİNİR AĞI MODELİ GELİŞTİRİLMESİ

Geliştirilen yapay sinir ağ modelinde ilk aşama olarak veri seti 0-1 arasında aşağıdaki denklem kullanılarak normalize edilmiştir [32].

$$X=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min}) \quad (1)$$

X= Veri setinin normalize değeri  
X<sub>i</sub>= Normalize edilecek veri seti  
X<sub>min</sub>= Veri setinin minimum değeri  
X<sub>max</sub>= Veri setinin maksimum değeri

Bu çalışmada YSA modelini oluşturmak, eğitmek ve test etmek için neurosolutions for Excel yazılımı kullanılmıştır. YSA modelinde danışmanlı öğrenmeli, ileri beslemeli, geriye yayımlı ve üç katmanlı yapay sinir ağı kullanılmıştır. Geliştirilen ağın eğitim fonksiyonu olarak, standart sayısal optimizasyon yöntemlerini kullanan algoritmalarından birisi olan, Levenberg-Marqua algoritması kullanılmış [24] ve transfer fonksiyonu olarak TanhAxon transfer fonksiyonu kullanılmıştır [36]. Ağın performansını değerlendirmek için, hatanın kareler ortalaması (MSE) dikkate alınmıştır.[24]

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2 \quad (2)$$

Burada

y<sub>i</sub>= Gerçek çıkış değeri  
d<sub>i</sub> = YSA modeli çıkış değeri  
n= Test sayısı

##### 4.1 Geliştirilen YSA modelinin eğitimi

Farklı parametrelerle yapılan kaynakların toplam sayısı 28 tanedir. Bu kaynakların çekme deney sonuçlarının 23 tanesi yapay sinir ağının eğitiminde ve geriye kalan 5 tanesi ise yapay sinir ağının test aşamasında kullanılmıştır. Tablo 2' de eğitim ve test veri seti sonuçları görülmektedir.

Gizli katman nöron sayısını belirlemede genel kural olan deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır. İlk önce veri sayısının az olduğu durumlarda sıklıkla kullanılan k-fold yöntemi [24] ile veri setinde ayrılan test değerleri her defasında değiştirilerek toplam 5 grup elde edilmiştir. Yani veri gurubu için 5 farklı eğitim-test gurubu eşleştirilmesi yapılmıştır. Her eşleştirme gurubu 1-20 arası gizli nöron sayısı ile eğitilmiş ve en küçük hatayı veren yapay sinir ağı yapısı elde edilmiştir. Böylece YSA modelinin eğitimi için 100 deneme yapılmış ve bu denemelere ait sonuçlar Tablo 3'de gösterilmiştir. Denemeler sonucunda en küçük hatanın 4. grupta ve 16 gizli katman nöron sayısında elde edildiği saptanmıştır (Bak Şekil 7).

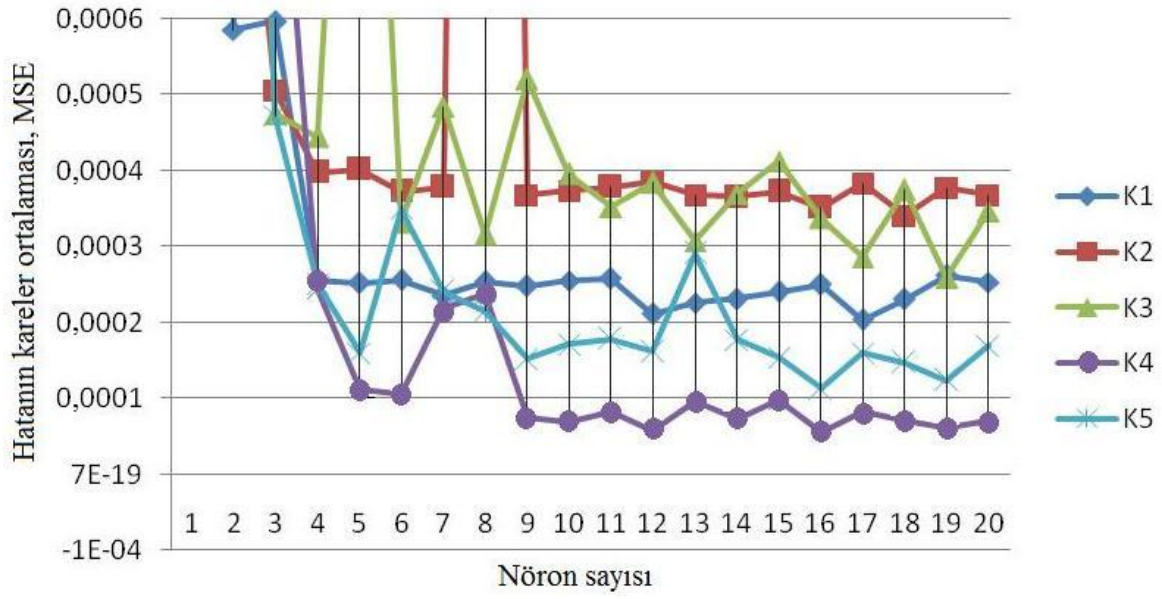
Tablo 2. Eğitim ve test veri seti

Karıştırma süresi	Dalma derinliği	Takım dönme hızı	Ortalama kopma kuvveti
0,00	0,28	0,38	0,08
0,03	0,28	0,38	0,21
0,05	0,28	0,38	0,38
0,09	0,28	0,38	0,68
0,11	0,28	0,38	0,81
0,13	0,28	0,38	0,91
0,15	0,28	0,38	0,93
0,20	0,28	0,38	0,92
0,33	0,28	0,25	1,00
0,33	0,28	0,38	0,98
0,33	0,28	0,56	0,93
0,33	0,28	0,75	0,93
0,33	0,28	1,00	0,87
0,33	0,71	0,38	0,93
0,33	0,86	0,38	0,91
0,33	1,00	0,38	0,89
0,33	0,28	0,00	0,00
0,33	0,28	0,07	0,31
0,33	0,00	0,38	0,15
0,33	0,13	0,38	0,62
0,33	0,28	0,38	0,97
0,33	0,42	0,38	0,95
0,33	0,57	0,38	0,93
<b>0,29</b>	<b>0,28</b>	<b>0,38</b>	<b>0,93</b>
<b>0,38</b>	<b>0,28</b>	<b>0,38</b>	<b>0,93</b>
<b>0,46</b>	<b>0,28</b>	<b>0,38</b>	<b>0,93</b>
<b>0,73</b>	<b>0,28</b>	<b>0,38</b>	<b>0,89</b>
<b>1,00</b>	<b>0,28</b>	<b>0,38</b>	<b>0,82</b>

Eğitim veri seti

Test veri seti





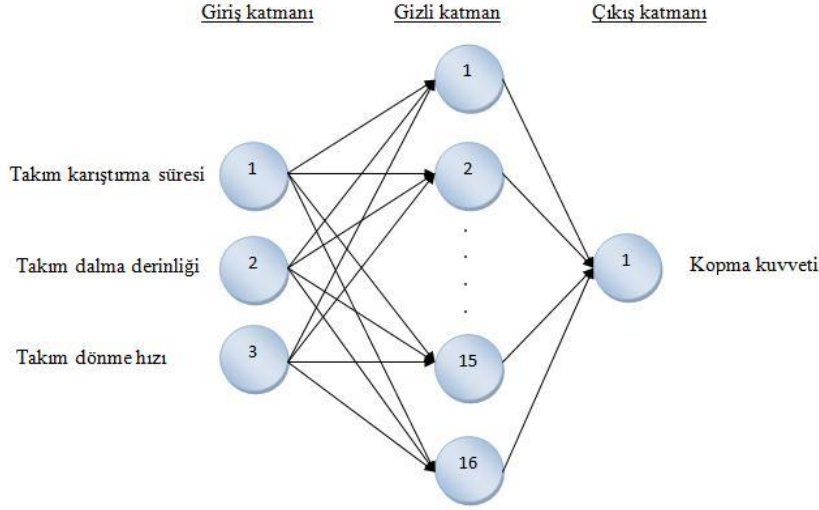
Şekil 7. Eğitim veri setinde farklı gizli katman nöron sayılarında elde edilen MSE değerleri

Tablo 3. YSA modelinin eğitimi sonucunda elde edilen MSE değerleri

Nöron sayısı	K1	K2	K3	K4	K5
1	0,005442	0,002426	0,002161	0,007124	0,005041
2	0,000585	0,001059	0,001980	0,002476	0,002291
3	0,000596	0,000505	0,000474	0,000965	0,000472
4	0,000256	0,000397	0,000444	0,000244	0,000251
5	0,000252	0,000401	0,001410	0,000112	0,000160
6	0,000256	0,000372	0,000332	0,000105	0,000349
7	0,000235	0,000378	0,000484	0,000218	0,000240
8	0,000254	0,003939	0,000316	0,000238	0,000215
9	0,000248	0,000367	0,000520	7,50E-05	0,000152
10	0,000255	0,000373	0,000395	6,80E-05	0,000171
11	0,000258	0,000378	0,000352	8,20E-05	0,000178
12	0,000211	0,000385	0,000384	5,80E-05	0,000161
13	0,000226	0,000367	0,000307	9,60E-05	0,000291
14	0,000231	0,000365	0,000369	7,20E-05	0,000177
15	0,000240	0,000372	0,000412	9,80E-05	0,000154
16	0,000250	0,000351	0,000337	<b>5,60E-05</b>	0,000113
17	0,000203	0,000383	0,000286	8,30E-05	0,000160
18	0,000230	0,000340	0,000374	7,07E-05	0,000147
19	0,000261	0,000377	0,000259	6,04E-05	0,000124
20	0,000253	0,000367	0,000346	6,99E-05	0,000169

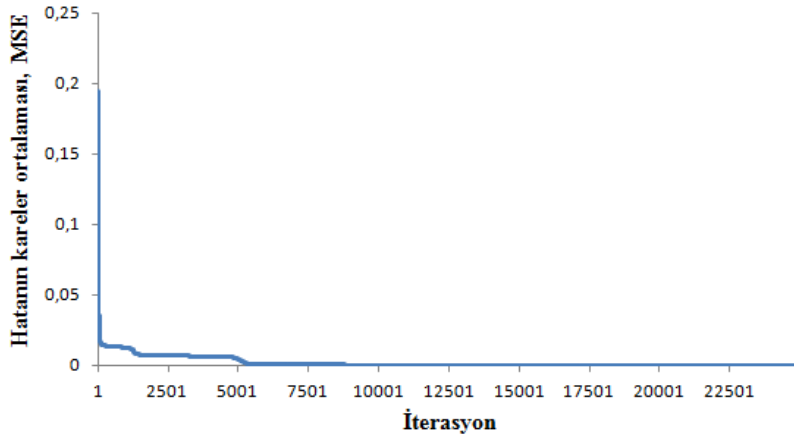


Geliştirilen YSA modelinin yapısı Şekil 8’de gösterilmiştir. Giriş katmanlı nöron sayısı 3 tane olup bunlar sırasıyla karıştırma süresi, takım dalma derinliği ve takım dönme hızıdır. Gizli katmanda bir sütun ve bu sütunda 16 tane nöron olması gerektiği Şekil 8’ de görülmektedir.



Şekil 8. Geliştirilen YSA modeli

Geliştirilen YSA modelinde en küçük hatayı 16 nörona sahip K4 ağı olduğu gerek Tablo 3 gerekse Şekil 7 den anlaşılmaktadır. Çıkış katmanında kaynak kopma kuvvetini gösteren tek bir nöron vardır. Bu modelle elde edilen MSE değerleri Şekil 9’da görülmektedir. Şekil 9’da gösterildiği gibi eğitimde iterasyon değeri 25 000 alınmıştır. Minimum MSE 5 000 iterasyonda elde edilmiştir.



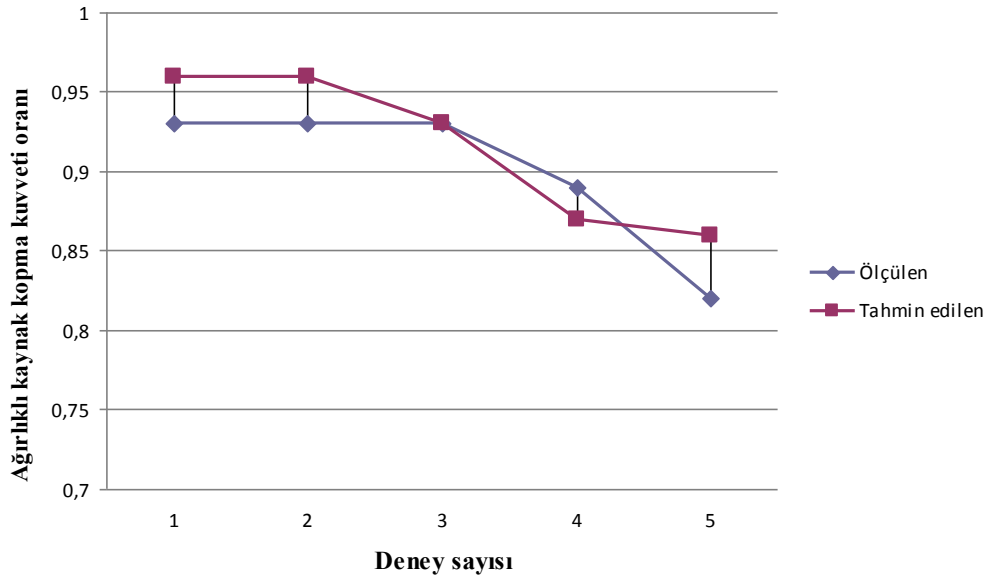
Şekil 9. Yapay sinir ağının eğitim sonuçları.

## 4.2 GELİŞTİRİLEN YSA MODELİNİN TEST EDİLMESİ

Geliştirilen YSA modelinin test sonuçları Tablo 4 ve Şekil 10’ da verilmiştir. Tablo 4’de ortalama hatanın %2,81 olduğu görülmektedir. Şekil 10’ da çekme deney sonuçları ile geliştirilen YSA modelinden elde edilen çekme deney sonuçlarının çok yakın çıktığı görülmektedir. Bu sonuçlar geliştirilen modelin yeteri kadar başarılı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4. Tahmin edilen ve ölçülen değerlerin kıyaslanması

Ölçülen	Tahmin edilen	% Hata
0,93	0,96	3,55
0,93	0,96	3,44
0,93	0,93	0,48
0,89	0,87	2,27
0,82	0,86	4,31
% Ortalama hata		2,81



Şekil 10. Tahmin edilen ve ölçülen değerlerin karşılaştırılması

## 5. GENEL SONUÇLAR

Polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynak birleştirmelerinde takım dönme hızı, takım karıştırma süresi ve takım dalma derinliği birleştirmenin kopma değerini tayin ettiği deneysel olarak tespit edilmiştir. Kopma kuvveti üzerinde etkin olan kaynak parametrelerinin optimizasyonu için geliştirilen YSA modeli danışmanlı öğrenmeli, ileri beslemeli, geriye yayımlı ve üç katmanlı bir modeldir. Geliştirilen YSA modelinde transfer fonksiyonu olarak TanhAxon, eğitim algoritması olarak ise Levenberg-Marquardt kullanılmıştır. Yapılan eğitim çalışmaları sonrası en küçük hatayı gizli katman nöron sayısının 16 olduğu YSA modelinin verdiği tespit edilmiştir. Bu model teste tabi tutulmuş ve ortalama yüzdesel hata miktarının % 2,81 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak yapay sinir ağları metodunun sürtünme karıştırma nokta kaynak işlemlerinde başarılı bir şekilde uygulanabileceği tespit edilmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] NANDAN, R., DEBROY, T., BHADSHIA, H.K.D.H., Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, **Progress in Materials Science**, 53, 980–1023, (2008).

- [2] KALUÇ, E., TABAN, E., Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi, (Sürtünme Karıştırma Kaynağı), 83, **TMMOB MMO Yayını**, İstanbul, (2007).
- [3] AWANG, M., MUCİNO, V.H., FENG, Z., DAVID, S.A., Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding (FSSW) process: Use of an explicit adaptive meshing scheme", **SAE International Paper**, 01, 1251-1256, (2005).
- [4] YANG, Q., MIRONOV, S., SATO, Y.S., OKAMOTO, K., Material flow during friction stir spot welding. **Material Science and Engineering A**, 527, 4389-4398, (2010).
- [5] GERLICH, A., SU, P., NORTH, T.H., BENDZSAK, G.J., Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloys, **Materials Forum**, 29, 290-294, (2005).
- [6] TOZAKI, Y., UEMATSU, Y., TOKAJI, K., Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys, **Fatigue and Fracture of Engineering Materials Structure**, 30, 143-148, (2007).
- [7] BADARINARAYAN, H., YANG, Q., ZHU, S., Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy, **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**, 49 142-148, (2009).
- [8] STRAND, S.R., Effects of friction stir welding on polymer microstructure, Master of Science Thesis, Brigham Young University, Mechanical Engineering Department, (2004).
- [9] SCIALPI, A., TROUGHTON, M., ANDREWS, S., FILIPPIS, L.A.C., In-line reciprocating friction stir welding of plastics, **Joining Plastics**, 1, 52-57, (2007).
- [10] MOSTAFAPOUR, A., AZARSA, E., A study on the role of processing parameters in joining polyethylene sheets via heat assisted friction stir welding: Investigating microstructure, tensile and flexural properties, **International Journal Of The Physical Sciences**, 7, 4, 647 - 654, (2012).
- [11] BOZKURT, Y., The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets, **Materials and Design**, 35, 440-445, (2012).
- [12] REZGUI, M. A., AYADI, M., CHEROUAT, A., HAMROUNI, K., ZGHAL, A., BEJAOU, S., Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of polyethylene, **EPJ Web of Conferences**, 6, 07003 page 1-8 (2010)
- [13] BİLİCİ, M.K., YÜKLER, A.İ., Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets, **Materials and Design**, 33, 545-550, (2012).
- [14] BİLİCİ, M.K., YÜKLER, A.İ., Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets, **Materials and Design**, 33, 145-152, (2012).
- [15] BİLİCİ, M. K, YÜKLER, A.İ., KURTULMUŞ, M., Yüksek yoğunluklu polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağında kaynak ucu geometrisinin kaynak mukavemetine etkisi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 23, 3, 111- 122, (2011).
- [16] BİLİCİ, M.K., YÜKLER, A.İ., KURTULMUŞ, M., Takım geometrisinin yüksek yoğunluklu polietilenin sürtünme karıştırma nokta kaynağına tesiri, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 15,3, 265-270, ( 2011).

- [17] PAYGANEH, G. H., ARAB, N. B., ASL, Y.D., GHASEMİ, F.A., BOROUJENİ, M.S., Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds, **International Journal of the Physical Sciences**, 6,19, 4595-4601, (2011).
- [18] SAEIDI, M., ARAB, N.B., GHASEMI, F.A., The effect of pin geometry of mechanical properties of PP composite friction stir welds, IIW International Congress on Welding and Joining, Tehran, (2009).
- [19] ARICI, A., MERT, Ş., Friction stir spot welding of polypropylene, **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 1,1, 1-4 (2008).
- [20] KURTULMUŞ, M., Friction stir spot welding parameters for polypropylene sheets, **Scientific Research and Essays**, 7(8), 947-956, (2012).
- [21] OLIVEIRA, P.H.F., FILHO, S.T.A., SANTOS, J.F.D., HAGE, E., A Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA, **Materials Letters**, 64 (19), 2098–2101 (2010).
- [22] ELMAS, Ç., Yapay Zeka Uygulamaları, 92, **Seçkin Yayınevi**, Ankara, (2012).
- [23] SAEMI, M., AHMADI, M., VARJANI, A.Y., Design of neural networks using genetic algorithm for the permeability estimation of the reservoir, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 59 (1), 97-105, (2007).
- [24] YAYLA, A.Y., HARTOMACIOĞLU, S., Tedarikçi değerlendirme sürecinde yapay sinir ağlarının kullanımı ve sektörel bir uygulama, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 17,2, 97-107, (2011).
- [25] SALIMI, A., ABBASGHOLIZADEH, S., TAGHIZADEH, S., SAFARIAN, A., Using of artificial neural Networks to predict drill wear in machining process, **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, 5, 2752-2760, (2011).
- [26] NIRKHI, S., Potential use of artificial neural network in data mining, The Second International Conference on Computer and Automation Engineering, Singapore, (2010).
- [27] DEY, V., PRATIHAR, D.K., DATTA, G.L., JHA, M. N., SAHA, T. K., BAPAT, A. V., Optimization and prediction of weldment profile in bead-on-plate welding of Al-1100 plates using electron beam, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 48, 513–528, (2010).
- [28] NAGESH, D. S., DATTA, G. L., Modeling of fillet welded joint of GMAW process: integrated approach using DOE, ANN and GA, **International Journal Interactions Design Manufacture**, 2, 127–136, (2008).
- [29] DUTTA, P., PRATIHAR, D.K., Modeling of TIG welding process using conventional regression analysis and neural network-based approaches, **Journal of Materials Processing Technology**, 184, 56–68, (2007).
- [30] TSENG, H.Y., Welding parameters optimization for economic design using neural approximation and genetic algorithm, **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 27, 897–901, (2006).
- [31] OKUYUCU, H., KURT, A., ARCAKLIOĞLU, E., Artificial neural network application to the friction stir welding of aluminum plates, **Materials and Design**, 28, 78–84, (2007).

- [32] ELANGOVA, K., BALASUBRAMANIAN, V., BABU, S., Predicting tensile strength of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model, **Materials and Design**, 30, 188–193, (2009).
- [33] LAKSHMINARAYANAN, A. K., BALASUBRAMANIAN, V., 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, 9-18,(2009).
- [34] BİLİCİ, M.K., YÜKLER, A.İ., KURTULMUŞ, M., The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets, **Materials and Design**, 32 (7), 4074- 4049, (2011).
- [35] BİLİCİ, M.K., Application of Taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene, **Materials and Design**, 35, 113-119, (2012).
- [36] PIULEAC, C.G., RODRIGO, M.A., CANIZARES, P., CURTEANU, S., SAEZ, C., "Ten steps modeling of electrolysis processes by using neural networks", **Environmental Modelling & Software**, 25, 74–81 (2010).