



## Development of an artificial neural network using parametric correlation technique for the determination of machined torsional spring stiffness

Bariş Sabuncuoğlu<sup>1\*</sup>, Oğuz Demirtaş<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Hacettepe University, Ankara, 06800, Turkey

<sup>2</sup>TUBITAK SAGE, Ankara, 06261, Turkey

### Highlights:

- Development of artificial neural network for helical machined springs
- Utilization of Parametric Correlation Technique
- Confirmation of ANN results with FEA and Torsional tests

### Keywords:

- Machine torsional spring
- Finite element method
- Parameter correlation analysis
- Artificial neural network

### Article Info:

Research Article  
Received: 05.11.2019  
Accepted: 15.06.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.641491

### Correspondence:

Author: Bariş Sabuncuoğlu  
e-mail: barissabuncuoğlu@hacettepe.edu.tr  
phone: +90 553 408 5146

### Graphical/Tabular Abstract

Development of an artificial neural network (ANN) for the determination of the spring constant of machined helical springs, which may be preferred over conventional springs due to their high performance and operating efficiency, is presented. Initially, finite element analyses were performed with various dimensional parameters and the obtained spring constant values were verified with the tests performed with the designed test setup. Parametric correlation analysis was performed using the confirmed finite element results and the effect of each spring dimensional parameter on the spring constant was determined. The parameters required for ANN training was determined according to the this correlation result. The spring constant results obtained from the developed ANN was compared with the finite element results confirmed by the tests and it was determined that the ANN was successful in the determination of the spring constant. The importance of parametric correlation analysis has been revealed in the development of ANN.

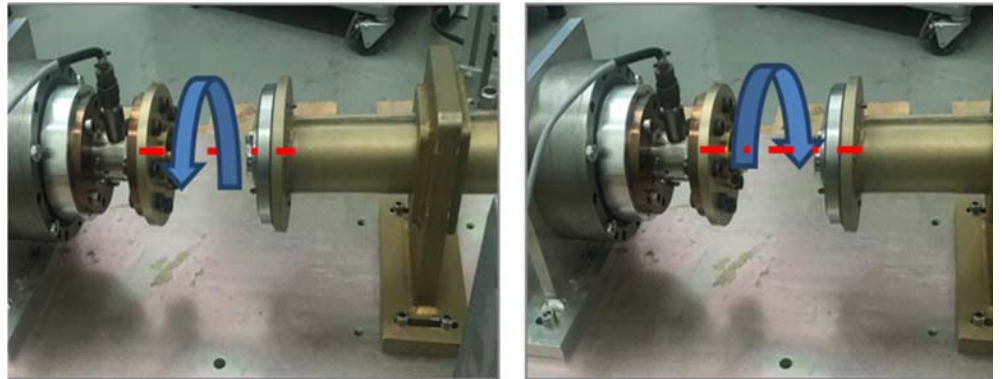


Figure A. (Movement directions of the test setup)

**Purpose:** The main purpose of this study is; To determine the effects of the design parameters of machining springs working under angular displacement on spring stiffness and stress by experimental and numerical methods, Verifying numerical approaches by experimental methods, To develop an artificial neural network that enables us to quickly obtain the torsion spring constant value depending on the processing spring design parameters.

**Theory and Methods:** Torsion spring constants of different sizes of machining springs were determined by experimental and numerical methods.

**Results:** In the results of this study; A maximum of 1.6% difference between the parameters in ANN training data set and finite element results and a maximum of 8% in intermediate values were observed. Considering the differences between the test and finite element analysis, this difference was observed to be at an acceptable level. The results obtained with the values selected outside the database set show an increase in% difference values. It is concluded that this developed ANN model is not suitable to be used for values outside the database.

**Conclusion:** As a result of this study; An artificial neural network (ANN) based on parameter correlation was developed to determine the spring constants of the machined springs that are frequently used in the aviation industry.



## Helisel işleme yay sabitinin belirlenmesi amacıyla parametrik korelasyon tekniğini kullanarak bir yapay sinir ağı geliştirilmesi

Barış Sabuncuoğlu<sup>1\*</sup>, Oğuz Demirtaş<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, 06800, Beytepe, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>TÜBİTAK-SAGE, 06261, Mamak, Ankara, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- İşleme helisel yay için yapay sinir ağı geliştirilmesi
- Parametrik korelasyon tekniğinin uygulanması
- YSA sonuçlarının sonlu eleman ve burulma testleriyle doğrulanması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 05.11.2019  
Kabul: 15.06.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.641491

### Anahtar Kelimeler:

İşleme helisel yay,  
sonlu eleman yöntemi,  
parametre korelasyon  
analizi,  
yapay sinir ağı

### ÖZET

Yüksek performans ve çalışma verimliliği ile geleneksel yaylara göre tercih edilebilen işleme helisel yayların yay sabitinin belirlenmesi için bir yapay sinir ağı (YSA) geliştirme yöntemi sunulmuştur. YSA eğitimi için ilk olarak çeşitli boyutsal parametrelerle sonlu eleman analizleri yapılmış ve elde edilen yay sabiti değerleri tasarlanan deney düzeneğinde gerçekleştirilen testlerle doğrulanmıştır. Doğrulan sonlu eleman sonuçları ile parametrik korelasyon analizi yapılmış ve her yay boyutsal parametresinin yay sabiti üzerindeki etkisi belirlenmiştir. YSA eğitimi için gerekli parametreler ve sayıları bu korelasyon sonucuyla belirlenmiştir. Geliştirilen YSA ile elde edilen yay sabiti sonuçları, deneylerle doğrulan sonlu eleman sonuçlarıyla kıyaslanmış ve YSA'nın yay sabitinin belirlenmesinde oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir. YSA geliştirilmesinde parametrik korelasyon analizinin yapılmasının önemi ortaya çıkarılmıştır.

## Development of an artificial neural network using parametric correlation technique for the determination of machined torsional spring stiffness

### H I G H L I G H T S

- Artificial neural network development for machined torsional spring
- Utilization of parametric correlation technique
- Confirmation of ANN results with FEA and torsional tests

### Article Info

Research Article  
Received: 05.11.2019  
Accepted: 15.06.2020

### DOI:

10.17341/gazimmfd.641491

### Keywords:

Machine torsional spring,  
finite element method,  
parameter correlation  
analysis,  
artificial neural network

### ABSTRACT

Development of an artificial neural network (ANN) for the determination of the spring constant of machined helical springs, which may be preferred over conventional springs due to their high performance and operating efficiency, is presented. Initially, finite element analyses were performed with various dimensional parameters and the obtained spring constant values were verified with the tests performed with the designed test setup. Parametric correlation analysis was performed using the confirmed finite element results and the effect of each spring dimensional parameter on the spring constant was determined. The parameters required for ANN training was determined according to the this correlation result. The spring constant results obtained from the developed ANN was compared with the finite element results confirmed by the tests and it was determined that the ANN was successful in the determination of the spring constant. The importance of parametric correlation analysis has been revealed in the development of ANN.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: barissabuncuoğlu@hacettepe.edu.tr, oguz.demirtas@tubitak.gov.tr / Tel: +90 553 408 5146

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Helisel yaylar, sanayi devriminden beri tasarımlarda sıkça kullanılan bir makine elemanıdır. Tel sarım yöntemi ile üretilen geleneksel tipteki helisel yaylar; bağlantı arayüzleri ile tek bir bütün olmamaları, malzeme seçeneklerinin sınırlı olması gibi nedenlerden dolayı günümüzdeki modern makinaların ihtiyacını karşılamakta yetersiz kalabilmektedirler. Bunun yanında geleneksel tipteki yaylara göre daha yüksek performans ve daha fazla fonksiyon elde etmek için tercih edilen işleme helisel yaylar, dolu malzemenin talaşlı imalat yöntemleriyle işlenmesi sonucunda elde edilmektedirler. Kullanılacakları yere uygun bağlantı arayüzü ile bir bütün halinde olmaları en büyük özellikleridir. Geleneksel yaylara göre daha küçük alanlarda çalışma imkanı sunan bu yaylar, havacılık, uzay, savunma ve medikal gibi birçok sektörde tercih edilmektedirler. [1-3]. Şekil 1'de farklı kullanım alanları için üretilmiş işleme yaylar gösterilmiştir [2].



**Şekil 1.** Farklı tiplerdeki helisel işleme yaylar  
(Different types of helical machined springs) [2]

Yapısal olarak gereksinimleri karşılayacak tasarımların yapılabilmesi için yük aktarımında kritik öneme sahip helisel yayların mekanik davranışının bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle bu yaylarla ilgili literatürde numerik ve deneysel birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak helisel işleme yaylarla ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır. Salwiski ve Michalczyk [4], işleme yaylarda sonlu elemanlar yöntemleriyle gerilme analizi yapmış ve geleneksel yaylarla kıyaslamışlardır. Teorik formüllerden elde ettikleri gerilmeler, gerçek gerilmelerden daha küçük çıkmıştır. Bunun sebebinin analizlerde yayların yalnızca burulma gerilmelerinden etkilendiğini ve simetrik yüklendiğini kabul etmeleri olduğunu belirtmişlerdir. Ahmed vd. [5], sonlu elemanlar yöntemini kullanarak üç ve dört kanallı iki farklı işleme yayının statik ve dinamik karakteristik özelliklerini belirleyip birbirleriyle kıyaslamıştır. Bu çalışmanın sonucunda, dört kanallı yayın üç kanallı yaydan daha yüksek

katılık ve daha yüksek doğal frekans değerleri gösterdiği sonucuna ulaşmıştır. Nama [6], dikdörtgen kesite sahip helisel yaylarda, Solidworks programını kullanarak maksimum gerilme, maksimum deformasyon ve doğal frekans değerlerini araştırmıştır. Zeydan [7], işleme basma yaylarda; basma yükü altında helis açısının yay uç kısımlarındaki deformasyona etkisini incelemiştir. Bu çalışmanın sonucunda helis açısı arttıkça yay uç kısımlarındaki deformasyonun arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Literatürde bu yaylarla ilgili bazı analitik çalışmaların da yapıldığını görmekteyiz. Krzysztof [8], işleme yaylarda maksimum gerilmeyi hesaplamak için bir matematik modeli önermiştir. Bu model, gerilme yığılma katsayısı ve gerilme dağılımı katsayısının maksimum gerilme üzerindeki etkisini içermektedir. Ahmed vd. [9], işleme yayların katılığı üzerinde analitik ve teorik çalışmalar yürütmüştür. Bunun sonucunda, yaydaki kanal sayısı arttıkça yayın katılığının ve doğal frekansının arttığını ortaya koymuştur. Calderon ve Perez [10], işleme yaylar ile tel sarım yayları, avantaj ve verimlilik bakımından kıyaslamışlardır. İşleme yayların özel tasarımlar için daha avantajlı olduğunu ortaya koymuşlardır. Nama [11], dikdörtgen kesite sahip işleme yaylarda, helis açısının yay uzama miktarına ve yay üzerinde oluşan kesme gerilmelerine etkisini incelemiştir. Helis açısının artması sonucunda, yay uzama miktarının arttığı ve yaydaki kesme gerilmelerinin azaldığı sonucuna ulaşmıştır.

Parametrelerin sistem cevabına etkilerini belirlemek için son yıllarda yapay sinir ağı (YSA) geliştirme çalışmalarının oldukça yaygınlaştığını görmekteyiz. YSA, sistem parametrelerinin değişmesi ile sistemin vereceği cevabı öngören matematiksel fonksiyonları ifade eder. YSA üzerine mühendislik uygulamalarının yanı sıra [12-15], sağlık ve sosyal alanlarda da birçok araştırmalar yapıldığını görülmektedir [16,17]. Bu çalışmada, tork aktarımında kullanılan işleme yayların tasarımındaki boyutsal parametrelerin burulma yüklemeleri altındaki burulma direngenliğine etkileri gözönüne alınarak bir YSA geliştirilmiştir. YSA'nın oluşturulmasında, sonlu eleman yöntemleriyle elde edilen işleme yay parametrik analiz sonuçları kullanılmıştır. YSA'nın doğru bir şekilde yay sabiti tahmini yapabilmesi için veri tabanında kullanılan bu parametrik analiz sonuçlarının doğruluğunun irdelenmesi gereklidir. Bu nedenle çalışmada, ilk olarak sonlu elemanlar yöntemi ile dört farklı tip işleme yay için burulma analizleri, ardından da aynı yaylar için işleme yay burulma test düzeneği tasarlanarak burulma testleri yapılmıştır. Sonuçlar birbirleriyle kıyaslanarak analizlerin gerçekçiliği doğrulanmıştır. Analizlerde ek olarak yay üzerindeki gerilmeler de incelenerek uygulanan yük altında yay üzerindeki kritik bölge ve kalıcı deformasyon olup olmadığı belirlenmiştir. Ardından, YSA geliştirme çalışmalarının etkin bir şekilde yapılabilmesi için işleme yay ebatlarını belirleyen boyutsal parametrelerin burulma yay sabiti üzerindeki etki şiddetleri korelasyon tekniği ile belirlenmiştir. Son olarak bu teknik ile belirlenen parametreler ile YSA geliştirilmiştir.



## 2. BURULMA TESTLERİ (TORSIONAL TESTS)

### 2.1. Test Düzeneği Tasarımı ve Test Numuneleri (Test Setup Design and Test Specimens)

İşleme yayların burulma yüküne bağlı açılmal hareketini belirlemek için bir test düzeneği tasarlanmıştır. Deney düzeneğinin tasarımında; açılmal hareketi sağlayan yüksek kesinlikli Kollmorgen marka servo motor [18], servo motorun kontrolünü sağlayabilmek için motor sürücüsü, hassas pozisyonlama için harmonik redüktör [19], tork ölçümü yapabilmek için tork sensörü [20] ve sinyal yükseltici, elde edilen verilerin toplanması ve bilgisayara aktarımı için veri toplama kartı ve deney sistemi için gerekli gücü sağlayan 24 V DC güç adaptörü kullanılmıştır. Deney düzeneği görünümü Şekil 2a'da verilmiştir. Deneylerde, dört farklı geometrik ebata sahip helisel işleme yaylar kullanılmıştır. Numuneler, yüksek alaşımlı Maraging C350 çeliğinden üretilmişlerdir. Numunelerin görünümü Şekil 2b'de verilmiştir. Testlerde kullanılan numunelere ait boyutsal parametreler; Radyal et kalınlığı ( $t$ ), eksenel et kalınlığı ( $b$ ), helis boyu ( $L$ ), kanal boşluğu ( $h$ ) ve ortalama çap ( $D_m$ ) Tablo 1'de verilmiştir.

### 2.2. Test Yöntemi (Test Method)

Test numuneleri, oluşturulan deney düzeneği ile burulma yüklemelerine maruz bırakılmışlardır. Numunelerin burulma testleri, sabit açılmal deplasman ve değişken açılmal deplasman profilleri ile yapılmıştır. Yay sabitinin uygulanan açılmal deplasmana göre değişimi olup olmadığının belirlenmesi

için dört farklı yükleme senaryosu uygulanmıştır. Sonuçların doğruluğunu arttırmak için her bir test, aynı ebattaki iki farklı numune ile tekrarlanmıştır. Profiller, pozitif ve negatif yönlerde de uygulanarak hem açma hem de kapama yönü için testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Açılmal yer değiştirme profilleri Şekil 4'de verilmiştir. Her bir test numunesi için 1000 Hz frekansında işleme yay üzerinde oluşan tepki momenti verileri toplanmıştır. Elde edilen sonuçlarla test numunelerine ait tork-zaman grafikleri elde edilmiş, ham verilerdeki gürültülerin temizlenmesi için filtreleme uygulanmıştır. Filtrelenen verilerle her bir veri için ayrı ayrı yay sabitleri ve bu sabitlerin ortalaması alınarak ortalama yay sabiti ( $k$ ) hesaplanmıştır. Yay sabiti ( $k$ )'nın hesaplanmasında Eş. 1 kullanılmıştır.

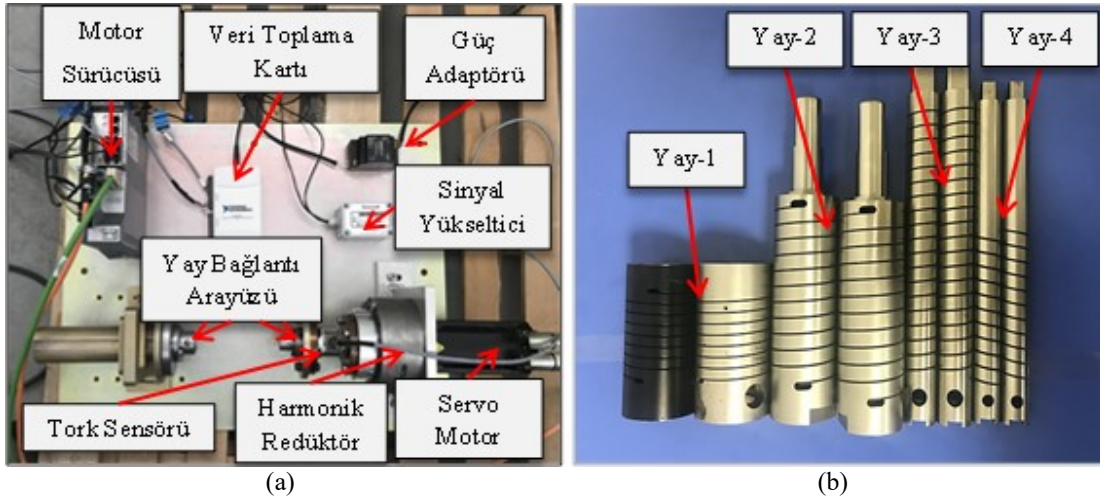
$$k = \frac{T}{\theta} \quad (1)$$

Bu formülde;

T : Tork [N.m]  
 $\theta$  : Açılmal yer değiştirme [ $^\circ$ ]  
 k : Yay sabiti [N.m/ $^\circ$ ] ifade etmektedir.

## 3. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ (FINITE ELEMENT ANALYSIS)

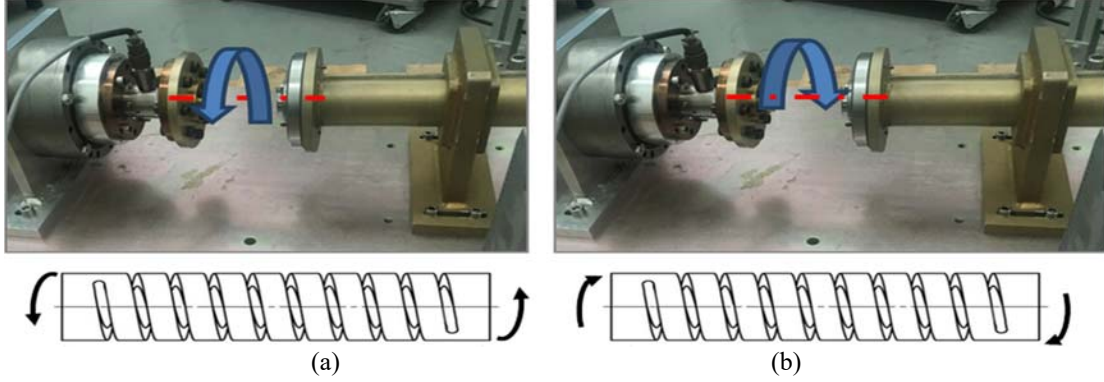
YSA girdilerini oluşturacak olan sonlu eleman analizlerinin gerçekçiliğini belirlemek için burulma testleri yapılan 4 farklı geometrik ebattaki işleme yay için sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve testlerle kıyaslanmıştır .



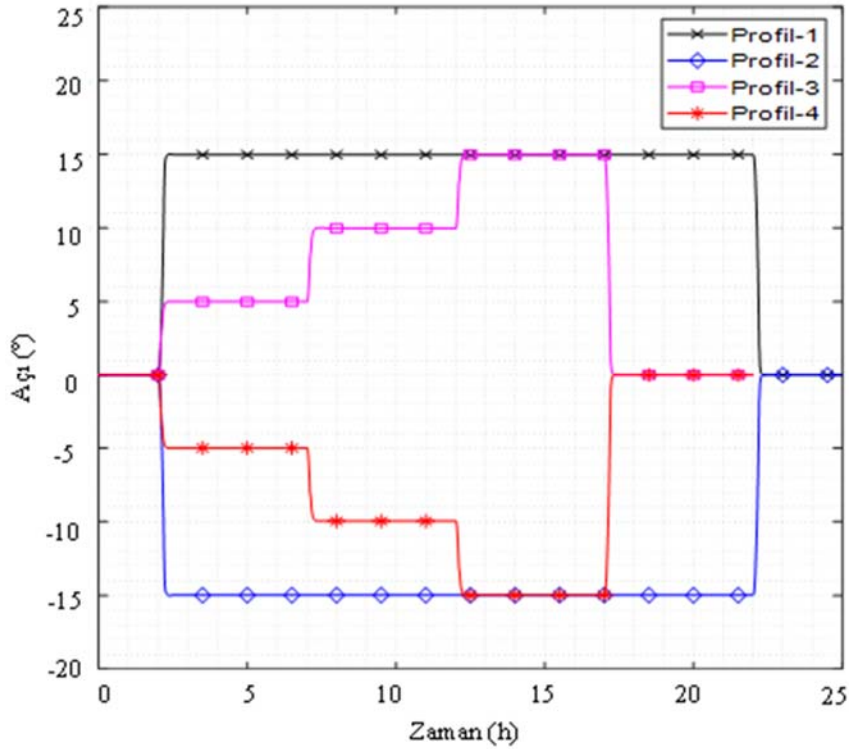
Şekil 2. (a) Deney düzeneği genel görünümü (b) Test numuneleri ((a) General view of the test setup (b) Test Specimens)

Tablo 1. Test numunelerinin boyutsal parametre değerleri (Dimensional parameter values of test specimens)

Yay İsmi	Radyal Et Kalınlığı	Eksenel Et Kalınlığı	Helis Boyu	Kanal Boşluğu	Ortalama Çap
Yay No.	$t$ [mm]	$b$ [mm]	$L$ [mm]	$h$ [mm]	$D_m$ [mm]
1	5,5753	3,81	35,4	0,635	28,435
2	7,5	6,2	74,1	0,635	22,5
3	5,019	5,08	119,7	0,635	10,48
4	4,66	4,572	67,6	0,635	7,85



Şekil 3. Test düzeneği hareket yönleri (a) Açma yönü (pozitif) (b) kapama yönü (negatif)  
(Movement directions of the test setup (a) Opening direction (positive) (b) closing direction (negative) )



Şekil 4. Açısal deplasman profilleri (Angular displacement profiles)

İşleme yaylara ait katı modeller, Ansys Workbench [21] programına aktarılmıştır. Katı model, yükleme ve sınır koşulları Şekil 5’de gösterilmiştir. Modellerin bir ucundan sabitlenerek diğer ucundan 15° açısal yer değiştirme uygulanmıştır. Açısal yer değiştirmenin uygulandığı bölüme tanımlanan mafsala dönme ve eksenel ötelenme yönünde serbestlik verilerek test düzeneğine benzer koşul tanımlanmıştır. Analizlerde oldukça güvenilir sonuçlar veren altı düğüm noktalı ikinci derece tetrahedral elemanlar kullanılarak modellerin ağ yapısı oluşturulmuştur. Modellerde kullanılan örnek ağ yapısı ve özellikleri, sırasıyla Şekil 6 ve Tablo 2’de verilmiştir. C350 çeliğin analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 3’de verilmiştir. Uygulanan açısal yer değiştirme miktarı oldukça büyük olduğu için büyük deformasyon durumu analiz çözüm tipine dahil edilmiştir. Her analiz sonucunda, analiz

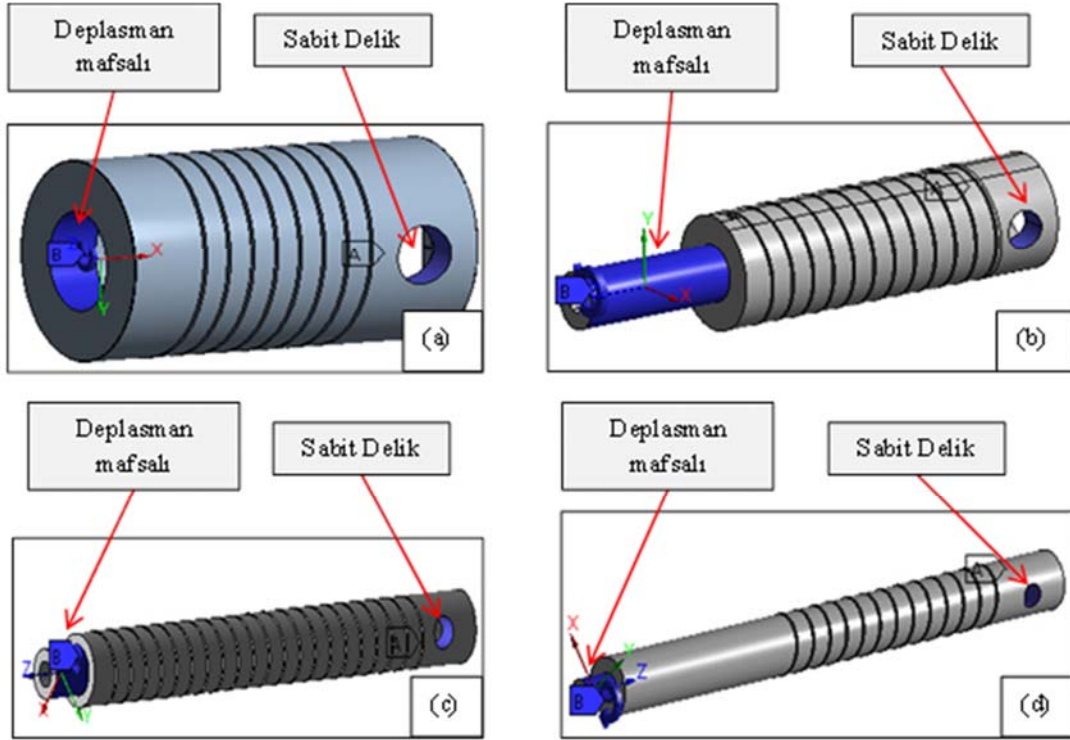
modellerinde tanımlanan mafsallardan tepki momenti değerleri okunmuş ve Eş. 1 ile yay sabiti hesaplanmıştır. Elde edilen bu yay sabitleri testler ile kıyaslanarak modelin gerçekliği belirlenmiştir. Buna ilaveten her analiz sonucunda gerilme dağılımı incelenerek yaylarda bir kalıcı deformasyon olup olmadığı da belirlenmiştir.

#### 4. DENEYSEL VE SONLU ELEMAN ANALİZ SONUÇLARI

##### (EXPERIMENTAL RESULTS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS RESULTS)

###### 4.1. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Belirtilen dört farklı tip işleme yay için kapama ve açma yönlerinde uygulanan dört farklı yükleme profili sonucunda



**Şekil 5.** İşleme yaylar için yükleme ve sınır koşulları (a) Yay-1 (b) Yay-2 (c) Yay-3 (d) Yay-4  
(Loading and boundary conditions for machined springs (a) Spring-1 (b) Spring-2 (c) Spring-3 (d) Spring-4)

elde edilen açılmalık yer değiştirmeye bağlı yaylar üzerinde oluşan tork değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; açılmalık yer değiştirmeye bağlı olarak yayların direngenlik sabitlerinde, aynı yöndeki yüklemelerde büyük bir değişikliğin olmadığı görülmüştür. Bunun yanında tüm yayların doğrusala yakın bir burulma direngenliği sergiledikleri görülmüştür. Bu da testlerin yeterli hassasiyetle gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Farklı yükleme profilleri için Eş. 1'den yararlanılarak elde edilen yay sabitleri Tablo 4'de verilmiştir. Açma ve kapama yönleri için ayrı ayrı verilen ortalama yay sabitleri ise Tablo 5'de görülmektedir. Bu yayların asıl çalışma yönü olan kapama yönü yay sabitlerinin, açma yönü yay sabitlerine göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. İşleme yaylar kapama yönünde çalışması amacıyla tasarlandıkları için açma yönündeki yay sabiti göz önüne alınmamış ve yapay sınır ağı sadece kapama yönü yay sabitine göre geliştirilmiştir.



**Şekil 6.** Analiz modelleri örnek ağ yapısı  
(Mesh structure of analysis models)

**Tablo 2.** Ağ yapılarının özellikleri (Mesh features)

Yay No.	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
1	104937	178991
2	171251	285956
3	141172	238943
4	168159	275734

**Tablo 3.** Malzeme özellikleri (Material properties) [22]

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa) (E)	Poisson Oranı (ν)
C350 Çelik	200	0,3

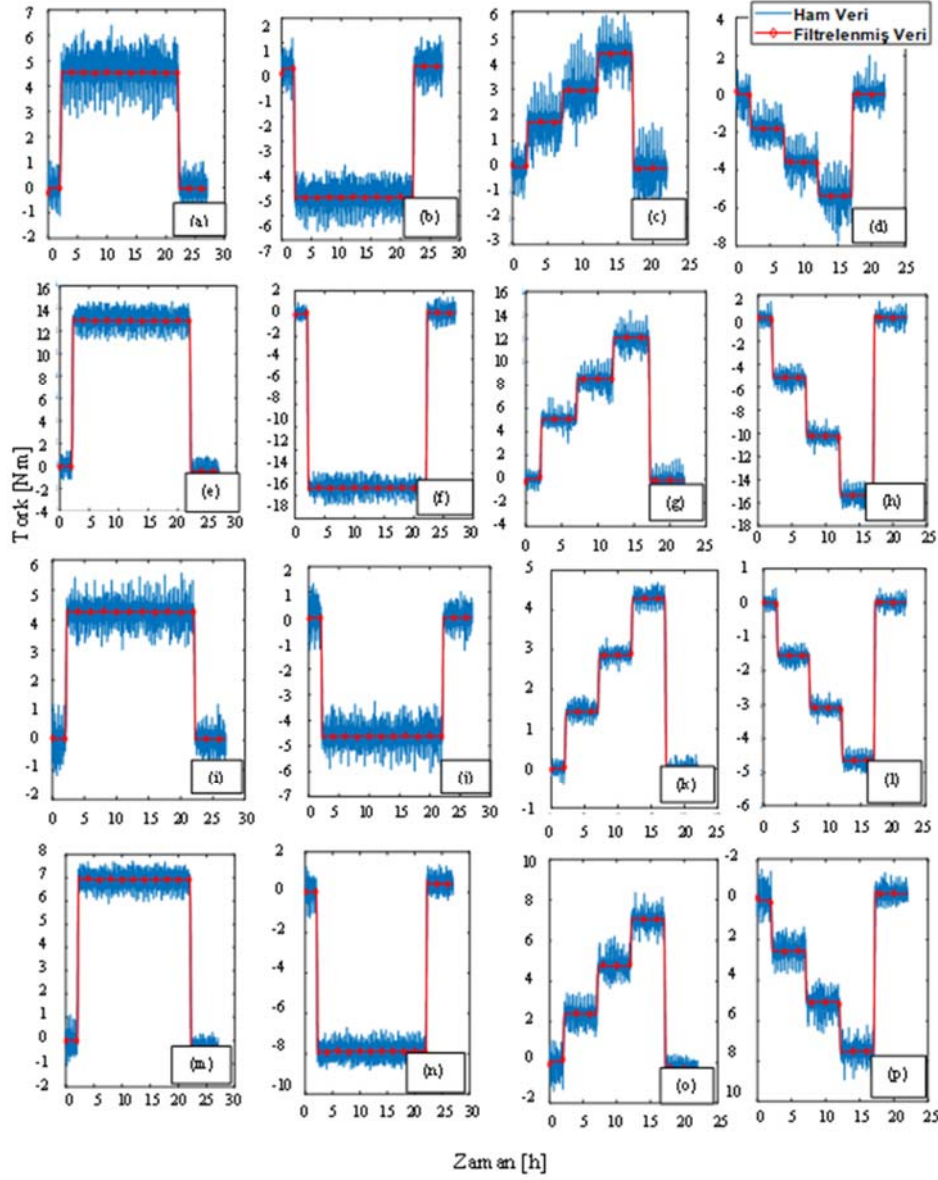
**Tablo 4.** Test numuneleri yay sabiti sonuçları  
(Spring constant results of test specimens)

Yükleme Profili	Ortalama (k) Sabiti [N.m <sup>-1</sup> ]			
	Yay-1	Yay-2	Yay-3	Yay-4
1	0,3041	0,8432	0,2564	0,3901
2	0,3479	1,0170	0,3091	0,5272
3	0,3139	0,8512	0,2598	0,4055
4	0,3573	1,0291	0,3105	0,5023

#### 4.2. Sonlu Eleman Analizi Sonuçları (Finite Element Analysis Results)

Yapılan analizler sonucunda; işleme yaylara ait von Mises gerilme dağılımları, Şekil 8'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, en büyük gerilmelerin şekilde gösterilen helis bitiş bölgelerinde, küçük bir bölgede olduğu ve C350 çelik akma dayanımının (2033 Mpa [22]) çok altında olduğu





**Şekil 7.** Tork-Zaman grafikleri (a) Yay-1 Profil-1 (b) Yay-1 Profil-2 (c) Yay-1 Profil-3 (d) Yay-1 Profil-4 (e) Yay-2 Profil-1 (f) Yay-2 Profil-2 (g) Yay-2 Profil-3 (h) Yay-2 Profil-4 (i) Yay-3 Profil-1 (j) Yay-3 Profil-2 (k) Yay-3 Profil-3 (l) Yay-3 Profil-4 (m) Yay-4 Profil-1 (n) Yay-4 Profil-2 (o) Yay-4 Profil-3 (p) Yay-4 Profil-4  
(Torque-time graphics (a) Spring-1 Profile-1 (b) Spring-1 Profile-2 (c) Spring-1 Profile-3 (d) Spring-1 Profile-4 (e) Spring-2 Profile-1 (f) Spring-2 Profile-2 (g) Spring-2 Profile-3 (h) Spring-2 Profile-4 (i) Spring-3 Profile-1 (j) Spring-3 Profile-2 (k) Spring-3 Profile-3 (l) Spring-3 Profile-4 (m) Spring-4 Profile-1 (n) Spring-4 Profile-2 (o) Spring-4 Profile-3 (p) Spring-4 Profile-4)

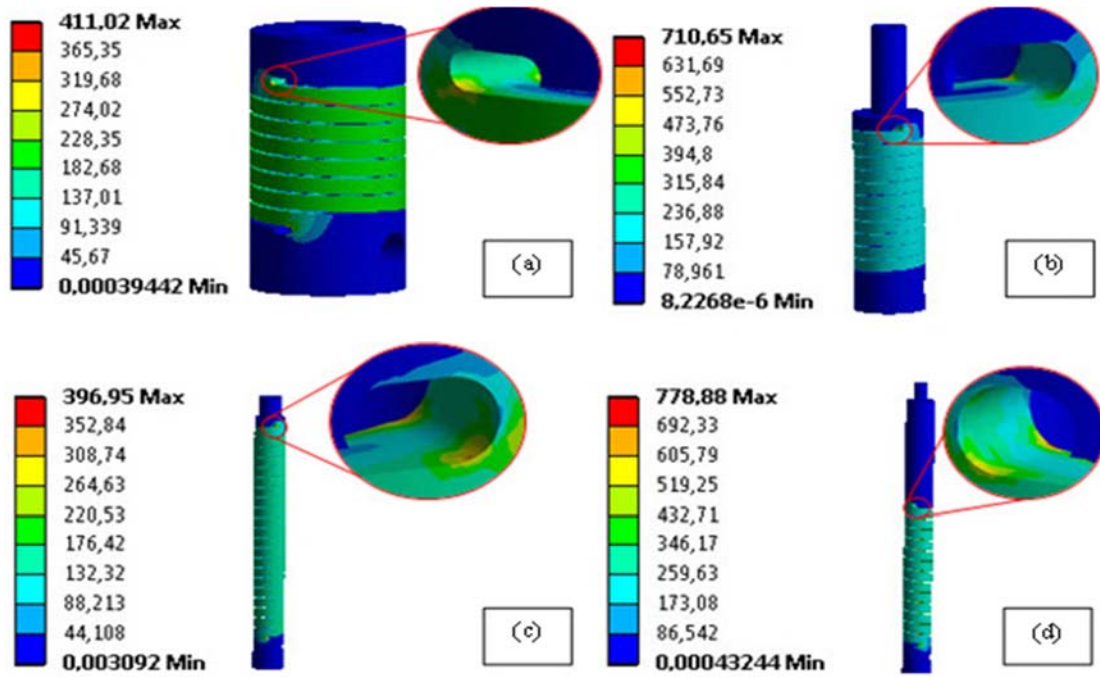
gözlenmiştir. Bu nedenle yaylarda bir kalıcı deformasyon beklenmemektedir. Elde edilen tork değerleri ve hesaplanan yay sabiti değerleri ( $k_s$ ) Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 5.** İşleme yay ortalama (k) sabitleri özet tablosu  
(Average spring constants summary table of machined springs)

Yay İsmi	Açma Yönü (k) Sabiti [N.m/°]	Kapama Yönü (k) Sabiti [N.m/°]
Yay-1	0,3545	0,3059
Yay-2	1,015	0,8437
Yay-3	0,3112	0,2641
Yay-4	0,5105	0,3953

**Tablo 6.** Sonlu elemanlar analizinden elde edilen tork (T) ve yay sabiti ( $k_s$ ) değerleri  
(Torque and spring constant values obtained from finite element analysis)

Model No.	$\theta=15^\circ$ Kapama Yönü		$\theta=15^\circ$ Açma Yönü	
	Moment [N.m]	$k_s$ [N.m/°]	Moment [N.m]	$k_s$ [N.m/°]
1	4,485	0,2990	5,184	0,3456
2	12,343	0,8229	14,795	0,9863
3	3,880	0,2587	4,563	0,3042
4	5,826	0,3884	7,508	0,5005



Şekil 8. Yay-1 von-Mises gerilme dağılımı (a) Yay-1 (b) Yay-2 (c) Yay-3 (d) Yay-4  
(von-Mises stress distribution (a) Spring-1 (b) Spring-2 (c) Spring (3) (d) Spring (4))

#### 4.3. Deneysel ve Sonlu Eleman Sonuçlarının Kıyaslanması (Comparison of the Experimental and Finite Element Results)

Testlerden vesonlu eleman analizinden elde edilen kapama yönündeki yay sabiti değerleri Tablo 7’de karşılaştırılmıştır. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulan analiz modellerinden elde edilen yay sabitlerinin test değerlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, yapay sinir ağı eğitiminde kullanılan sonlu eleman sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir.

**Tablo 7.** İşleme yay burulma direngenliklerinin karşılaştırılması  
(Comparison of torsional stiffness of machined springs)

Yay Model No.	Deneysel Yay Sabiti $k_d$ [N.m/°]	SayısalYay Sabiti $k_s$ [N.m/°]	Sayısal Sonuçların Farklılığı [%]
1	0,3059	0,2990	2,26
2	0,8437	0,8229	2,46
3	0,2641	0,2587	2,37
4	0,3953	0,3884	1,75

## 5. YAPAY SİNİR AĞI GELİŞTİRİLMESİ (DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK)

### 5.1. Parametre Korelasyon Çalışması (Parameter Correlation Study)

Sonlu eleman analizlerinin deneylerle doğrulanmasından sonra her parametrenin tasarım üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla parametrik korelasyon çalışması

yapılmıştır. Bu işlemin amacı, yapay sinir ağı için gerekli analiz sayısını ve parametrelere tanımlanacak değer aralıklarını belirlemektir.

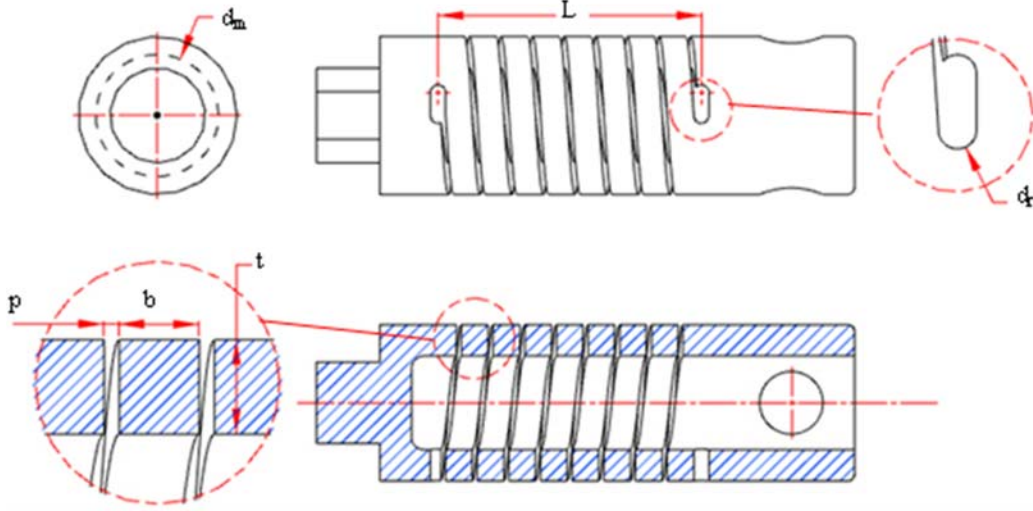
Parametre korelasyon çalışmalarında yaygın olarak iki farklı korelasyon tipi kullanılmaktadır. Bunlar, Pearson ve Spearman korelasyonlarıdır. Pearson korelasyonu doğrusal bir korelasyon tipidir. İki sayısal ölçüm arasında ilişki olup olmadığını araştırır [23]. Bu metodun sonucunda, “-1” ile “1” aralığında değişen bir değer elde edilir. Bu değer, girdi parametresi ile çıktı parametresi arasındaki ilişkiyi gösteren sayısal bir değerdir. Yani, girdi parametresinin çıktı parametresi üzerindeki etkisini ifade eder. Diğer yaygın olarak kullanılan korelasyon tipi ise Spearman rank korelasyonudur. Bu metod, Pearson korelasyonuna göre daha kapsamlıdır. Doğrusal olmayan ilişkiye sahip çalışmalar için tercih edilir. Lineer olmayan durumlarda da geçerli bir yöntemdir. Bu yöntem sonucunda da Pearson metoduna benzer şekilde “-1” ile “1” aralığında değişen sonuç elde edilir. Sonuç “1” değerine yaklaştıkça veriler arasındaki ilişki değeri aynı yönde artar, sonuç “-1” değerine yaklaştıkça veriler arasındaki ilişki değeri ters yönde artar. Korelasyon çalışmaları için Pearson yöntemine göre daha kapsamlı bir metod olan Spearman rank korelasyonu tercih edilmiştir.

Parametrik analiz çalışması, bir analiz paketinden oluşmaktadır. Bu analiz paketinde, Şekil 9’da belirtilen geometrik girdi parametreleri Tablo 8’de belirtilen aralıkta değiştirilerek 100 farklı model oluşturulmuştur. Bu aralıklar; uygulamalarda kullanılan bir işleme yayının ebatlarına bakılıp, üretimden kaynaklanan alt ve üst sapma değerlerine göre belirlenmiştir.



Bu değerler tanımlandıktan sonra, ANSYS uygulamasında "Parameters Correlation" modülü kullanılarak 100 farklı model için analizler çözdürülmüş ve korelasyon sonuçları elde edilmiştir. Şekil 10'da verilen renklerle ifade edilmiş matriste, her bir geometrik girdi parametresinin çıktı parametreleri üzerindeki etki şiddetleri gösterilmiştir. Tablo 9'da verilen matris ise aynı sonuçların sayısal olarak ifade edilmiş halidir. Herhangi bir girdi parametresinin herhangi bir çıktı parametresi üzerindeki etki şiddeti ve yönü incelenmek istenildiğinde, o girdi ve çıktı parametrelerinin

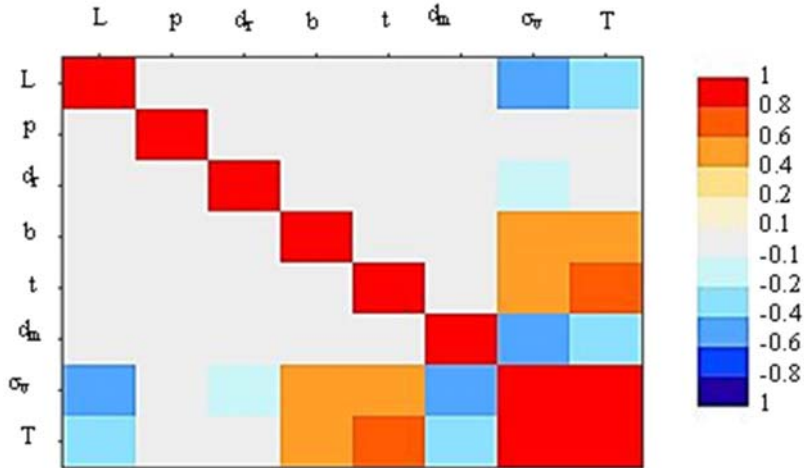
bulduğu satır ve sütunların kesişimindeki bloğun rengine bakılarak etki şiddeti ve yönü anlaşılabilir. Renkler kırmızıya yaklaştıkça korelasyon değeri "1" değerine yaklaşır. Yani bloğun bulunduğu satır ve sütundaki parametreler arasında doğru yönde korelasyon değeri artar. Matristeki renk tonları, mavi rengine yaklaştıkça korelasyon değeri "-1" değerine yaklaşır. Yani matristeki renk maviye yaklaştıkça, bloğun bulunduğu satır ve sütundaki parametreler arasında ters yönde korelasyon değeri artar. Korelasyon değerinin sıfıra yakın olması satır ve sütundaki



Şekil 9. İşleme yayların boyutsal parametreleri (Dimensional parameters of machining springs)

Tablo 8. Geometrik girdi parametrelerinin nominal, alt sınır ve üst sınır değerleri (Nominal, lower limit and upper limit values of geometric input parameters)

Girdi Parametreleri	Açıklamalar	Nominal Değer	Alt sınır Değeri	Üst Sınır Değeri
t	Radyal et kalınlığı	5	4,5	5,5
b	Eksenel et kalınlığı	5	4,5	5,5
L	Helis boyu	30	27	33
d <sub>m</sub>	Ortalama çap	25	22,5	27,5
d <sub>r</sub>	Slot çapı	1,8	1,62	1,98
p	Kanal boşluğu	0,5	0,45	0,55



Şekil 10. Renklerle ifade edilmiş korelasyon matrisi (Correlation matrix expressed in colors)

parametrelerdeki korelasyonun az olduğunu ve bu parametrelerdeki değişimin birbirini etkilemediğini gösterir. Şekil 10 ve Tablo 9 incelendiğinde girdi parametrelerinin yay torku üzerindeki etki sıralamasının;  $t > b > L > d_m > d_r > p$  şeklinde olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerden  $d_m$  ve  $L$ 'nin artışı aynı yay sabitini elde etmek için gerekli momenti azaltırken, diğer parametrelerin artışı, bu torku arttırmaktadır. Yay radyal ( $t$ ) ve eksenel ( $b$ ) et kalınlığının yayın kesit özelliklerini belirlemesi nedeniyle moment üzerinde daha etkili olması beklenen bir durumdur. Benzer şekilde slot çapı ( $d_r$ ) küçük bir bölgede olduğundan ve kanal boşluğu ( $p$ ) da bu sadece yaya daha kompakt bir yapı kazandırma amacı olduğundan bu parametrelerinin etkilerinin düşük olmasına yol açmıştır. Tablo 9'da ek olarak işleme yay tasarımcılarına ışık tutması amacıyla bu parametrelerin eşdeğer gerilme üzerindeki etkileri de sunulmuştur. Bu korelasyon sonuçlarına göre yapay sinir ağı çalışmasındaki girdi parametrelerin değer sayısı belirlenmiştir. YSA eğitimi sırasında etkisi daha yüksek olan parametrelerin değer sayıları büyük tutulurken, etkisi düşük olan girdi parametrelerinin değer sayıları ise daha küçük tutulmuştur. Değerlerin, testleri ve analizleri yapılan işleme yayların geometrilerini kapsayacak şekilde seçilmesine özen gösterilmiştir. Girdi parametrelerine ait değer sayısı ve değer aralıkları Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 10'da belirtilen parametreler ile ( $5 \times 4 \times 2 \times 3 \times 3 \times 2 \times 1 = 720$ ) adet analiz modeli oluşturulmuş ve bu modeller, YSA eğitiminde kullanılmıştır.

## 5.2. Yapay Sinir Ağı Eğitimi (Artificial Neural Network Training)

YSA geliştirilmesinde, Matlab Neural Network Fitting (NNF) aracı kullanılmıştır [24]. NNF'te dört ana sinir ağı araç çubuğu bulunmaktadır. İlk araç çubuğu, fonksiyon uydurma araç çubuğudur. Bu araç çubuğunda yapay sinir ağı, girilen veri tabanını kullanarak en uygun fonksiyonu oluşturur. Bir diğer araç çubuğu ise örüntü tanımlama araç çubuğudur. Bu araçta çubuğunda, girdi parametreleri istenilen özelliklere göre kategorize edilir. Üçüncü araç çubuğu, veri kümelendirme araç çubuğudur. Burada veriler benzer özelliklerine göre kümelendirilmektedir. Dördüncü araç çubuğu, zamana bağlı analizdir. Bu araç çubuğunda ise bir sisteme ait geçmişteki verilere bakılarak gelecekteki davranışları tahmin edilir [25]. Bu çalışmada, fonksiyon uydurma araç çubuğu kullanılmıştır. Bunun sebebi eldeki veri kümesi ile bir fonksiyon oluşturulup bu fonksiyona bağlı olarak istenilen yay sabiti tahmini yapılabilmesidir.

Yukarıda da belirtildiği gibi parametre korelasyonu çalışması sonucunda elde edilen 720 adet parametrik analiz sonucu, yapay sinir ağı eğitilmesinde kullanılmıştır. Yapay sinir ağına girdi olarak işleme yay tasarımında gerekli boyutsal parametreler, çıktı olarak ise, burulma yay sabiti ( $k$ ) değeri elde edilmiştir. (Tablo 11). Sonrasında bu veriler, bir matris halinde "MATLAB Neural Fitting (nftool)" araç çubuğuna aktarılmıştır [24].

**Tablo 9.** Korelasyon matrisi (Correlation matrix)

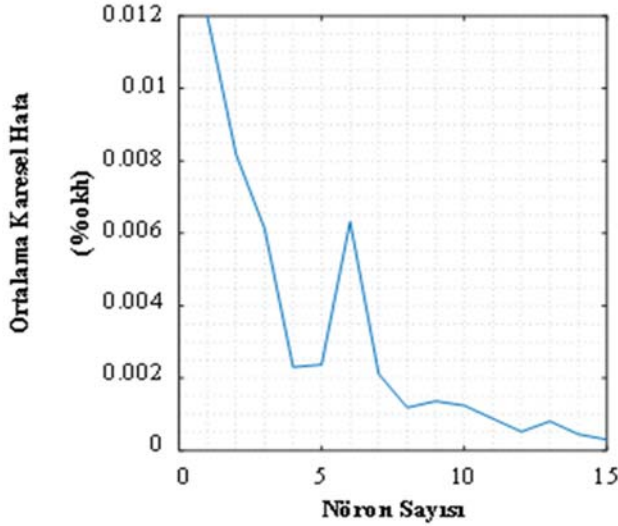
Parametreler	L	p	$d_r$	b	t	$d_m$	$\sigma_v$	T
L	1,000	-0,009	-0,010	0,004	0,008	0,013	-0,477	-0,283
p	-0,009	1,000	0,001	0,013	-0,010	0,024	0,071	0,033
$d_r$	-0,010	0,001	1,000	-0,009	-0,007	0,010	-0,138	0,018
b	0,004	0,013	-0,009	1,000	0,000	0,010	0,522	0,477
t	0,008	-0,010	-0,007	0,000	1,000	-0,010	0,480	0,780
$d_m$	0,013	0,024	0,010	0,010	-0,010	1,000	-0,425	-0,240
$\sigma_v$	-0,477	0,071	-0,138	0,522	0,480	-0,425	1,000	0,883
T	-0,283	0,033	0,018	0,477	0,780	-0,240	0,883	1,000

$\sigma_v$ : Von Mises gerilme

**Tablo 10.** YSA eğitimi için girdi parametrelerinin sayıları ve değerleri  
(Numbers and values of input parameters for ANN training)

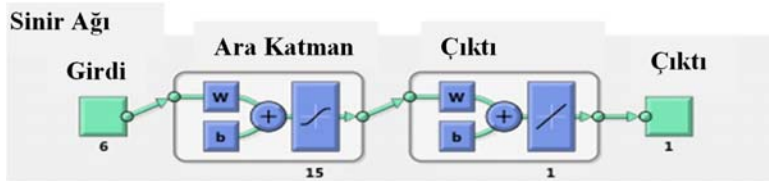
Girdi Parametreleri	Açıklamalar	Değer Sayısı	Girdi 1 [mm]	Girdi 2 [mm]	Girdi 3 [mm]	Girdi 4 [mm]	Girdi 5 [mm]
t	Radyal et kalınlığı	5	4,5	5,25	6	6,75	7,5
b	Eksenel et kalınlığı	4	3,5	4,5	5,5	6,5	-
L	Helis boyu	3	35	75	125	-	-
$d_m$	Ortalama çap	3	7,8	21,8	35,8	-	-
$d_r$	Slot çapı	2	1	1,5	-	-	-
p	Kanal boşluğu	2	0,635	0,8	-	-	-

YSA çalışmalarında nöron sayısının artırılması, aşırı optimizasyon ve çözümlenme süresinde artış gibi dezavantajlara sebep olur. Ancak bu sayının az tutulması da çözüm sonucunda hesaplanan eğitimin yetersiz olmasına, yani çözüm sonucundaki hedef çıktı ile elde edilecek çıktı arasındaki sapma miktarını gösteren Ortalama Kareysel Hata (OKH)'nın yüksek olmasına sebep olabilir. Bu değer, ifade etmektedir. Uygun nöron sayısını belirlemek için diğer parametreler sabit tutularak farklı nöron sayıları ile çözümlenmeler yapılmıştır. Şekil 11'de nöron sayısına bağlı olarak elde edilen OKH miktarları verilmiştir. Elde edilen hata miktarları incelendiğinde 15 adet nöron kullanımında OKH'nın  $0.0005$ 'in altına indiği görülmüş ve bu hata miktarının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Genel yaklaşıma göre 15 adet nöron sayısı oldukça yüksektir. Ancak yapılan çözümlenmelerde YSA eğitim sürelerinin dakika mertebelerinde olduğu görüldüğünden bu nöron sayısı ile çözümlenmelere devam edilmiştir.



**Şekil 11.** Nöron sayısına bağlı OKH değişimi (MSE change due to the number of neurons)

Sinir ağı gizli katmanlarda bulunan transfer fonksiyonu çözümlenmeleri için tan sigmoid tipi fonksiyon seçilmiştir. Şekil 12'de oluşturulan yapay sinir ağı yapısının görünümü verilmiştir. Burada; girdiler, ara katmanlar ve çıktı görülmektedir. Yapay sinir ağı 6:15:1 şeklindeki yapıya sahiptir. Bu yapı, 6 adet girdi, 15 adet nöronda işlenerek 1 adet çıktı olduğunu ifade etmektedir. YSA eğitiminde kullanılan veriler; eğitim seti, değerlendirme seti ve test seti olmak üzere 3'e bölünmektedir. Eğitim setinde bulunan veriler, yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılan verilerdir.



**Şekil 12.** Yapay sinir ağı yapısı (Artificial neural network structure)

Değerlendirme setinde bulunan veriler, yapay sinir ağı eğitim aşamasında eğitim performansının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Burada kullanılan veriler eğitim setine dahil edilmez. Test setindeki veriler ise yapay sinir ağı tamamlandıktan sonra sistemin test edilmesi için kullanılan verileri oluşturmaktadır. Bu kısım da yapay sinir ağı eğitiminden bağımsızdır. %70 Eğitim Seti, %15 Değerlendirme Seti, %15 Test Seti şeklinde bölünen oranların literatürde varsayılan değerler olduğu bilinmektedir. Eğitim setinde kullanılacak veri sayısını en yüksekte tutarak daha doğru sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır. Eğitiminde sonlu eleman analizi kullanılan benzer bir çalışmada bu oranların; %90 Eğitim seti, %5 Değerlendirme seti, %5 Test seti alınarak başarılı sonuçların elde edildiği görülmüş ve bu çalışmada da veri seti aynı şekilde bölünmüştür [25].

Şekil 13'de, yapay sinir ağı eğitim performansını gösteren bir grafik verilmiştir. Eğitim sonucunda en iyi eğitim performansı,  $3,62 \times 10^{-4}$  ortalama karesel hata miktarıyla elde edilmiştir. Bu değer eğitimin oldukça başarıyla yapıldığını gösteren küçük bir değerdir. Eğitim sürecinde toplamda 2986 adet iterasyon yapılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi iterasyon artışıyla, ortalama karesel hata miktarı değeri bir düşüş gözlenmediği için eğitim tamamlanmıştır.

**Tablo 11.** Veri tabanındaki parametreler (Parameters in the database)

Girdi Parametreleri	Çıktı Parametresi
Radyal et kalınlığı (t), Eksenel et kalınlığı (b), Helis boyu (L), Kanal bosluğu (h), Ortalama çap ( $d_m$ ), Slot Capı ( $d_r$ )	Burulma Yay sabiti (k)

Test sonuçlarına ait doğrusal regresyon grafiği Şekil 14'de verilmiştir. Bu grafikte dikey ve yatay eksenler sırasıyla yapay sinir ağı test verileri ve parametrik sonlu elemanlar analiz çalışması sonucunda elde edilen çıktıları temsil etmektedir.  $45^\circ$  eğimle çizilmiş kesikli çizgi ideal regresyon eşleşmesini ifade etmektedir. Grafikteki mavi çizgi ise teste ait regresyon çizgisini temsil etmektedir. Şekil 14 incelendiğinde bu iki çizginin örtüştüğü, dolayısıyla YSA performansının başarılı olduğu gösterilmiştir.

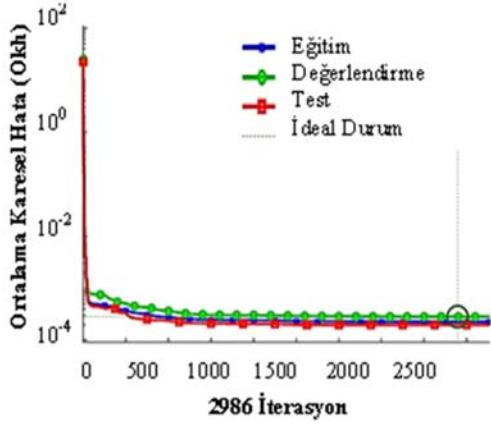
### 5.3. YSA Sonuçları (ANN Results)

Geliştirilen YSA ile çeşitli boyutsal parametrelerle yay sabiti sonuçları elde edilmiştir. Sonuçların doğruluğunu test etmek

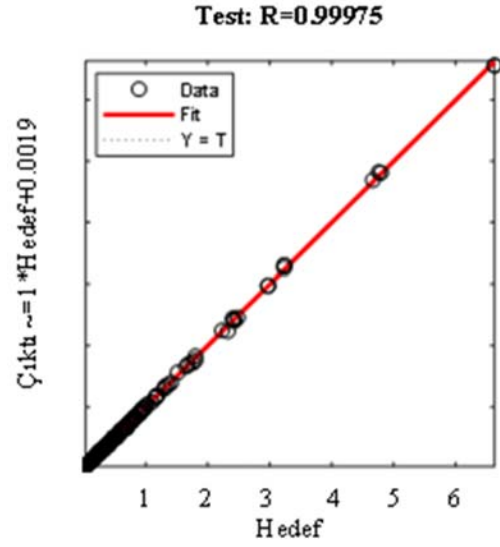


İçin üç farklı test grubu oluşturulmuştur. Birinci test grubunda, yapay sinir ağı eğitim veri tabanında bulunan 5 farklı yay modeline ait girdi ve çıktı değerleri alınmıştır. İkinci test grubunda ise; parametrik analiz girdi veri tabanını oluşturan değerlerin aralarında kalan değerler seçilerek 5 farklı yay modeli oluşturulmuştur. Üçüncü test grubunda ise yapay sinir ağı girdi parametrelerini oluşturan veri tabanı kümesi dışında kalan değerler seçilerek 5 farklı işleme yay modeli oluşturulmuştur. Elde edilen bütün sonuçlar Tablo 12’de verilmiştir.

**En İyi Değerlendirme Performansı=0.00036247 (2836. İterasyon)**



**Şekil 13.** Yapay sinir ağı eğitim performansı grafiği  
(Artificial neural network training performance chart)



**Şekil 14.** YSA test performansına ait regresyon grafiği  
(Regression graph of ANN test performance)

Sonuçlar incelendiğinde YSA eğitim veri kümesi içerisinde yer alan parametrelerle sonlu eleman sonuçları arasında maksimum %1,6, ara değerlerde ise maksimum %8 farklılık elde edildiği görülmüştür. Test ile sonlu eleman analizleri arasındaki farklar düşünüldüğünde bu farklılığın kabul edilebilir seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Veri tabanı kümesi dışında seçilen değerlerle elde edilen sonuçlarda % farklılık

**Tablo 12.** YSA eğitim test sonuçları (ANN training test results)

Grup No.	Yay No.	L [mm]	h [mm]	B [mm]	t [mm]	$D_{mean}$ [mm]	$d_r$ [mm]	$k_s$ [N.m/°]	$k_n$ [N.m/°]	Hata [%]
1	1	35	0,8	3,5	5,25	7,8	1	0,7283	0,7204	1,084
	2	35	0,8	4,5	4,5	35,8	1	0,1636	0,1662	1,589
	3	75	0,635	3,5	6,75	21,8	1	0,2576	0,2589	0,504
	4	125	0,635	5,5	6,75	7,8	1,5	0,9692	0,9559	1,372
	5	75	0,8	4,5	7,5	21,8	1,5	0,5843	0,5913	1,198
2	1	37,02	0,662	4,17	5,68	30,79	1,014	0,3351	0,3213	4,118
	2	42,52	0,661	4,04	6,24	24,25	1,486	0,4502	0,4314	4,175
	3	53,09	0,777	6,36	7,38	27,72	1,404	1,2621	1,2152	3,71
	4	63,04	0,640	5,73	6,01	34,48	1,249	0,3668	0,3366	8,23
	5	77,20	0,712	3,98	6,96	29,79	1,323	0,2632	0,2849	8,24
3	1	32,55	0,504	3,97	4,00	41,43	0,950	0,0896	0,0878	2,008
	2	30,48	0,543	4,01	3,72	36,69	0,913	0,0904	0,0812	10,176
	3	32,27	0,575	3,66	3,63	38,15	0,997	0,0634	0,0537	15,299
	4	33,21	0,525	3,75	4,27	36,34	0,977	0,1078	0,0976	9,462
	5	21,437	0,857	3,41	3,22	37,03	1,564	0,0694	0,0612	11,81

değerlerinde artış görülmektedir. Geliştirilen bu YSA modelinin veri tabanı dışındaki değerler için kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma kapsamında; havacılık sektöründe sıkça kullanılan işleme yayların yay sabitlerini belirlemek için parametre korelasyonu bazlı yapay sinir ağı (YSA) geliştirilmiştir. İlk olarak YSA veri tabanını oluşturan analizlerin doğruluğunu belirlemek için dört farklı tip yayın testi yapılmıştır. Bu amaçla oldukça hassas sonuçlar verebilen bir burma test düzeneği tasarlanmıştır. Aynı numunelerin sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiş ve test sonuçları ile başarıyla doğrulanarak analizlerin YSA eğitiminde kullanılabileceğine karar verilmiştir. Ardından parametrik korelasyon çalışması ile boyutsal parametrelerin etki derecesi belirlenmiş ve bu doğrultuda YSA eğitiminde kullanılacak parametre değer aralıkları ve analiz sayısı belirlenmiştir. Eğitim sonucunda yay sabitini tahmin edebilen bir YSA geliştirilmiştir. Geliştirilen YSA fonksiyonu, eğitim veri kümesi içinde yer alan parametreler ile yay sabitinin elde edilmesi amacıyla güvenle kullanılabilir.

Çalışma sürecinde ayrıca işleme yayların açma yönündeki yüklemelerde daha yüksek moment verdiği belirlenmiştir. Boyutsal parametrelerin işleme yay burulma direngenliğine etki şiddeti,  $t > b > L > d_m > d_r > p$  şeklinde elde edilmiştir. Yani yay eksenel ve radyal et kalınlıklarının yay sabiti üzerinde etkisi diğer parametrelere göre fazladır. İşleme yay tasarımı yapılırken bu sıralamanın bilinmesi, tasarımcı için büyük kolaylık sağlayacaktır.

Bu çalışmanın devamı olarak, açılmal yüklemeler altındaki gerilme değerlerini de tahmin edebilen bir sinir ağı geliştirilebilir. Bunun yanında işleme yaylarının burulma dışında basma ve çekme yüklemeleri altındaki davranışları da incelenerek daha gelişmiş bir YSA oluşturmak mümkündür. İleride bu YSA için kullanıcı arayüzü geliştirmek tasarımcıların ürün geliştirme sürecine oldukça katkı sağlayacaktır. YSA eğitim performansının geliştirilmesi amacıyla, n kat çapraz doğrulama tekniği gibi farklı eğitim tekniklerin çalışılması mümkündür. Ayrıca Lineer Regresyon, Destek Vektör Makinaları, Karar Ağacı gibi farklı yöntemler çalışılarak elde edilecek sonuçlar, mevcut YSA sonuçları ile karşılaştırılabilir. Farklı yöntemlerle elde edilen bütün sonuçların kıyaslanması ile literatüre oldukça zengin bilgiler katılması mümkündür.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın tamamı TÜBİTAK-SAGE tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Calderon J.D.D., Perez C., On The General Characterization of Machined Springs and Their Manufacturing Processes, ASME 2013 International

- Mechanical Engineering Congress and Exposition, USA, 2013.
2. H.P. Company, The spring for the 21st century, 2016.
  3. Gary L., Boehm P., Wire Wound vs. Machined Springs A Comparison, Helical Products Company, 2016.
  4. Salwinski J., Michalczyk K., Stress analysis in helical springs with closed end coils machined from cylindrical sleeves, Mechanics / AGH University of Science and Technology, 25 (4), 169-172, 2006.
  5. Razooqi A.I., Ameen H.A., Mashloosh K.M., Static and Dynamic Characteristics of Slotted Cylinder Spring, International Journal of Engineering Research & Technology, 2, 2013.
  6. Nama S.A., Modeling and Analysis of a Helical Machined Springs, The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 15 (2), 2015.
  7. Zeydan E., Analytical Investigation of Parameters Affecting Stiffness of Helical Springs of Arbitrary Shapes Under Compression, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova University, 2006.
  8. Krzysztof M., Stress Analysis in Slotted Springs, Mechanics, 25 (3), 131-134, 2006.
  9. Ahmed I.R., Hani A.A., Kadhim M.M., Compression and Impact Characterization of Helical and Slotted Cylinder Springs, Int. J. Eng. & Tech., 3, 268-278, 2014.
  10. Calderon J.D.D., On the general characterization of machined springs and their manufacturing processes, Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013.
  11. Nama S.A., Effect of Pitch Angle on Static Characteristics of a Helical Machined Spring The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering, 15(3), 2015.
  12. Sebatlı A., Çavdur F., Analysis of relief supplies distribution operations via simulation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 34 (4), 2079-2096, 2019.
  13. Kılıç M., Eyecioğlu Ö., Özdemir Z., Alkan Ü., Estimation of dielectric parameters of LDPE/PANI composite films depending on temperature and PANI additive concentration by GRNN, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 1077-1088, 2020.
  14. Bin Younis H., Kamal K., Sheikh M., Hamza A., Zafar T., Prediction of fatigue crack growth rate in aircraft aluminum alloys using radial basis function neural network, 2018 Tenth International Conference on Advanced Computational Intelligence (ICACI), Xiamen-China, 29-31 March, 2018.
  15. Koçyiğit M., Akay H., Estimation of potential flash flood risk in a basin using morphometric parameters: A case study of Akçay Basin, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (4), 1321-1332, 2018.
  16. Aydın F., Aslan Z., Diagnosis of neuro degenerative diseases using machine learning methods and wavelet transform, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (3), 749-766, 2017.

17. Bulut M., Bařođulu B., Development of a hybrid system based on neural networks and expert systems for short-term electricity demand forecasting, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (2), 1129-1140, 2017.
18. Kollmorgen, AC Synchronous Servo Motor, <https://www.kollmorgen.com/en-us/products/catalogs/kollmorgen-akm-servomotor-selection-guide/>, Eriřim tarihi Ocak 02, 2019.
19. Sumitomo, Fine Cyclo Zero Backlash Precision Gearboxes <https://sumi-entermediadb.appno.net/assets/emshare/views/modules/asset/downloads/originals/2018/11/60/7e050117f/Fine%20Cyclo%20Catalog.pdf>, Eriřim tarihi řubat 03, 2019.
20. Honeywell, Flanged Reaction Torque Sensor, [www.sensing.honeywell.com/honeywell-test-and-measurement-model-2110-2116-reaction-torque-datasheet-008799-2-en.pdf](http://www.sensing.honeywell.com/honeywell-test-and-measurement-model-2110-2116-reaction-torque-datasheet-008799-2-en.pdf), Eriřim tarihi řubat 03, 2019.
21. ANSYS Workbench, Versiyon: 19.2.0.
22. VascoMax Catalogue, [www.dynamicmetals.net/VascoMaxCatalog.pdf](http://www.dynamicmetals.net/VascoMaxCatalog.pdf), Eriřim tarihi Ocak 06, 2019.
23. Emerson W.R., Causation and Pearson's Correlation Coefficient, Journal of Visual Impairment & Blindness, 36 (3), 242-244, 2015.
24. MATLAB, Version : R2018b (9.5.0.944444), 2018.
25. Yıldırım A., Development Of Bolted Flange Design Tool Based On Finite Element Analysis And Artificial Neural Network, Yüksek Lisans Tezi, Middle East Technical University, 2015.