



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Yaprak yayların parametrik sonlu elemanlar analizi ve yapay sinir ağı ile modellenmesi

Analyze of leaf springs with parametric finite element analysis and artificial neural network

Yazar(lar) (Author(s)): Serdinç YAVUZ, Murat Tolga ÖZKAN²

ORCID¹: 0000-0002-1119-8118

ORCID²: 0000-0001-7260-5082

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Serdinç Y., Özkan M. T., “Yaprak yayların parametrik sonlu elemanlar analizi ve yapay sinir ağı ile modellenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 827-842, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1074516

Yaprak Yayların Parametrik Sonlu Elemanlar Analizi ve Yapay Sinir Ağı ile Modellenmesi

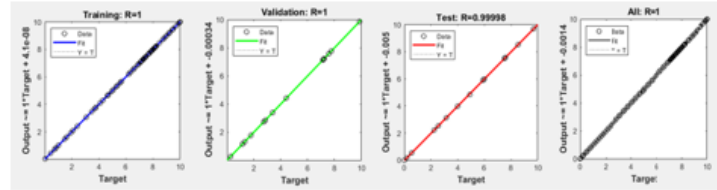
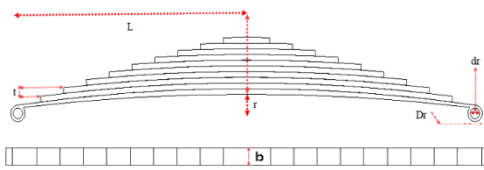
Analyze of Leaf Springs with Parametric Finite Element Analysis and Artificial Neural Network

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yaprak yay/Leaf spring
- ❖ Parametrik tasarım/Parametric design
- ❖ Yapay sinir ağları/Artificial neural network
- ❖ Sonlu elemanlar analizi/Finite element analysis
- ❖ 51CrV4 yaprak yay çeliği/51CrV4 leaf spring steel

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Yaprak yaylar sağ ve sol uç kısımlarında bulunan göz adı verilen unsurlar ile araçların şasesi ile bağlantı yapılır. Yaprak yaylar aracın şasesini ve araç bileşenlerini yol koşullarından kaynaklanan olumsuz etkilere karşı korumaktadır. / Leaf springs are connected to the chassis of the vehicles with the elements called eyes located at the right and left ends. Leaf springs protect the chassis and vehicle components of the vehicle against adverse effects caused by road conditions.



Şekil. Yaprak yay katman sayılarına bağlı parametrelerin gösterimi /Figure. Notation of parameters depending on leaf spring layer numbers

Amaç (Aim)

Yaprak yay tasarımı için optimum şartların belirlenmesi ile tasarım aşamasında zaman ve maliyet koşullarının iyileştirilmesini sağlamak. / To determine the optimum conditions for leaf spring design and to ensure improvement of time and cost conditions during the design phase

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Parametrik yaprak yay tasarımını sonlu elemanlar yöntemi ve yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak yapılmıştır. / Parametric leaf spring design was made using finite elements method and artificial neural networks method.

Özgünlük (Originality)

3 farklı ana tasarım ve 135 alt modelden oluşan yaprak yay tasarımları yapılarak, yaprak yayın tasarım parametrelerinin etkisi analiz edilmiştir. / The effect of leaf spring design parameters was analyzed by making leaf spring designs consisting of 3 different main designs and 135 sub-models

Bulgular (Findings)

Oluşturulan her yaprak yay tasarımı için elde edilen bulgular sonlu elemanlar yöntemi ve yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak kıyaslanmıştır ve %99986 uyum gözlenmiştir. The findings obtained for each leaf spring design were compared using finite elements method and artificial neural networks method and 99986% compliance was observed.

Sonuç (Conclusion)

Yapılan yaprak yay tasarımı sonucunda yay parametrelerinin etkisi gözlenmiştir. / As a result of the leaf spring design, the effect of spring parameters was observed.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Yaprak Yayların Parametrik Sonlu Elemanlar Analizi Ve Yapay Sinir Ağı İle Modellenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Serdinç YAVUZ¹ Murat Tolga ÖZKAN²

¹Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü 06500 Ankara Türkiye

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü 06500 Ankara, Türkiye
(Geliş/Received : 16.02.2022 ; Kabul/Accepted : 27.02.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 14.03.2022)

ÖZ

Yaprak yaylar özellikle büyük yüklemeler altında, yükler karşısında oluşan titreşimleri minimize etmek için kullanılırlar. Özellikle ağır vasıta araçlarda yüklemelerden dolayı ağır vasıta aracın; gelen yüklemeler karşısındaki dayanımını ve titreşimi azaltmak için en fazla kullanılan makine elemanlarıdır. Bu amaçla parametrik olarak dikdörtgen kesitli yaprak tasarımı yapılmıştır. Yaprak yay tasarımı için öncelikle yay katman sayısı 1-10 katman arasında ve boyutları üretici firma kataloğuna göre değişken biçimde alınarak farklı varyasyonların FEA modelleri oluşturulmuş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Yaprak yay katman sayısının eleman direngenliğine ve deformasyonuna etkisi bunun yanında gerilmelerdeki değişimler simülasyon edilmiştir. 1-10 arasındaki katman sayısı ve farklı kesit ölçülerindeki yay modelleri ANSYS ortamında parametrik olarak modellenmiş ve farklı yük büyüklüğü uygulanarak değişik varyasyonlar oluşturulmuştur. ANSYS yazılımında modelin mesh optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve tüm varyasyonlar çözdürülmüştür. Elde edilen tasarım tipi ve yüklenme şartlarına bağlı gerilme- gerinim değerleri kullanılarak bir Yapay Sinir Ağı Modeli geliştirilmiştir. Böylelikle katman sayısı, kesit ölçü büyüklükleri ve yüklenme büyüklüklerine bağlı olarak yay sabiti (k), gerilme-gerinim değerleri yüksek hassasiyetle tahmin edilmesi sağlanmıştır. Tasarımcı, geliştirilen YSA modelini kullanarak Yay tasarımı hızlı, kolay ve minimum maliyetle elde edebileceği bir yaklaşım konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ağır vasıta araçları, süspansiyon, konvansiyonel yaprak yay, yapay sinir ağları.

Analyze of Leaf Springs with Parametric Finite Element Analysis and Artificial Neural Network

ABSTRACT

Leaf spring especially used in heavy vehicles. Leaf spring provide to increase the strength of heavy vehicles chassis and some components, absorb the shock loading due to some road condition and absorb the vibration. Because of these features, leaf springs are most used suspension element for the heavy vehicles. For this purpose, parametric rectangular cross sectional leaf spring design was obtained. For leaf spring design, FEA models of different variations were created and analyzed primarily between 1-10 layers using ANSYS software. The leaf spring layers and their dimensions were taken in varying ways according to the manufacturer's catalog. The effect of the number of leaf spring layers on element resistance and deformation was also simulated by changes in stresses. The number of layers between 1-10 and spring models of different section sizes were modeled parametrically in the ANSYS program and different variations were created by applying different load sizes. Mesh optimization of the model was performed in ANSYS software and all variations were solved. An Artificial Neural Networks Model was developed using stress-strain values depending on the design type and loading conditions obtained. Thus, depending on the number of layers, section measurement sizes and loading sizes, the spring constant (K), stress-strain values were estimated with high precision. Using the ANN model developed, the designer has put in place an approach that can be achieved quickly, easily and at a minimized design costs.

Keywords: Heavy vehicles, suspension, conventional leaf spring, artificial neural networks.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yaprak yaylar yüksek miktarda yükleri taşıyabilen ve çoğunlukla ağır vasıta araçlarında veya raylı sistem taşıtlarında kullanılan bir süspansiyon elemanıdır. Genel olarak yaprak yaylar 3 kategoride ele alınabilir. Bunlar; parabolik, Z tipi ve konvansiyonel yaprak yaylardır. Temel olarak konvansiyonel yaprak yaylar bir merkezleme civatası etrafında üst üste birleştirilmiş lamalardan oluşmaktadır. En uzun lama ana lama olarak adlandırılır ve yaprak yay ile şasesinin bağlantısı bu ana üzerinde bulunan göz adı verilen bağlantı unsurları ile

yapılır. Yaprak yayların temel görevi bağlı olduğu taşıtın şasesini ve taşıt bileşenlerini; yol koşullarından kaynaklanan yüklemelere, frenleme esnasında oluşan yüklemelere ve titreşimin oluşturabileceği zararlardan korumaktır. Yaprak yaylar üzerlerine bir kuvvet uygulandığı zaman oluşan enerjiyi yüksek şekil değiştirebilme kabiliyetleri sayesinde sönümleyip eski geometrik formlarına salınım hareketi yaparak dönmektedir. Yapılan bu salınım hareketi ile yay üzerine uygulanan yükü absorbe etmektedir. Yaprak yayların üzerlerine uygulanan yükleri sönümleme yetenekleri; kullanılan malzemeye, yay lamalarının kavis açısına, lama kalınlığına, lama genişliğine ve yayın kaç kattan oluşturulduğu gibi parametrelere bağlıdır.

Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : tozkan@gazi.edu.tr

Gowd ve Goud. Hafif ticari bir araçta bulunan yaprak yayın statik analizini yapmış ve bir yaprak yay için maksimum güvenli yük miktarını tespit etmişlerdir. Yapılan analizlerde teorik ve bilgisayar destekli bir sonlu elemanlar analiz programını kullanmışlardır. Tasarlanan yaprak yay modellerine 1000-15000 N arasında yükler uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda belirlenen geometrik ölçütlere göre en uygun yükün 7700 N olduğu tespit edilmiştir [1].



Şekil 1. Yaprak yay kullanım gösterimi (leaf spring usage notation)

Sunar ve Çevik. Çalışmalarında tek katlı parabolik bir yaprak yayın yorulma analizini yapmıştır. Yapılan analizler için elde edilen veriler sonlu elemanlar yöntemi ve tasarımı yapılan modelin bir prototipi üretilip deneye tabi tutulması ile ulaşılmıştır. Sonlu elemanlar analizi için en uygun ağ yapısı boyutu ve eleman sayısı yakınsama çalışması yapılarak elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile yay üzerinde bulunan en hassas bölgeler bulunmuş ve yorulma değerleri ölçülmüştür. SEM analizinin ardından tasarımın bir prototipi oluşturulmuş ve tek eksenli bir yorulma cihazı üzerinde ömür testleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı yöntem ile elde edilen veriler birbirlerine çok yakın sonuçlar vermiştir [2]. Bhandarkar ve Shekhawat. Çalışmasında, hafif ticari araçlar için arkadan motorlu araçlar için yaprak yay analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma ile üretilen yeni model için dayanıklılık ve taşıma değerleri farklı yöntemler ile ölçülmüştür. Elde edilen veriler kıyaslanmış ve birbirlerine yakınlığı gözlenmiştir [3]. Kelebek ve diğerleri. Bir ağır taşıtta süspansiyon elemanı olarak konvansiyonel yaprak yay yerine parabolik yaprak yay kullanılmasını araştırmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel veriler ile sonuçlara ulaşılmıştır. Elde edilen veriler ile modellenen parabolik yayın kullanılabilirliği kanıtlanmış ve konvansiyonel yaprak yay ile parabolik yaprak yayların avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır [4]. Dubey ve Mahakalkar. Konvansiyonel çelik yaprak yaylar yerine kompozit yaprak yayların kullanılmasının sağlayacağı avantajları incelemiştir. Temel olarak tek katlı bir yaprak yay tasarımı 3 farklı malzemeden üretilerek çalışma tamamlanmıştır. Çelik yaprak yay EN 45 malzemesinden üretilmiştir. Kompozit yaprak yaylar HS Karbon ve HM Karbon malzemelerinden üretilmiştir. Kompozit yaprak yaylar statik yüklenme koşullarına göre

3 farklı yük etkisinde bir sonlu elemanlar programı üzerinden incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen veriler konvansiyonel yaprak yayaya ait veriler kıyaslandığında; karbon temelli kompozit yaprak yaylar %65-70 aralığında ağırlık tasarrufu sağlamış ve daha iyi veriler sunduğu gözlenmiştir [5]. Reddy ve diğerleri. Konvansiyonel bir yaprak yayı oluşturan lamaların; lama genişliği, lama kalınlığı ve lama uzunluğunun yaprak yayaya etkisini araştırmıştır. Çalışmada 2 boyutlu 7 lamadan oluşan bir yaprak yay modeli sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar ile geleneksel tasarım prosedürleri doğrultusunda elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Bu doğrultuda lamaların kalınlık ve genişlik değeri arttıkça; gerilmenin düştüğü, defleksiyonun azaldığı ve yay sabitinin ise arttığı gözlenmiştir [6]. Venkatesan ve Devaraj. Kompozit yaprak yaylar ile geleneksel yaprak yayları; yük taşıma kapasitesi, ağırlık, yay sabiti gibi özelliklere göre kıyaslanmasını incelemiştir. Çalışmada cam/epoksi malzemesinden üretilmiş bir kompozit yaprak yay ile bire bir aynı boyutlandırılmalara sahip çelik yaprak yay 3 farklı dizayn parametresine göre sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Yapılan inceleme sonucu eşit kesit alanına sahip yay lamalarına sahip yaprak yay en efektif model olmuştur. Aynı zamanda kompozit yaprak yaylar çelik yaylara kıyasla ağırlık ve ekonomik ölçekte daha yararlı olduğu sonucu elde edilmiştir [7].

Patunkar ve Dolas. Çalışmasında statik yüklenme koşulları esas alınarak konvansiyonel bir yaprak yay ile cam/epoksiden üretilmiş kompozit malzemeden üretilmiş bir yaprak yayı bir sonlu elemanlar programı kullanılarak kıyaslamıştır. Yapılan analizler sonucunda kompozit yaprak yayların defleksiyon değeri konvansiyonel yaprak yayaya göre daha az olduğu ve düz yol koşullarında kompozit yaprak yayların kullanımının daha avantajlı olduğu sonuçlarına varılmıştır [8]. Dhoshi ve diğerleri. Dinamik yüklenme koşulları uygulanan bir yaprak yayın minimum maliyet ile ürün kalitesini artırmayı amaçlamışlardır. Yapılan çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ve analitik yaklaşımlar kullanılmıştır. Geliştirilen model ile istenilen amaçlara ulaşıldığı ve sonlu elemanlar yönteminin kullanımının önemi gösterilmiştir [9]. Yinhan ve Ka. Çalışmasında kompozit yaprak yay ile çelik bir yaprak yayın mekanik özelliklerini elde etmek ve kıyaslamayı amaçlamışlardır. Çalışmada bir sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak çelik ve kompozit yaprak yay analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kompozit yaprak yayın yorulma dayanımının daha yüksek olduğu ve ağırlık olarak taşıta bir avantaj kazandırdığı önerilmiştir [10]. Kumar ve Aggarwal, 9 kattan oluşan bir konvansiyonel yaprak yayı statik yüklenme koşulları altında elde edilen deneysel veriler ile sonlu elemanlar analizi ile elde edilen çıktılarını karşılaştırılmasını yapmıştır. Yapılan analiz sonucunda deneysel veriler ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen verilerin çok yüksek oranda uyduğu gözlenmiştir [11]. Manchanda ve diğerleri. Farklı malzemeler üretilmiş yaprak yayları kesme gerilmesi, kesme gerinimi deformasyon ve ağırlık gibi

kriterleri esas alarak bir sonlu elemanlar programı ile incelemiştir. Elde edilen sonuçlar analize tabi tutulan malzemeler arasında en iyi sonuçları veren malzeme bulunmuştur [12]. Hussain ve diğerleri. 3 farklı kompozit malzemedeki (Karbon/epoksi, Cam elyaf/epoksi ve Karbon elyaf/epoksi) üretilmiş aynı dizayn parametrelerine bağlı yaprak yayların bir sonlu elemanlar programı esas alınarak incelenmiştir. Karbon elyaf/epoksi malzemesinden üretilmiş yaprak yay çelik yaylara göre 5 kat hafif olmasına karşın, şekil değiştirebilme kabiliyetinin çelik ve diğer kompozit yaprak yaylara göre daha iyi olduğu gözlenmiştir [13]. Kumar ve Aggarwal. EN45A malzemesinden üretilmiş 3 katlı bir parabolik yaprak yayın, eş değer gerilme, maksimum şekil değiştirme ve ağırlık gibi değerler incelemiştir. Oluşturulan modelde katlar arası sürtünme istenmediği için, katların arasına kauçuk malzemeler konularak analiz yapılmıştır. Çalışmada sonlu elemanlar programından elde edilen veriler ile deneysel yöntemler ile elde edilen veriler kıyaslanmış ve sonuçların yakınlığı saptanmıştır [14]. Baviskar ve diğerleri, yaprak yaylar hakkında genel bir inceleme yapmıştır. İlk olarak yarım eliptik yaprak yaylar hakkında genel bilgi verilmiştir. Ardından sırasıyla; yaprak yayların kırılma mekaniği, gerilme analizi ve son olarak sonlu elemanlar yöntemi ile kompozit yaprak yayların analizi konuları incelenmiştir [15]. Topaç ve Bahar. Bir askeri aracın ön süspansiyonunda bulunan bir parabolik yaprak yayı; yük şekil değişimi karakteristiğine etkisine göre ve yay küpesinin yay karakteristiğine etkisini araştırmıştır. Yapılan incelemeler sırasında parabolik yaprak yayın katı modeli oluşturulmuş ardından model doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizine tabi tutulmuştur. Analiz ile elde edilen veriler ile deneysel yöntem neticesinde elde edilen veriler kıyaslanmıştır. Yapılan inceleme sonucunda; doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ve deneysel verilerin birbirine yakın olduğu gözlenmiş ve bu tasarımda kullanılan yay küpesi modeli yaprak yayın yay karakteristiğini %20 oranında azalttığı gözlenmiştir [16]. Andoko ve Puspitasari. İki farklı malzemedeki üretilmiş (65Si7 ve C17000) ve aynı dizayn parametrelerine bağlı iki farklı yaprak yayı sonlu elemanlar yöntemi ile kıyaslamıştır. Yapılan analiz sonucunda 65Si7 malzemesinden üretilen yaprak yay araçlarda kullanımının daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir [17]. Pozhilarasu ve Pillai. Statik yükleme koşulları altında, aynı dizayna sahip iki farklı malzemedeki üretilmiş (kompozit malzeme ve çelik) yaprak yayı bir sonlu elemanlar programı kullanarak karşılaştırmıştır. Aynı zamanda sonlu elemanlar analizi ile aynı boyutlandırmaya sahip kompozit bir yaprak yay üretilmiş ve deneye tabi tutularak çelik yaprak yay ile kıyaslanma da yapılmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda daha pürüzsüz yol koşullarında kompozit yaprak yay kullanımının çelik yaprak yayya göre daha avantajlı sonuçlar verdiği görülmüştür [18]. Juliyana ve diğerleri; statik yükleme koşulları altında tek katlı bir kompozit yaprak yayın çelik yaprak yay yerine kullanılması durumunu sonlu elemanlar esaslı bir program yardımı ile analiz edilmiştir. Yaprak yay modeli değişken lama kalınlık

ve genişlik değerlerine göre analiz edilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda tek katlı kompozit yaprak yayın çelik yaylara göre daha efektif sonuçlar verdiği görülmüş ve çelik yaprak yay modeli yerine, kompozit yaprak yay modelinin kullanılması önerilmiştir [19]. Kurna ve diğerleri, çok katlı yarım eliptik yapıda bir yaprak yayı bir sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak incelenmesi ve sonlu elemanlar ile elde edilen veriler ile deneysel yöntemle elde edilen veriler arasındaki korelasyonu incelenmiştir. Yapılan analizler ve deneyler sonucunda, yay sabiti ve gerilme değerleri arasında yüksek bir korelasyon olduğu saptanmıştır [20].

Bu çalışmada, yaprak yay kat sayısı, yaprak yay kesit ölçüleri ve zorlanma şartları parametrik olarak modellenmiştir. Daha sonra elde edilen bu modellere farklı yüklemeler uygulanarak yaprak yay gerilme, gerinim, deformasyon değerleri elde edilmiştir. Yaprak yay kat sayısı 1'den 10'a kadar, düz, ters, çift tasarımda olmak üzere 3 farklı tasarım modeli oluşturulmuştur. Bu farklı taraşım modelleri üzerine, katman sayısı ve yaprak yay katman sayısı ve uygulanan yük durumları parametrik olarak modellenmiş ve FEA çözümleri elde edilmiştir. Elde edilen parametrik model sonuçları kullanılarak bir veri tabanı oluşturulmuştur. Veri tabanındaki tasarım parametreleri ve sonuçları kullanılarak Yapay Sinir Ağı Modeli oluşturulmuştur. Yapay Sinir Ağı Modeli oluşturulurken birçok varyasyon test edilmiş ve içlerinden en performanslı olan model tasarım probleminin modeli olarak belirlenmiştir. Böylece kolay, ucuz, zaman tasarruflu bir model geliştirilerek, tasarımcıların tasarım parametrelerine uygun biçimde pratik bir tasarım metodolojisi ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Yaprak yaylar özellikle ağır yük şartlarında, yüklemelerden dolayı oluşan darbeleri minimize etmek için kullanılırlar. Bu tip yaylar özellikle ağır vasıta (yük taşıma kapasitesi büyük olan) araçlarda kullanılmaktadır. Çalışma ortamları nedeni ile yaprak yaylar ağır yüklemelere ve dış etmenlere maruz kalmaktadır. Bu nedenle yaprak yaylar tasarım aşamasında iken farklı yöntemler ile analiz edilerek. En uygun modelin oluşturulması, üretim esnasında oluşacak zaman ve maliyet kayıplarının en aza indirgenmesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada tasarımı yapılan yaprak yaylar 51CrV4 çeliği kullanılarak modellenmiştir. 51CrV4 çeliği; şekil değiştirebilme kabiliyeti yüksek aynı zamanda yüksek yorulma performansına sahip alaşımli bir çeliktir. Yüksek dayanım ve ömür gerektiren mil, dişli ve yaprak yay gibi temel makine elemanlarında kullanılır. Temel olarak krom ve vanadyum alaşımli dir. Yay malzemesinin mekanik özellikleri çizelge 1a'da gösterilmiştir. Isıl işlem görülebilen kabiliyetleri dolayısı ile mekanik özellikleri iyileştirilebilir. Temel mekanik özellikleri Çizelge 1b'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.a. Yay malzemesi Mekanik özellikleri (Leaf spring material's Mechanical properties)

51CrV4 Mekanik Özellikler						
Poisson Oranı	Young Modülü	Kesme Modülü	Yoğunluk	Çekme mukavemeti	Akma Mukavemeti	Sertlik
0.3	210 (Gpa)	80 (Gpa)	7800 (kg/m ³)	700 (Mpa)	550 (Mpa)	270-330 HB

Çizelge 1.b 51CrV4 kimyasal bileşenleri (51CrV4 Chemical composition)

51 CrV4 % Kimyasal bileşenleri							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
Minimum	0,47	0	0,7	0	0	0,9	0,1
Maksimum	0,55	0,4	1,10	0,025	0,025	1,20	0,25

Yaprak yaylar genel olarak ağır yüklerle karşı, darbe ve yükleri absorbe etme yeteneklerinin yanı sıra yanıl yük ve momentlere karşı da direnç gösterirler. Özellikle yaprak yaylar eğilme gerilmesine maruz kalırlar. Gelen kuvvete karşı oluşan eğilme momenti (M) Denklem 1 yardımıyla hesaplanır. Kesit modülü Z Denklem 2 yardımıyla belirlenir. Yaprak yayda meydana gelen eğilme gerilmesi Denklem 3 ve yaprak yayda oluşan yer değiştirme miktarı Denklem 4 yardımıyla hesaplanır [21].

$$M = F.L \quad (1)$$

$$Z = \frac{I}{y} = \frac{\frac{b.t^3}{12}}{\frac{t}{2}} = \frac{b.t^2}{6} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{F.L}{\frac{1}{6}.b.t^2} = \frac{6.F.L}{b.t^2} \quad (3)$$

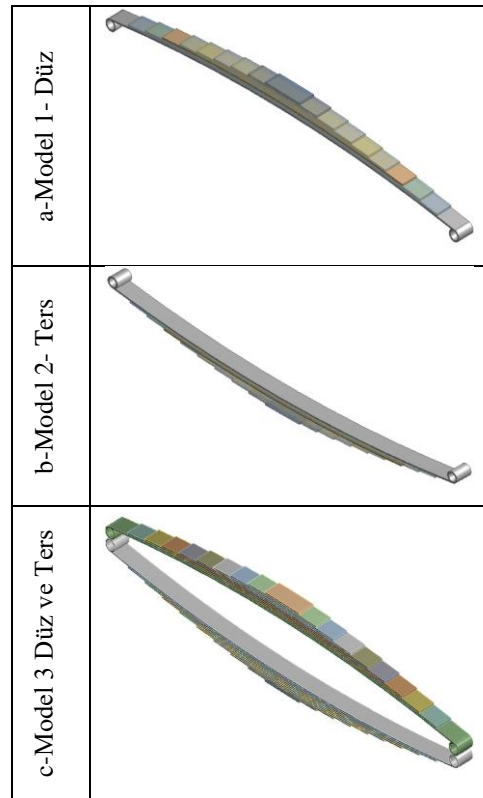
$$\delta = \frac{F.L^3}{3.E.I} = \frac{F.L^3}{3.E.\frac{b.t^3}{12}} = \frac{4.F.L^3}{E.b.t^3} = \frac{2.\sigma.L^2}{3.E.t} \quad (4)$$

M	Moment (N.mm)
F	Kuvvet (N)
L	Lama uzunluğu (mm)
Z	Kesit modülü (mm ³)
I	Atalet momenti (mm ⁴)
E	Elastisite modülü (Young Modülü) (N/mm ²)
t	Kalınlık (mm)
b	Genişlik (mm)
n	Toplam lama sayısı
δ	Yer değiştirme (mm)
σ	Gerilme (N/mm ² =MPa)

2.1. YAPRAK YAY TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF LEAF SPRING DESIGN PARAMETERS)

Parametrik sonlu elemanlar analizi için 3 farklı geometrik dizayna sahip konvansiyonel yaprak yay tasarımı yapılmıştır (Şekil 2). Her yaprak yay tasarımı 45

alt modele indirgenerek toplamda 135 parametrik model oluşturulmuştur.



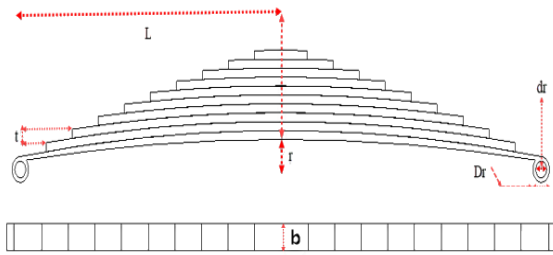
Şekil 2: Yaprak yay modelleri a- Düz, b- Ters, c- Çift (Düz ve Ters) (leaf spring models notation a- Straight, b- Reverse, Dual (Straight and Reverse))

Yay tasarımı için boyutlandırmaları Uzel ticaret ve sanayi limited şirketi tarafından çıkarılmış olan Uzel yayları kataloğundan alınmıştır [22]. Bu boyutlandırmalar; yay gözü iç çapı, ana lamanın uzunluğu, yay genişlik parametreleri, yay kalınlığı, yay lama sayısı ve kavis uzunluklarıdır. Oluşturulan parametrik modeller ve tasarım ölçüleri Çizelge 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Parametrik yaprak yay tasarım parametreleri (Parametric leaf spring design parameters)

Model tipi	Lama kat sayısı	Lama uzunluğu (mm)	Lama kesit kalınlığı t (mm)	Lama kesit yüksekliği b (mm)	Yay kavis yarıçapı (mm)	Kuvvet (N)
Düz	1	72.5			76-82-85-	
Ters	4	145	6	60	88-90	100
	6	217.5	10	80	94-100-	2500
	8	290	15	120	106-110-	7500
	10	362.5			112-115-	10000
Düz ve Ters (Çift)		435			118-120-	25000
		507.5			124-130-	
		580			140-150-	
		652.5			145-160-	
		725			175-190-	
					205	

Model 1 ve 2 toplamda 10 lamadan oluşmakta ve model 3 ise 20 kat lamadan oluşmaktadır (Şekil 3). Diğer bütün parametreler her 3 model için aynı olup bunlar; yaprak yayın göz iç çapı (dr) katalogdan alınmıştır ve her model için 30 mm çapındadır. Göz dış çapı (Dr) ise yaprak yayın kalınlık değerlerine göre değişmekte ve 42-60 mm arasında değerler almaktadır. Lama kalınlığı 6-15 arasında değişmektedir. Lama genişliği (W) 60-120 mm arasında değişmektedir. Lama kavis uzunlukları (r) her model için farklı olmakla birlikte model 1 için lama kavis değerleri 70- 205 mm arasındadır. Model 2 için lama kavis değerleri 205-70 mm arasındadır. Model 3 için kavis değerleri 70-205 arasındadır. Bütün kavis değerleri Çizelge 3'de gösterilmiştir. Ana lamanın uzunluğu 725mm olup katalogdan alınmıştır. Diğer lama boylarının uzunluğu (L), R. B. Charde ve Dr. D.V. Bhope'nin çalışmalarına göre hesaplanmıştır (Denklem 4) [23]. Lama boyları her 3 model için ayrı ayrı hesaplanmış ve Çizelge 3 de gösterilmiştir.

**Şekil 3.** Yaprak yay katman sayılarına bağlı parametrelerin gösterimi (Notation of parameters depending on leaf spring layer numbers)

$$L_{i \text{ net}} = t \frac{L}{n} \quad (5)$$

L: Ana Lamanın Uzunluğu (mm)

N: Toplam Kat Sayısı

İ: i inci yaprak yay

Katman sayısına bağlı olarak yaprak yay boyutları Denklem 1'e göre hesaplanmış ve parametrik modeller

için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan yaprak yay boyutları Çizelge 3 de verilmiştir.

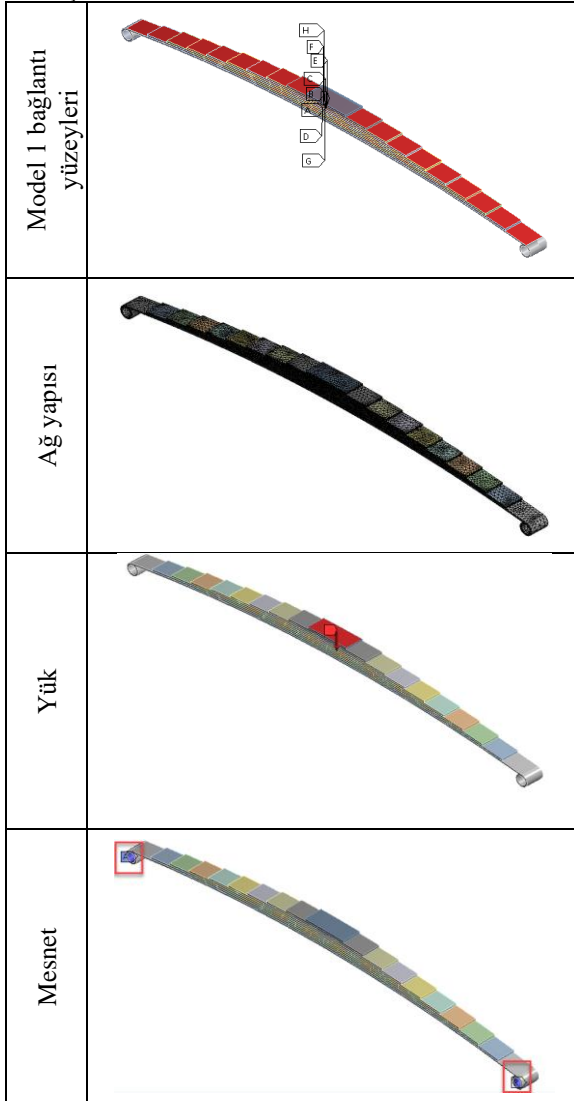
Çizelge 3 Model tipi ve katman sayısına bağlı yay lama uzunlukları (length of leaf spring layers depends on model type and leaf layers number)

Model 1 Lama uzunlukları		Model 2 Lama Uzunlukları		Model 3 Lama Uzunlukları		
Kat No.	Lama uzunluğu (mm)	Kat No.	Lama uzunluğu (mm)	Kat No.	Lama uzunluğu (mm)	Lama uzunluğu (mm)
1	72,5	1	725	1	72,5	725
2	145	2	652,5	2	145	652,5
3	217,5	3	580	3	217,5	580
4	290	4	507,5	4	290	507,5
5	362,5	5	435	5	362,5	435
6	435	6	362,5	6	435	362,5
7	507,5	7	290	7	507,5	290
8	580	8	217,5	8	580	217,5
9	652,5	9	145	9	652,5	145
10	725	10	72,5	10	725	72,5

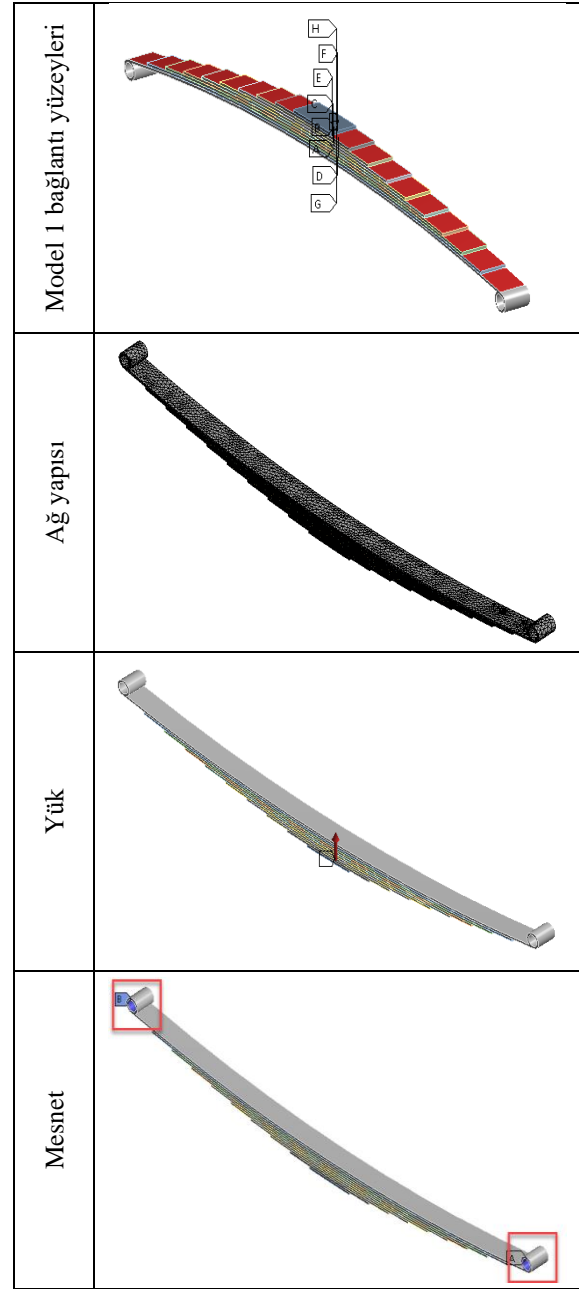
2.2. YAPRAK YAYLARIN PARAMETRİK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE ANALİZİ (MODELLING OF LEAF SPRING USING PARAMETRIC FINITE ELEMENT MMODELING AND ANALYSIS)

Oluşturulan yaprak yay modelleri sonlu elemanlar analizi için gerekli olan sınır şartları Ansys 17.2 programı kullanılarak tanımlanmıştır. Bunlar; uygulanan yük, mesnetler, ağ yapısı ve bağlantı tanımlamalarıdır. Her model için ayrı ayrı Şekil 4-5 ve 6 da gösterilmiştir.

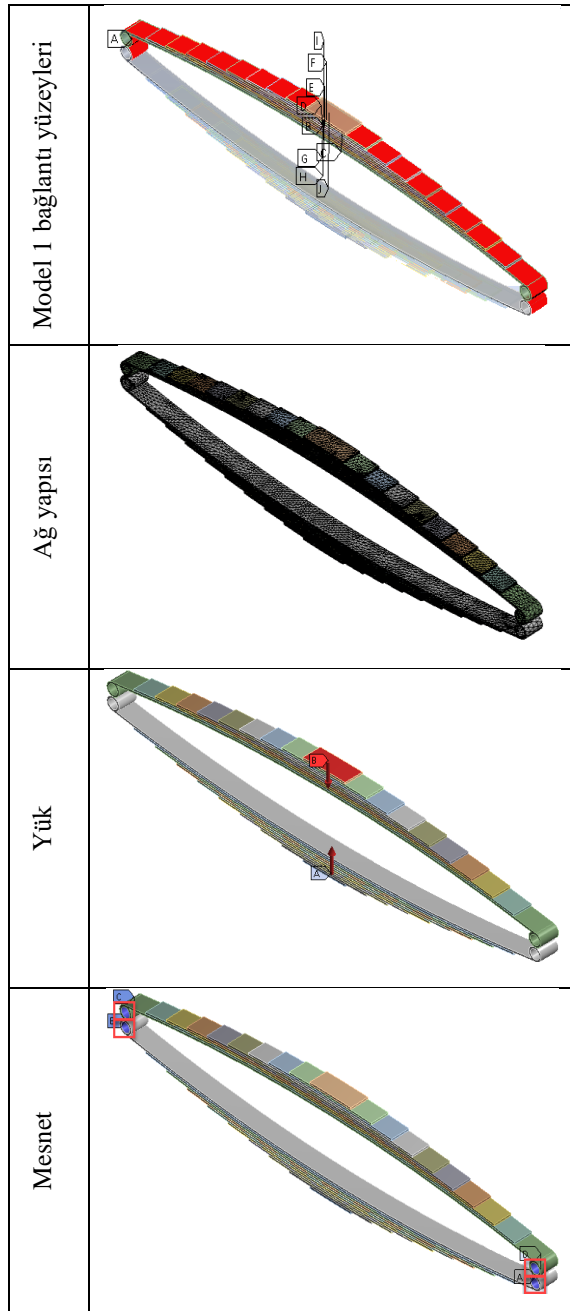
Her 3 tasarımda, lamaların birbirine yüzeylerinden birbirlerine temas ettiği tasarlanmış ve böylelikle uygulanan kuvvetin her lamaya aktarımı sağlanmıştır. Model 3 için bağlı yüzeylere ekstra olarak gözlerin dış yüzeyinden birleştirilmiş, böylelikle çift kademeli yaprak yayın birbirine bağlantısı sağlanmıştır. Model 1 ve Model 2'de yaprak yayın en dış katmanının üst yüzeyine 100, 2500, 7500, 10000 ve 25000 N kuvvet uygulanmıştır. Model 3 için ise en dış 2 yüzeyine olacak şekilde eş büyüklükte 100,2500,7500,10000 ve 25000 N kuvvet uygulanmıştır. Yaprak yaylar her 3 tasarımda da göz kısımlarında sabit mesnet kullanılmıştır. 3 modelde yay lamaları Tetrahedrons ağ yapısı kullanılarak oluşturulmuştur. Kritik bölgeler ve geometrik süreksizliklerin olduğu bölgelerde ağ yapısı sıklaştırılmıştır. Yay gözlerinin iç ve dış kısımları, Lamaların birbirlerine temas ettikleri yüzeyler ile ana lamanın dış kısımlarında ağ sıklaştırılması yapılmıştır. Yükleme koşulları ve sınır şartları Şekil 3-4-5 de verilmiştir.



Şekil 4. Model 1 için kat sayısı, mesh yapısı, yükleme durumu ve mesnetlerin gösterimi (model 1 number of layers, Mesh structure, load Condition, support location notation)



Şekil 5. Model 2 için kat sayısı, Mesh yapısı, Yükleme durumu ve mesnetlerin gösterimi (model 2 number of layers, Mesh structure, load Condition, support location notation)



Şekil 6. Model 3 için kat sayısı, ağ yapısı, yükleme durumu ve mesnetlerin gösterimi (model 3 number of layers, Mesh structure, load Condition, support location notation)

2.3. YAPRAK YAYLARIN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ (MODELLING OF LEAF SPRING USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS)

Yapay sinir ağları, yapay zeka tekniklerinden bir tanesidir. İnsan beynini simülasyon ederek, aynı insanın öğrenme becerilerini bilgisayar teknikleri ile insan beyninin yaptığı öğrenme ve tahmin işlemlerini yerine getirir. Bu modelin arkasında derin bir matematik vardır. Günümüz teknolojisinde birçok bilim alanında uygulaması mevcuttur. Modelin geliştirilmesi için gerekli olan veri setinin belirlenmesi ve bu veri setindeki

verilerin girdi ve çıktı olarak tasnif edilmesi gerekmektedir. Bu işlemleri gerçekleştirmek için problemlerin bir parametreye bağlanması yani girdi değerlerine karşılık gelen çıktı değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Girdi ve çıktı değerleri için ya deneysel çalışmaların yapılması ya da mühendislik yaklaşımı ile bir hesaplamalarının elde edilmesi gerekir. Bu çalışmada; 3 farklı tasarım ana modeline göre, yaprak yay katman sayısı, yay boyları, yay kat yüksekliği, yay genişliği ve uygulanan kuvvetler girdi parametresi alınarak Yapay Sinir ağı modeli geliştirilmiştir. 52 sütunlu girdi ve 10 sütunlu çıktı değerlerini kapsayan toplamda 10800 satırlık veri ile bir öğrenme modeli geliştirilmiştir. 51 sütunlu veri setinde, yay model tipi (Düz, Ters ve Düz + Ters) yaprak yay katmanları parametrik model boyutları (kat sayısı, katman kalınlığı, katman yüksekliği, yay kavis yarıçapı vb. değerler her katman için ayrı ayrı tanımlanmıştır. Çıktı parametreleri için maksimum deformasyon, defleksiyon, von mises, normal gerilme, von-mises ve normal gerinim, yay sabiti (çok katmanlı olanlardaki her katman için yay sabiti) değerleri modellenmiştir. Bu amaçla veri seti kullanılarak Matlab ortamında bir kod yazılarak birçok farklı model denemesi gerçekleştirilmiş ve bu modellerin performansları istatistiksel olarak yazılım üzerinden hesap ettirilmiştir. Daha sonra Matlab' dan elde edilen sonuçlar ile; FEA sonuçlarının regresyonları kontrol edilerek en iyi performansı sağlayan model Yapay Sinir Ağı Modeli belirlenmiştir.

Yapay sinir ağları, yapay zekanın bir alt kolu olup, insan beyninin öğrenme modelini esas alarak bir öğrenme ve öğrenme sonunda bir sonuç çıkartma ilişkisi ile çalışmaktadır. Bu metot birçok sosyal ve mühendislik problemlerine daha hızlı ve kolay yoldan çözüm ortaya koymaktadır. Özellikle lineer olmayan sonuçların daha kolay ve hızlı bir yöntemle çözümünü gerçekleştirebilmektedir. Bu metot genel olarak girdilere karşılık bir çıktı değerleri oluşturmaktadır. En basit manası ile: Girdiler → İşlem → Çıktılar biçiminde model tanımlanabilir. Modelin girdiler kısmında deney sonuçlarını etkileyen parametreler girdi olarak modelde tanımlanır. Bu girdilere karşılık çıktıları elde edebilmek için İşlem basamağında yoğun matematik barındıran bir kara kutu (black box) bulunur. İşlem basamağı, gizli katmanlar ve aktivasyon fonksiyonlarından oluşur. Aktivasyon fonksiyonları probleme göre farklılıklar gösterebilir ve doğru aktivasyon fonksiyonunu belirleyebilmek için birçok iteratif işlem yapılması gerekmektedir. ANN ana mimarisinde; tansig, tribas, hardlim, logsig, purelin vb. farklı matematiksel fonksiyonlar kullanılabilir. Ayrıca bu gizli katmanların sahip oldukları nöron sayıları da modelin etkili sonuç vermesinde etkisi büyüktür. Kısaca yalnızca doğru aktivasyon fonksiyonunu belirlemek, doğru modeli belirlemeye yetmez, bunun yanında her bir gizli katmanın nöron sayısını da doğru belirlemek gerekmektedir. Aktivasyon fonksiyonunun ve nöron sayılarının belirlenmesinin yanı sıra; öğrenme fonksiyonunun belirlenmesi de büyük önem arz

etmektedir. Yapay Sinir Ağları yönteminde birçok farklı öğrenme metodu bulunmaktadır; trainbr, trainbuwb, trainc, trainb, trainbfg, trainbfgc, trainlm vb. Bu fonksiyonlar içinde genel mühendislik problemlerinde en hızlı çözümün gerçekleştiği trainlm fonksiyonu öne çıkmaktadır. Hem doğruluk hem de hız bakımından trainlm öğrenme algoritması büyük bir avantaja sahiptir. Bu algoritma; Trainlm (Levenberg-Marquardt) back-propagation (BP) metodunu içermekte ve Levenberg-Marquardt matematiksel yaklaşımını kullanmaktadır.

Yapay Sinir Ağı Modelini oluşturmak için Trainlm Öğrenme Algoritmasının yanı sıra Tansig+Logsig + Purelin aktivasyon fonksiyonlarının ve nöron sayılarının iterasyonları denenmiş ve performansı en yüksek olan model gerek öğrenme gerek tahmin ve de gerek validasyon için en iyi sonucu veren model belirlenmiştir. Bu işlem için Matlab yazılımında bir kod hazırlanmış ve bu kodda, tansig ve logsig fonksiyonlarının katmanlarının öncelikleri ve nöron sayıları bir algoritmaya göre değiştirilerek sonuçlar elde edilmiş daha sonrasında regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizine göre en iyi performansı sağlayan modelin sonuçları ile ANSYS sonuçları değerleri birbirleri ile sayısal tutarlılıkları kontrol edilmiş en iyi model belirlenmiştir. Algoritma oluşturulurken katman sayısı 2'den 5'e kadar iterasyon yapılmış, n-1 ci katmanın hep purelin olduğu belirlenmiştir. Yani 2 katmanlı bir sistemde ya: Tansig+ Purelin ya da Logsig+Purelin fonksiyonu belirlenmiştir. Katman sayısı artırıldıkça mesela katman sayısı 3 olduğunda Tansig+Logsig+Purelin, Tansig+Tansig+Purelin, Logsig+Tansig+Purelin ve Logsig+Logsig+Purelin biçiminde sonuç verecek For-Next döngüsü kullanılmıştır. Bu döngünün içinde ayrıca nöron sayıları 5'den 100'e kadar değişecek biçimde For-Next döngüsü içine alınmıştır [24-31].

3782 satırlık x 51 sütunluk bir girdi verisi ile 3782 satırlık x10 sütunluk bir çıktı elde edilmiştir. Girdilerimiz; problem tasarım parametreleri olmakla birlikte, çıktılarımız, deformasyon, gerinim, gerilme, yay sabiti K ve çok katmanlı yayalardaki eşdeğer k değeri biçiminde planlanmıştır. Bu inputlara karşı mühendislik hesaplamalarında elde edilebilecek tüm sonuçlar Yapay Sinir Ağı Sistemi ile hızlı ve kolay yoldan belirlenmiştir. Yapay Sinir Ağı Sistemine veriler girilirken %70 data öğrenme verisi olarak Matlab 'daki data bankasına

$$Net\ 0 = \left(\sum w_{i,j} \cdot x_j \right) + b_m \cdot v_{m,n} = \left(\sum [w_{i,j}] [x_k] \right)$$

$$+ b_m \cdot v_{m,n} \quad (6)$$

$$x_1 = \text{tansig}(x_1) = \frac{2}{(1 + e^{-2 \sum (w_{i,j} \cdot x_1) + b_1 \cdot v_{1,n}})} - 1 \quad (7)$$

$$x_2 = \text{tansig}(x_2) = \frac{2}{(1 + e^{-2 \sum (w_{i,j} \cdot x_2) + b_2 \cdot v_{2,n}})} - 1 \quad (8)$$

$$x_3 = \text{logsig}(x_3) = \frac{1}{(1 + e^{-\sum (w_{i,j} \cdot x_3) + b_3 \cdot v_{3,n}})} \quad (9)$$

$$x_4 = \text{purelin}(x_4) \quad (10)$$

girilmiş, geriye kalan %15 i Test ve son kısım %15 ise Doğrulama (Validasyon) için kullanılmıştır. Yapay Sinir Ağı Modelinin matematiksel modelleri denklem 5-9 da verilmiştir [24-31].

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

A-YAPRAK YAY SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLARI (LEAF SPRING FEA RESULTS)

Yapılan sonlu elemanlar analizi ile birlikte her model ve parametrik model için; toplam şekil değiştirme, y yönünde şekil değiştirme, Von-mises gerilmesi, y yönünde normal gerilme, Von-mises gerinimi, y yönünde normal gerinim sonuçlarına ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4'de her model için ayrı ayrı gösterilmiştir.

Bulunan sonuçların yanında her modeldeki lamaların yay sabitlerini bulmak lamanın üst yüzeyine deformasyon probeları atılmıştır. Atılan probelar ile her lama katının Y yönünde ne kadar deformasyona (x) uğradığı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile Denklem 5'de gösterilen şekilde her lamanın yay sabiti (k) Microsoft Excel programında derlenmiştir. Lamaların yay sabitleri Denklem 6'da gösterildiği gibi hesaplanarak her bir yaprak yay tasarımının da ayrıca eşdeğer yay sabiti bulunmuştur.

$$F = k \cdot x \quad (11)$$

Formül 12: Yay Sabiti Hesabı

$$\frac{1}{K_{eş}} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \dots + \frac{1}{K_n} \quad (12)$$

Formül 2 Parametreleri

F: Uygulanan Yük (N)

K=Yay Sabiti (N.mm)

X=Y Yönünde Deformasyon (mm)

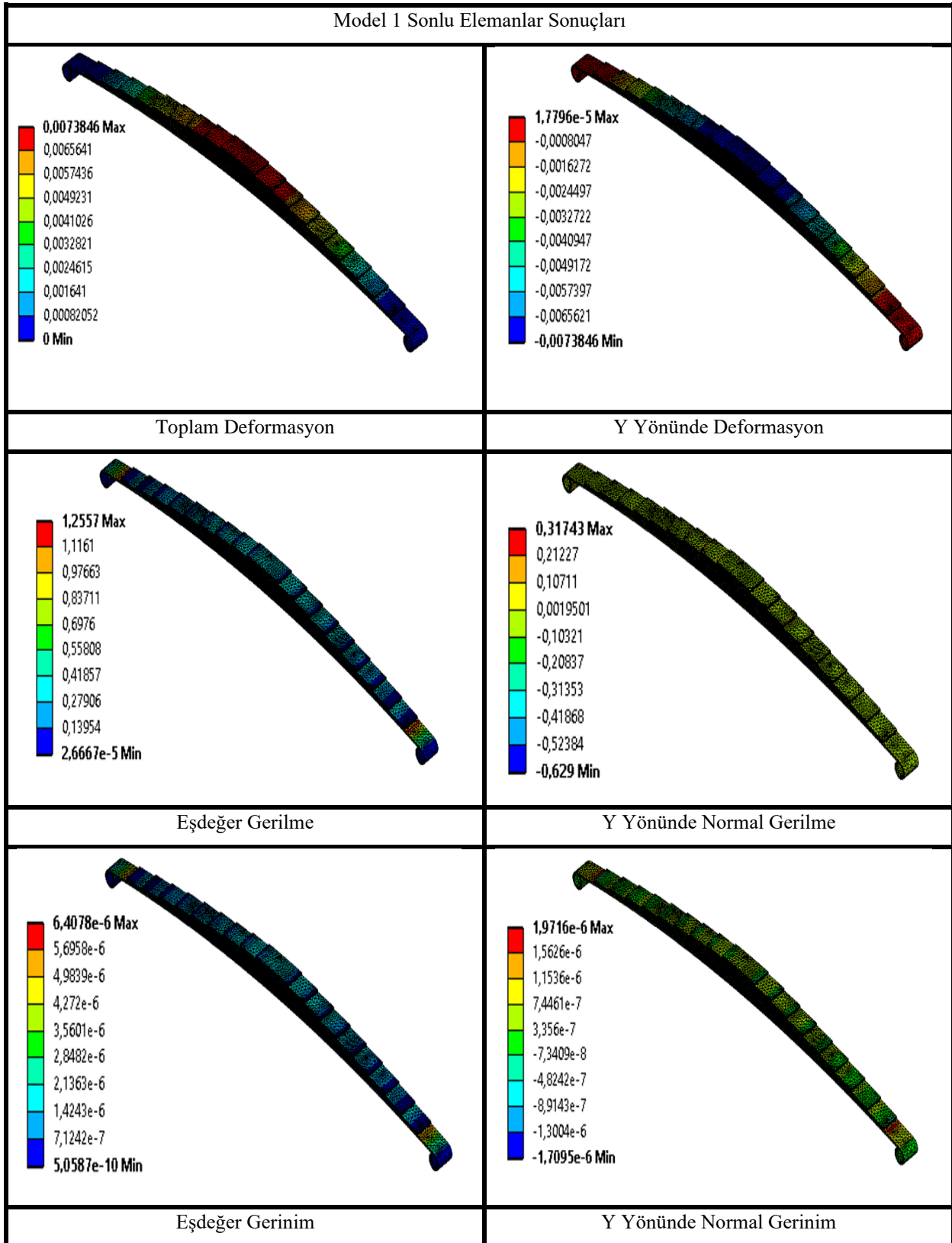
$K_{eş} = E_{şdeğer}$ yay sabiti formülü

Düz (Model 1) ve Ters (Model 2) olan modellerin parametrik tasarımlarında aynı boyutsal parametreler kullanılmıştır. Model 3 de ise Düz ve Ters (Model 3) olan modellerin simetrik parametrik boyutları kullanılmıştır. Çizelge 4 de Model 1 ve Model 3 için tasarım parametrelerine göre mühendislik analiz sonuçları verilmiştir.

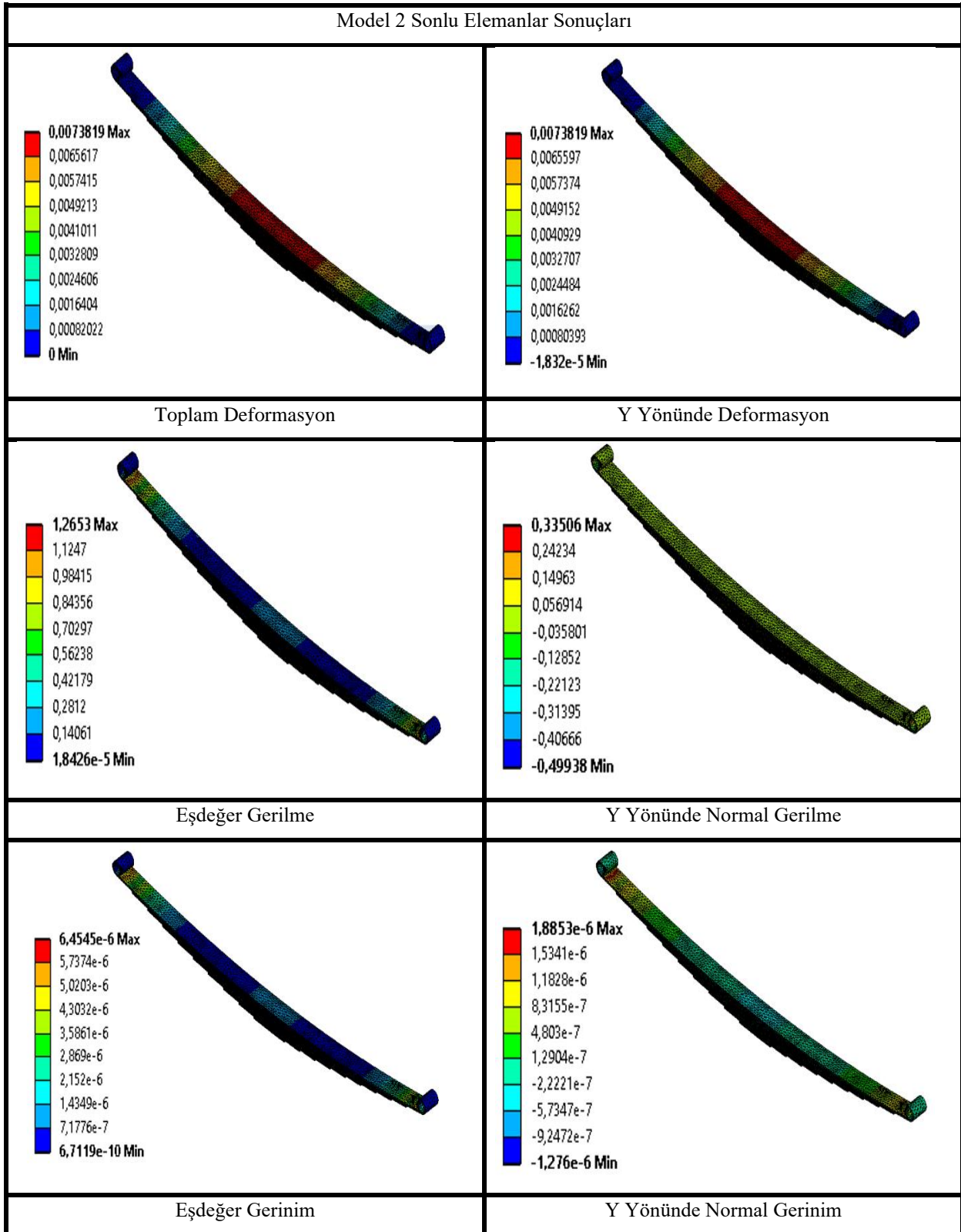
Çizelge 4: Modellere göre SEY sonuçları (FEA Results for all leaf spring model)

Toplam Deformasyon	Model 1						Model 3						
	Deformasyon(Y)	Eşdeğer Gerilme	Normal Gerilme	Eş Değer Gerinim	Normal Gerinim	Keş	Deformasyon(Y)	Eşdeğer Gerilme	Normal Gerilme	Eş Değer Gerinim	Normal Gerinim	Keş	
0,0074	1,78E-05	1,25566	0,31743	6,41E-06	1,97E-06	2,67E+03	0,0074	0,007384	1,2937	0,3163	6,36E-06	1,95E-06	2739,08
0,0055	1,46E-05	0,93421	0,2376	4,81E-06	1,56E-06	3,57E+03	0,0055	0,005531	1,0082	0,2773	4,93E-06	1,59E-06	3660,8
0,0037	1,17E-05	0,62244	0,15397	3,16E-06	1,01E-06	5,40E+03	0,0037	0,003679	0,704	0,1968	3,84E-06	1,02E-06	5464,91
0,0028	8,57E-06	0,8067	0,17377	3,84E-06	1,36E-06	6,12E+03	0,0028	0,002762	0,8045	0,1669	3,83E-06	1,32E-06	8950,08
0,0021	6,28E-06	0,55805	0,12208	2,67E-06	8,55E-07	8,13E+03	0,0021	0,00207	0,5615	0,1411	2,68E-06	8,66E-07	11895,7
0,0014	4,46E-06	0,37199	0,08364	1,78E-06	5,77E-07	1,23E+04	0,0014	0,001378	0,3688	0,0869	1,77E-06	6,04E-07	17785,6
0,0012	7,09E-06	0,39273	0,1079	1,96E-06	5,01E-07	1,32E+04	0,0012	0,001216	0,3535	0,1124	1,88E-06	5,19E-07	21795,3
0,0009	5,52E-06	0,28217	0,08626	1,47E-06	4,03E-07	1,77E+04	0,0009	0,000907	0,2778	0,0899	1,47E-06	4,11E-07	29205,5
0,0006	3,52E-06	0,17961	0,04803	9,56E-07	2,81E-07	2,67E+04	0,0006	0,000603	0,1794	0,053	9,53E-07	2,70E-07	43733,6
0,1846	0,000461	32,1156	7,44407	1,62E-04	4,67E-05	2,67E+03	0,1845	0,184495	32,928	8,4334	0,00016	5,76E-05	2748,75
0,1384	0,000365	23,3552	5,94	1,20E-04	3,90E-05	3,57E+03	0,1383	0,138291	24,365	6,7534	0,00013	3,74E-05	3660,37
0,0919	0,000296	15,558	3,89404	8,09E-05	2,54E-05	5,40E+03	0,092	0,091974	17,6	4,3736	9,60E-05	2,54E-05	5465,57
0,069	0,000214	20,1676	4,34429	9,61E-05	3,41E-05	6,12E+03	0,0691	0,069051	20,112	4,1718	9,58E-05	3,30E-05	8950,08
0,0518	0,000157	13,9512	3,05191	6,68E-05	2,14E-05	8,13E+03	0,0517	0,051738	14,259	3,5209	6,81E-05	2,21E-05	11890,5
0,0344	0,000112	9,29963	2,09101	4,45E-05	1,44E-05	1,23E+04	0,0344	0,034444	9,2217	2,1732	4,42E-05	1,51E-05	17791,7
0,0304	0,00018	9,8189	2,62531	4,91E-05	1,30E-05	1,32E+04	0,0304	0,030389	8,837	2,8101	4,70E-05	1,30E-05	21795,3
0,0227	0,000138	7,05431	2,15645	3,69E-05	1,01E-05	1,77E+04	0,0227	0,022684	6,9456	2,2469	3,67E-05	1,03E-05	29205,5
0,0151	8,81E-05	4,49019	1,20074	2,39E-05	7,02E-06	2,67E+04	0,0151	0,015078	4,4847	1,3247	2,38E-05	6,75E-06	43733,6
0,554	0,001372	96,4562	25,2799	4,78E-04	1,40E-04	2,67E+03	0,5536	0,553564	98,784	26,173	0,00048	0,00015	2747,97
0,4151	0,001094	70,0655	17,82	3,61E-04	1,17E-04	3,57E+03	0,4148	0,414836	75,617	20,8	0,00037	0,00012	3660,8
0,2758	0,000881	46,683	11,5476	2,37E-04	7,61E-05	5,40E+03	0,276	0,275937	52,801	14,762	0,00029	7,62E-05	5464,91
0,2071	0,000643	60,5027	13,0329	2,88E-04	1,02E-04	6,12E+03	0,2074	0,207153	60,336	12,068	0,00029	9,90E-05	8950,46
0,1553	0,000471	41,8536	9,15573	2,01E-04	6,41E-05	8,13E+03	0,1552	0,155214	42,777	10,563	0,0002	6,64E-05	11890,5
0,1033	0,000335	27,8989	6,27304	1,34E-04	4,33E-05	1,23E+04	0,1033	0,103315	28,086	6,5065	0,00013	4,53E-05	17792,5
0,0913	0,000539	29,4567	7,87592	1,47E-04	3,89E-05	1,32E+04	0,0912	0,091168	26,511	8,4302	0,00014	3,89E-05	21795,3
0,0681	0,000414	21,1629	6,46935	1,11E-04	3,02E-05	1,77E+04	0,0681	0,068052	21,089	6,6354	0,00011	3,05E-05	29208
0,0453	0,000264	13,4706	3,60222	7,17E-05	2,11E-05	2,67E+04	0,0452	0,045233	13,454	3,9741	7,15E-05	2,03E-05	43733,6
0,7386	0,00183	128,608	33,7066	6,38E-04	1,87E-04	2,67E+03	0,7381	0,738085	131,71	34,898	0,00064	0,0002	2747,97
0,5533	0,001457	94,8111	28,4289	4,53E-04	1,54E-04	3,57E+03	0,5531	0,553115	100,82	27,733	0,00049	0,00016	3660,8
0,3678	0,001175	62,244	15,3967	3,16E-04	1,01E-04	5,40E+03	0,368	0,367894	69,976	17,494	0,00038	0,0001	5464,32
0,2761	0,000857	80,6703	17,3772	3,84E-04	1,36E-04	6,12E+03	0,2766	0,276203	80,448	16,09	0,00038	0,00013	8950,46
0,207	0,000628	55,8048	12,2076	2,67E-04	8,55E-05	8,13E+03	0,207	0,206952	56,151	14,112	0,00027	8,66E-05	11895,7
0,1378	0,000446	37,1985	8,36405	1,78E-04	5,77E-05	1,23E+04	0,1378	0,137775	36,887	8,6929	0,00018	6,04E-05	17791,7
0,1217	0,000709	39,2725	10,7899	1,96E-04	5,01E-05	1,32E+04	0,1216	0,121558	35,348	11,24	0,00019	5,19E-05	21795,3
0,0908	0,000552	28,2172	8,6258	1,47E-04	4,03E-05	1,77E+04	0,0908	0,090736	28,118	8,8472	0,00015	4,06E-05	29208
0,0604	0,000352	17,9608	4,80296	9,56E-05	2,81E-05	2,67E+04	0,0603	0,060311	17,939	5,2988	9,53E-05	2,70E-05	43733,6
1,8463	0,004609	321,156	74,4407	1,62E-03	4,67E-04	2,67E+03	1,8452	1,844951	329,28	84,334	0,00157	0,00058	2748,75
1,3835	0,003646	233,552	59,4	1,20E-03	3,90E-04	3,57E+03	1,3828	1,382787	252,06	67,534	0,00126	0,0004	3661,04
0,9194	0,002937	155,61	38,4919	7,91E-04	2,54E-04	5,40E+03	0,9201	0,919791	174,94	49,206	0,00096	0,00025	5463,66
0,6902	0,002142	201,676	43,4429	9,61E-04	3,41E-04	6,12E+03	0,6914	0,690508	201,12	40,226	0,00096	0,00033	8950,46
0,5176	0,001571	139,512	30,5191	6,68E-04	2,14E-04	8,13E+03	0,5174	0,51738	140,38	35,279	0,00067	0,00022	11895,7
0,3444	0,001115	92,9963	20,9101	4,45E-04	1,44E-04	1,23E+04	0,3444	0,344436	92,209	21,732	0,00044	0,00015	17785,6
0,3042	0,001772	98,1813	26,9749	4,90E-04	1,25E-04	1,32E+04	0,3039	0,303894	88,37	28,101	0,00047	0,00013	21795,3
0,2271	0,00138	70,5431	21,5645	3,69E-04	1,01E-04	1,77E+04	0,227	0,226841	69,456	22,469	0,00037	0,0001	29205,5
0,1509	0,000881	44,9019	12,0074	2,39E-04	7,02E-05	2,67E+04	0,1508	0,150778	44,847	13,247	0,00024	6,75E-05	43733,6

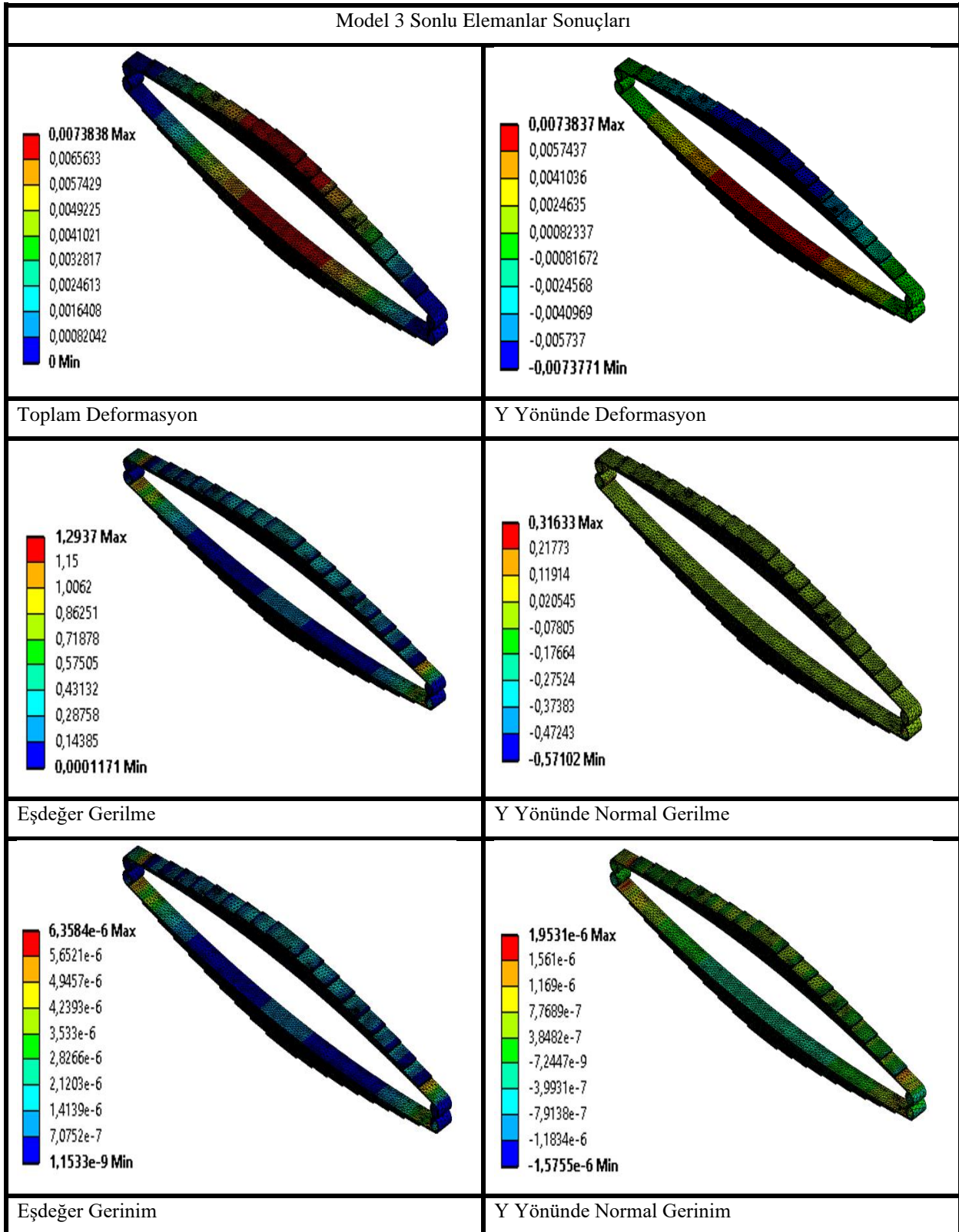
Düz (Model 1) ve Ters (Model 2) olan modellerin parametrik tasarımlarında aynı boyutsal parametreler ise Çizelge 4 de Model 1 ve Model 3 için tasarım parametrelerine göre mühendislik analiz sonuçları verilmiştir. kullanılmıştır. Model 3 de ise Düz ve Ters (Model 3) olan modellerin simetrik parametrik boyutları kullanılmıştır.



Şekil 7. Yaprak yay (Düz Model) FEA sonuçları (Results of straight + reverse leaf spring model)



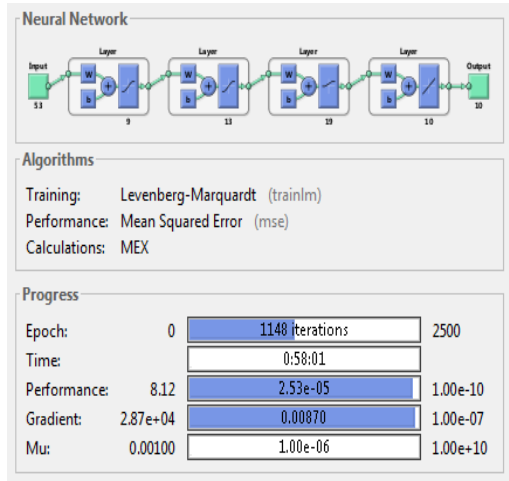
Şekil 8. Yaprak yay Ters Model FEA sonuçları (Results of reverse leaf spring model)



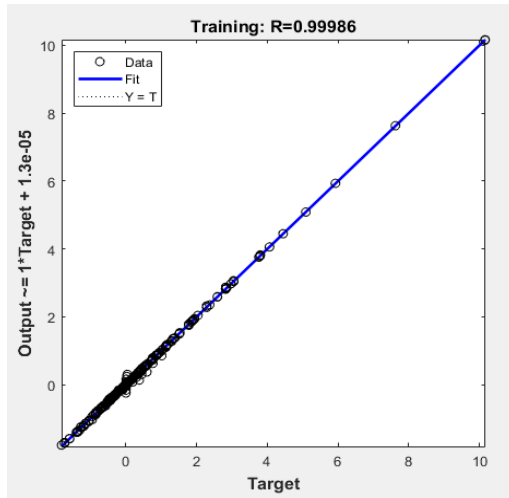
Şekil 9. Yaprak Yay Düz + Ters model FEA sonuçları (Results of straight + reverse leaf spring model)

B- YAPRAK YAY YAPAY SİNİR AĞLARI SONUÇLARI (LEAF SPRING RESULTS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS)

Elde edilen modelde; 51 input+9 Tansig+13 Tansig+19 Logsig+10 Purelin +10 Output modeli belirlenmiştir (Şekil 10). Şekil 10 da ANN modelinin ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 10. ANN Mimarisi (Architecture of ANN model)

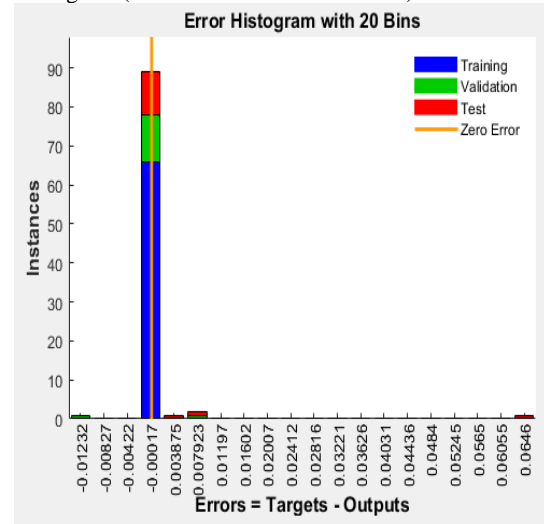


Şekil 11. ANN modelinin öğrenme performansı (Learning performance of ANN model)

Şekil 11 de ANN modelinin öğrenme performansı görülmektedir. Şekle göre modelin öğrenme performansı $R=0.99986$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer 1'e yakın bir değer olmasından dolayı öğrenme performansının iyi olduğu belirlenmekle birlikte, test ve doğrulama sonuçları ile yeniden analiz edilmesi gerekmektedir. Test ve doğrulama sonuçlarının iyi olmaması durumunda bu öğrenmenin iyi olmadığını ortaya koymuştur ve sonuç olarak başka bir model üzerinde durulması gerekmektedir.

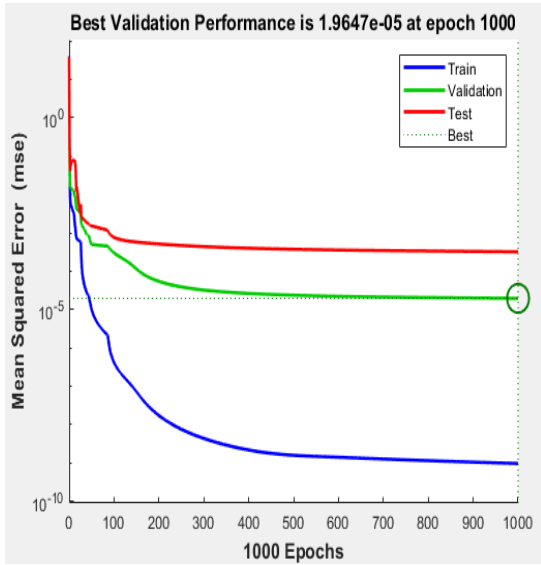


Şekil 12. Yapay Sinir Ağı Modelinin 30 Bins error Histogram (30 Bins error of ANN model)

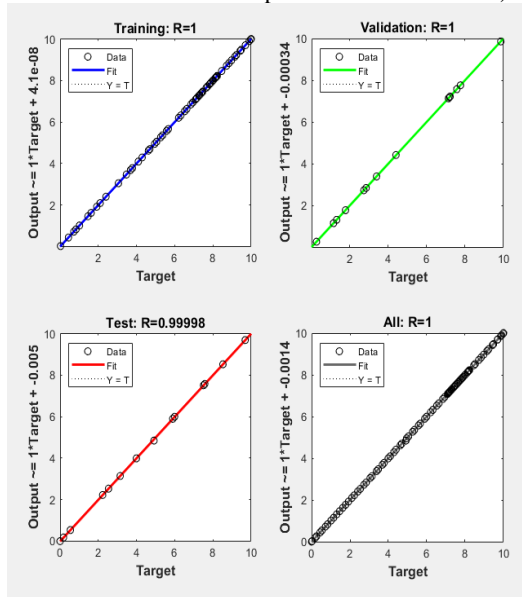


Şekil 13. Yapay Sinir Ağı Modelinin 20 Bins error Histogram (20 Bins error of ANN model)

Şekil 12 de ANN modelinin 30 Bins Error Histogramı, Şekil 13 de ise ANN Modelinin 20 Bins Error Histogramı gösterilmiştir. Şekil 12 ye göre; öğrenme verilerinin %90 ı sıfır hata içermektedir. Geri kalan %10'luk kısım ise %0,005 hata ihtiva etmektedir. Bu değer bize öğrenme performansının iyi olduğunu ispatlamaktadır. Şekil 13 de ise, öğrenme, test ve doğrulama hata miktarları gösterilmiştir. Buna göre öğrenmenin %70'lik verisinin %65 i sıfır hata ihtiva etmekte, test ve doğrulama verilerinin ise %15 lik kısımlarının %12,5 değerinin sıfır hata ihtiva ettiği hesaplanmıştır. Buna göre öğrenme, test ve doğrulama değerlerinin performanslarının yeterli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 14. Yapay Sinir Ağı Modelinin Öğrenme, Test ve Doğrulama Mukayesesi (learning, testing and verification comparison of ANN Method)



Şekil 15. Yapay Sinir Ağı Modelinin Öğrenme, Test ve Doğrulama Performansları (Learning, testing and verification performans of ANN Method)

Parametrik Sonlu Elemanlar çözümü ile YSA çözümlerinin istatistik mukayesesi Çizelge 5 de verilmiştir. Buna göre FEA çözümleri ile YSA çözümleri arasında büyük bir uyum söz konusudur. Yapay Sinir Ağı Modelinin problem için doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Çizelge 5. FEA- YSA modellerinin performanslarının istatistiksel mukayesesi (statistically comparison between FEA and ANN Performance)

	FEA – ANN
Average Error MEP%	0.0001999333
RMS	3.60391E-05
R ²	0.999999333

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, 3 farklı model için (Düz, Ters ve Düz + Ters (Çift)) yaprak yay için mühendislik yaklaşımıyla tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada derin mühendislik faaliyetlerinin yanı sıra, bilgisayar destekli tasarım ve yapay zeka teknikleri kullanılmıştır. Öncelikle parametrik yaprak yay tasarımlar boyutları ve katman sayıları belirlenerek yaprak yaylar boyutlandırılmıştır. FEM yaklaşımı ile parametrik modeller ANSYS yazılımında parametrik olarak modellenmiş ve minimum ve maksimum yük durumuna göre FEA sonuçları elde edilmiştir. FEA sonuçları bir veri tabanı haline getirilmiş ve bu veri tabanı kullanılarak Yapay Sinir Ağı Modeli belirlenmiştir. Bu amaçla birçok Yapay Sinir Ağı Modeli denenmiş ve test edilmiş, istatistiksel olarak en iyi performansa sahip yapay sinir ağı modeli, yaprak yaylar için belirlenmiştir.

Yapılan çalışma, bilgisayar destekli tasarım ve modelleme çalışmasının yanı sıra yapay zeka tekniklerini de içinde barındırmaktadır. Özellikle bir tasarımcının öncelikle problemin boyutsal ölçülerini belirlemesi ve daha sonra yapması gereken meşakkatli mühendislik hesaplamalarını gerçekleştirmesi gerekmektedir. Geliştirilen yapay zeka tekniklerine dayalı olan Yapay Sinir Ağı Modeli ile tasarımcının harcayacağı çaba ve zamandan tasarruf edilerek deneysel/ analiz sonuçlarına çok yakın değerlerde tasarım yapmasını sağlayacak bir metot ortaya konulmuştur. Mühendislik tecrübe ve bilgi gereken işlemler, basit bir yazılımla her tasarımcının kolay ve ucuz yönden tasarım yapabilme yetisi kazandırılmıştır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Serdinç Yavuz: SEA yöntemi doğrultusunda analizleri ve makalenin yazımlarını yapmıştır.

Murat Tolga Özkan : YSA yöntemi doğrultusunda analizleri, makalenin yazımlarını ve genel değerlendirmeyi yapmıştır .

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gowd G.H. and Goud E.V., “static analysis of leaf spring”, **International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)**, 4(8): 3794-3803, (2012).
- [2] Sunar Ö. ve Çevik M., “Tek katlı yaprak yaylarda sonlu elemanlar yöntemi ile yorulma analizi”, **C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi**, 11(1): 1-6, (2015).
- [3] Bhandarkar D.K. and Shekhawat S.P., “Design, analysis and optimization of leaf spring”, **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, 3(6): 13658-13666, (2014).
- [4] Kelebek O., Kuralay N.S. ve Karaoğlan M.U., “Ağır taşıtlar için çok katlı konvansiyonel yaprak yay yerine tek katlı parabolik yaprak yay tasarımı ve analizi”, **Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, 20 (59): 481-491, (2018).
- [5] Dubey D.N. and Mahakalkar S.G., “Stress analysis of a mono-parabolic leaf spring—a review”, **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, 3(2): 769-772, (2013).
- [6] Reddy A.C., Sagar M.V. and Babu G.S., “Optimal design of automobile leaf spring using finite element analysis”, **International Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 7(2): 87-94, (2012).
- [7] Venkatesan M. and Devaraj D.H., “Design And Analysis Of Composite Leaf Spring In Light Vehicle”, **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, 2(1): 213-218, (2012).
- [8] Patunkar M.M. and Dolas D.R., “Modelling and analysis of composite leaf spring under the static load condition by using FEA”, **International Journal of Mechanical & Industrial Engineering**, 1(1):1-4, (2011).
- [9] Dhoshi N.P., Ingole N.K. and Gulhane U.D., “Analysis and modification of leaf spring of tractor trailer using analytical and finite element method”, **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**,1(2): 719-722, (2011).
- [10] Yinhuang Z., Ka X. and Zhigao H., “Finite element analysis of composite leaf spring”, **International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)**,3(5): 316-319, (2011).
- [11] Kumar K. and Aggarwal M.L., “A finite element approach for analysis of a multi leaf spring using CAE tools”, **Research Journal of Recent Sciences**, 1(2): 92-96, (2012).
- [12] Manchanda S., Singh B. and Singh G., “Design and finite element analysis of leaf spring using different material properties”, **Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)**,4(7): 186-189, (2015).
- [13] Hussain J.H. and Meenakshi C.M., “Simulation and analysis of heavy vehicles composite leaf spring”, **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, 116(17): 135-141, (2017).
- [14] Kumar K. and Aggarwal M.L., “Computer aided FEA simulation of EN45A parabolic leaf spring”, **International Journal of Industrial Engineering Computations**, 4(2): 297-304, (2013).
- [15] Baviskar A.C., Bhamre V.G and Sarode S.S., “Design and analysis of a leaf spring for automobile suspension system: A Review”, **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, 3(6): 406-410, (2013).
- [16] Topaç M.M. ve Bahar İ., “Bir askeri hizmet taşıtında kullanılan parabolik yaprak yayın yay karakteristiğinin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yardımıyla belirlenmesi”, **Politeknik Dergisi**, 22(1): 115-120, (2019).
- [17] Puspitasari A. and Puspitasari P., “Characteristics of leaf spring strength of material 65Si7 and material C17000 using finite element method”, **Proceedings of the International Mechanical Engineering and Engineering Education Conferences (IMEEEEC)**, 1-6, (2016).
- [18] Pozhilarasu V. and Pillai T.P., “Performance analysis of steel leaf spring with composite leaf spring and fabrication of composite leaf spring”, **International Journal of Engineering Research and Science and Technology**, 2(3): 102-109, (2013).
- [19] JULİYANA S.J., PRAKASH J.U., PATURU P. and SADHANA A.D., “Finite element analysis of mono composite leaf spring of varying thickness and varying width used in automobiles”, **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)**, 7(6): 247-254, (2017).
- [20] Kurna S., Sharma S. and Mathur A., “Investigation of stresses and deflection in multi stage leaf spring of heavy duty vehicle by FEM and it’s experimental verification”, **Symposium on International Automotive Technology**, 1-9, (2015).
- [21] Kurmi R.S. Machine Design,14th Edition., EURASIA PUBLISHING HOUSE (PVT.) LTD.RAM NAGAR, NEW DELHI-110 055, (2005).
- [22] Uzel Ticaret ve Sanayi Limited Şirketi., Yaprak Yaylar, Helisel Yaylar.
- [23] Charde R.B. and Charde D.V., “Investigation of stresses in master leaf of leaf spring by FEM and its experimental verification”, **International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)**, 4(2): 633-640, (2012).
- [24] Ozkan M.T. and Erdemir F., “Determination of stress concentration factors for shafts under tension”, **Materials Testing**, 62(4): 413-421, (2020).
- [25] Toktas I., Ozkan M.T., Erdemir F. and Yuksel N., “Determination of stress concentration factor (Kt) for a crankshaft under bending loading: an artificial neural networks approach”, **Politeknik Dergisi**, 23(3):813-819, (2020).
- [26] Ulas H.B., Ozkan M.T. and Malkoc Y., “Vibration prediction in drilling processes with HSS and carbide drill bit by means of artificial neural networks”, **Neural Computing and Applications**, 31:5547–5562, (2018).
- [27] Basak H., Ozkan M.T. and Toktas I., “Experimental research and ANN modelling on the impact of the ball burnishing process on the mechanical properties of 5083 Al-Mg Material”, **Kovové materiály- Metallic Materials** 57 (1): 61-74, (2019).
- [28] Ulas H.B., Bilgin M., Sezer H.K. and Ozkan M.T., “Performance of coated and uncoated carbide cermet cutting tools during turning”, **Materials Testing**, 60 (9): 893–901, (2018).
- [29] Erdemir F. and Ozkan M.T., “Determination of theoretical stress concentration factor for circular/elliptical holes with reinforcement using analytical, finite element method and artificial neural

- network techniques”, **Neural Computing & Applications**, 33(17): 1-15, (2021).
- [30] Ozkan M.T., Toktas I. and Doganay S.K., “Estimations of stress concentration factors C_w/K_t s for helical circular/square cross sectional tension-compression springs and artificial neural network modelling”, **Politeknik Dergisi**, 23(3): 901-908, (2020).
- [31] Erdemir F. and Ozkan M.T., “Plastik parçalarda bir esneyerek kilitlenen bağlantı modelinin modal analizi”, **Politeknik Dergisi**, 22(4): 927-933, (2019).